

УДК 629.785

НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ ЛИНЕЙНОГО ТИПА

И.А. Перл

Рассмотрена внутренняя организация сенсора, основанного на линейном фотоприборе с зарядовой связью. Проанализированы зависимости между различными характеристиками подобных приборов, выделено наиболее важное направление для оптимизации их работы и повышения производительности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), прибор с зарядовой связью (ПЗС), оптимизация, анализ.

Введение

Линейки фотоприбора с зарядовой связью (ФПЗС) по их внутренней организации можно разделить на две большие категории: с разделением областей накопления и переноса и без разделения. Оба варианта представлены на рис. 1.

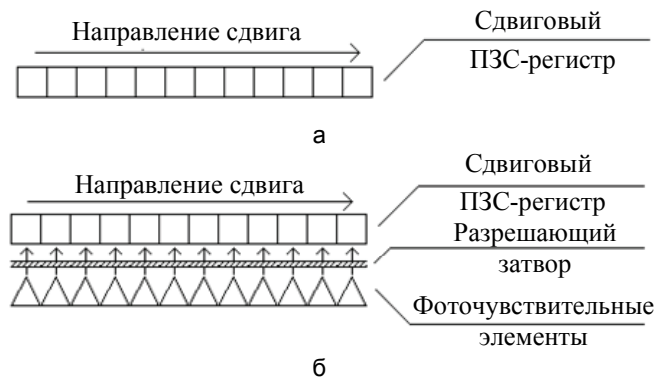


Рис. 1. Типы линейных ФПЗС: без разделения областей накопления и переноса (а); с отдельными фотодиодами и сдвиговым регистром (б)

Вариант построения линейки ФПЗС без разделения областей накопления и переноса заряда является наиболее простым, однако такие сенсоры не применимы в областях, где требуется высокое качество получаемых изображений [1]. Это связано с тем, что накопление и перенос заряда выполняется одними и теми же элементами, и процесс накопления не прекращается после начала переноса заряда. Это приводит к образованию смаза на результирующем изображении, так как пиксель с дальнего края (по отношению к направлению сдвига регистра), проходя через всю линейку, получает дополнительный заряд, накапливаемый в остальных ячейках ПЗС-структуры (рис. 1, а). Альтернативное решение состоит в разделении областей накопления и транспортировки заряда (рис. 1, б). Для реализации этого подхода используют независимую линейку фотоприемных элементов и сдвиговой ПЗС-регистр. Для защиты сдвигового регистра от попадания лишних зарядов используется разрешающий затвор. Этот элемент разбивает рабочий цикл линейки ФПЗС на два этапа: первый этап – это накопление заряда в фотоприемных элементах, как только время экспозиции заканчивается, разрешающий затвор открывается и происходит параллельная передача накопленного заряда и ячеек фотоприемного устройства в соответствующие ячейки ПЗС-решетки. После окончания передачи заряда разрешающий затвор закрывается, и фотодиоды снова переходят в состояние накопления, а ПЗС-регистр начинает сдвигаться, возвращая накопленные данные из сенсора. Это решение имеет целый ряд достоинств. Во-первых, оно решает проблему смаза на результирующем изображении. Во-вторых, оно позволяет варьировать длительность времени экспозиции независимо от скорости сдвигания ПЗС-решетки, но время накопления не может быть меньше времени полного сдвига регистра.

Анализ параметров работы линейки ФПЗС

Рабочий цикл линейки ФПЗС можно разделить на два основных этапа – накопление заряда в фотодиодах и возврат накопленного заряда сдвиговым ПЗС-регистром. Положим, что время, необходимое

для сдвига ПЗС-регистра на один элемент, равно $T_{\text{элемента}}$, а количество элементов в ПЗС-структуре – L , тогда время, необходимое для полного сдвига регистра $T_{\text{ПЗС}}$, будет равно

$$T_{\text{ПЗС}} = T_{\text{элемента}} \times L \quad \text{или} \quad T_{\text{ПЗС}} = \frac{L}{\nu_{\text{ПЗС}}}, \quad (1)$$

где $\nu_{\text{ПЗС}}$ – частота работы ПЗС-регистра. Так как процесс накопления идет параллельно процессу выдачи результата, накопленного за время предыдущего цикла накопления (рассматриваются линейки ПЗС с разделенными областями накопления и переноса заряда), то вернуть результаты текущего цикла накопления можно только после того, как будет завершен перенос предыдущих результатов в ПЗС-структуре. Такая архитектура накладывает жесткие ограничения на минимальное время накопления, т.е. минимальное время накопления не может быть меньше $T_{\text{ПЗС}}$, и, как следствие, зависит от длины линейки ФПЗС и частоты ее работы, таким образом, минимальное время накопления можно рассматривать как функцию от этих параметров. На графике показана зависимость минимального времени накопления от частоты работы и длины ПЗС-регистра (рис. 2).

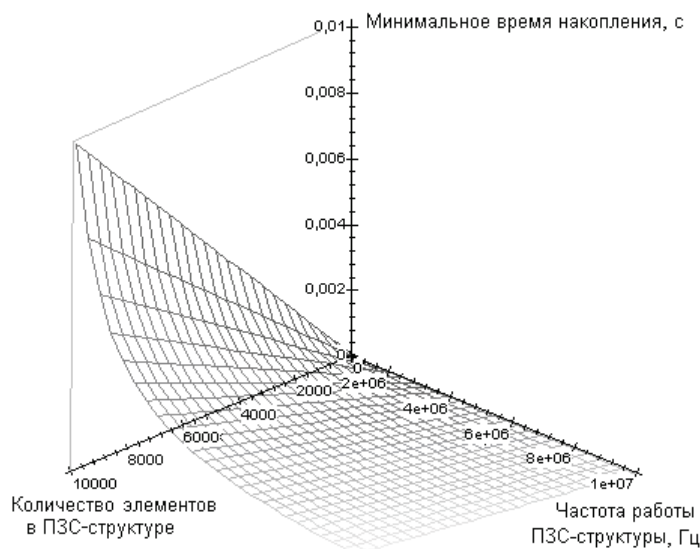


Рис. 2. График зависимости функции минимального времени накопления от тактовой частоты и количества элементов ПЗС-регистра

В системах ДЗЗ необходимо за один проход получить как можно больше данных о снимаемом участке, поэтому предпочтение отдается линейкам средней длины. Современные технологии позволяют производить фотодиоды большой емкости, которые можно экспонировать в течение долгого времени без потери качества результирующих снимков, однако этот подход неприменим в системах ДЗЗ, так как изображение в фотозоне меняется достаточно быстро, что приводит к наложению и, как результат, к негодности данных, накапливаемых за длительное время экспонирования [2–3].

С целью исследования механизмов работы сенсоров данного типа была разработана модель, позволяющая более детально и наглядно изучить процессы, происходящие в линейке ФПЗС. Модель представляет два независимых процесса, отвечающих за процесс накопления заряда в фотодиодах и процесс перемещения заряда в регистре ПЗС соответственно. Входными параметрами для модели положим желаемое время экспозиции и тактовую частоту системы съемки, тогда выходным параметром будет длина линейки, которую можно использовать в рассчитываемой системе.

Так как ДЗЗ представляет собой процесс съемки движущегося объекта, то возникает необходимость использовать дополнительный метод фокусировки оптической системы на снимаемом участке [4]. Этот метод называется методом тангажного замедления, и его основная идея представлена на рис. 3.

Пусть наблюдение ведется в надир, тогда при движении космического аппарата (КА) угол тангажа изменяется таким образом, чтобы надир был направлен в одну и ту же точку. Примем следующие обозначения: $V_{\text{КА}}$ – линейная скорость движения КА; $V_{\text{сдв}}$ – скорость сдвига изображения в фотозоне оптико-электронного преобразователя (ОЭП); $V_{\text{пст}}$ – линейная скорость подспутниковой точки; f' – фокусное расстояние объектива оптико-электронного комплекса дистанционного зондирования поверхности Земли из Космоса (ОЭК_{ДЗЗ}); H – высота орбиты КА относительно подспутниковой точки; $W_{\text{сдв-ОЭП}}$ – необходимая скорость движения изображения для обеспечения требуемой экспозиции при съемке; δ – размер пикселя фотозоны ОЭП; $W_{\text{КА-танг-ОЭП}}$ – скорость сдвига изображения в фотозоне ОЭП при тангажировании; $\tau_{\text{пр}}$ – необходимое время накопления сигнала на пикселе при съемке (свойство фотозоны); N – число шагов накопления (число повторения засветки пикселя для получения сигнала требуемого уровня); $\omega_{\text{танг}}$ –

угловая скорость тангажирования; $1L_K$ и $2L_K$ – величина 1-го и 2-го равных кадров; $l_{пп}$ – проекция пикселя на поверхность Земли; L_S – величина слепого участка поверхности; φ_1 и φ_2 – углы между радиусами Земли ($R_3 = 6371$ км), проведенными через подспутниковую точку C и точку визирования; α_B – угол визирования ОЭК_{дзз}.

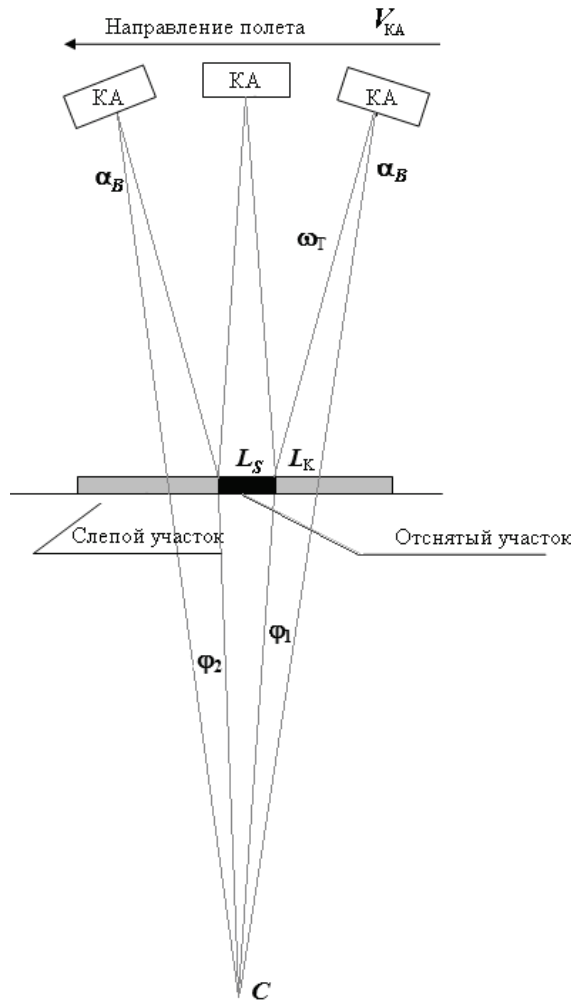


Рис. 3. Общая схема метода тангажного замедления

Для проведения расчетов будем использовать следующие исходные данные ОЭК_{дзз} при наблюдении в надир: $H=575$ км; $f'=1670$ мм; $V_{пст}=6,948$ км/с; $t_{пр}=1,5 \times 10^{-3}$ с; $\delta=5$ мкм; $V_{сди\text{надир}}=20,18$ мм/с.

Расчеты, проведенные по методике априорного определения линейного разрешения на местности (ЛРМ) для ФПЗС с размером пикселя 5 мкм, показывают, что для получения ЛРМ на уровне 2,5 м необходимо иметь число шагов накопления (ЧШН) равное 6, что эквивалентно времени накопления $t_H \approx 1,5$ мс и должно быть обеспечено за счет уменьшения скорости движения изображения (СДИ) путем тангажирования до величины $W_{сди-оэп}$

$$W_{сди-оэп} = \frac{\delta}{\tau_{пр}} = \frac{5}{1,5 \times 10^{-3}} = 3,33 \text{ мм/с} . \quad (2)$$

Угловая скорость тангажирования ω_T (угловая скорость перемещения линии визирования в плоскости орбиты относительно узловой точки объектива) определяется из выражения

$$\left. \begin{aligned} W_{сди-оэп} &= \frac{\delta}{\tau_{пр}} = W_{пст-оэп} - W_{ка-танг-оэп} \\ W_{пст-оэп} &= V_{пст} \times \cos(\alpha_B + \phi) \times \frac{f'}{D_H} \\ W_{ка-танг-оэп} &= W_{пст-оэп} - \frac{\delta}{\tau_{пр}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_T(\alpha_B) = \frac{V_{пст} \times \cos(\alpha_B + \phi)}{D_H} - \frac{\delta}{\tau_{пр} \times f'}$$

При прохождении линии визирования через надир

$$\omega_T = \frac{V_{\text{ПСТ}}}{D_H} - \frac{W_{\text{СДИ-ОЭП}}}{f} = 0,012 - 0,002 = 0,01 \text{ с}^{-1}.$$

При отклонении линии визирования на угол визирования α°

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{СДИ-ОЭП}}(\alpha_B) &= V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \phi) \times \frac{f}{D_H} - \omega_T(\alpha_B) \times f \\ D_H &= (R_3 + H) \cos \alpha_B - \sqrt{R_3^2 - (R_3 + H)^2 \times \sin^2 \alpha_B} \\ \phi &= \arcsin\left(\frac{D_H}{R_3} \times \sin \alpha_B\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_T(\alpha_B) = \frac{V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \phi)}{D_H} - \frac{W_{\text{СДИ-ОЭП}}(\alpha_B)}{f},$$

где D_H – наклонная дальность до точки визирования; ϕ – угол между радиусами Земли, проведенными в подспутниковую точку и точку визирования.

Большинство комплексов ДЗЗ использует не очень высокие тактовые частоты для компонентов системы – не выше 10 МГц (обычно около 4–6 МГц), так как системы с высокой частотой системной шины более подвержены помехам и могут быть менее стабильны. Это накладывает ограничения на основные параметры работы сенсора. Для того чтобы получать изображения достаточного размера, необходимо использовать линейки максимально возможной длины. С одной стороны, время накопления должно удовлетворять соотношению (2), а с другой – оно не должно быть меньше, чем минимально возможное время накопления для сенсора данного типа (1), т.е.

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{СДИ-ОЭП}} &= \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}}} \Rightarrow \tau_{\text{пр}} = \frac{\delta}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \\ T_{\text{ПЗС}} &= \frac{L}{v_{\text{ПЗС}}} \\ T_{\text{ПЗС}} &\leq \tau_{\text{пр}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{L}{v_{\text{ПЗС}}} \leq \frac{\delta}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \Rightarrow L \leq \frac{\delta \times v_{\text{ПЗС}}}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \approx 6600 \text{ элементов}.$$

Таким образом, количество элементов, которые могут быть использованы в линейке, зависит от размера фоточувствительного элемента, тактовой частоты системной шины и скорости бега изображения в фотозоне.

Если предположить, что возможно ведение съемки без использования тангажного замедления, то $W_{\text{СДИ-ОЭП}}$ будет равно 17 мм/с, что даст на следующие характеристики для основных параметров сенсора:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{пр}} &= \frac{\delta}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} = \frac{5 \text{ мкм}}{17 \text{ мм/с}} = 0,29 \text{ мс}, \\ L &\leq \frac{\delta \times v_{\text{ПЗС}}}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \Rightarrow L \leq \frac{5 \text{ мкм} \times 4 \text{ МГц}}{17 \text{ мм/с}} \Rightarrow L \leq 1176. \end{aligned} \quad (3)$$

Как видно из приведенных расчетов, ведение съемки без применения методик замедления бега изображения в фотозоне приводит к наложению жестких ограничений на минимальное время накопления и на длину сенсора. С одной стороны, использование линеек такой длины в системах ДЗЗ недостаточно эффективно, так как полоса захвата у них слишком узкая, с другой – такое время накопления является недостаточным для получения изображения необходимого качества. Таким образом, новая задача может быть сформулирована следующим образом: оптимизировать работу сенсора таким образом, чтобы можно было вести процесс съемки без использования тангажного замедления с характеристиками линейки (время накопления и длина сенсора), приближенными к характеристикам сенсора, работающего с использованием тангажного замедления.

Если сократить время экспонирования линейки без сокращения длины выходного регистра, то возникает наложение данных зондирования между соседними кадрами, так как не все данные из предыдущего кадра успевают покинуть сенсор. Так как сокращение длины линейки крайне нежелательно с точки зрения характеристик результатов ДЗЗ, то необходимо произвести оптимизацию именно методов возврата данных из сенсора ФПЗС.

Моделирование процесса съемки с использованием классической линейки ФПЗС с применением метода тангажного замедления для торможения изображения в фотозоне подтверждает высокую эффективность этого подхода с точки зрения получения высокого качества изображения, однако в то же время ярко демонстрирует наличие обширных слепых участков.

Рис. 4 иллюстрирует моделирование съемки с использованием тангажного замедления. Если отказаться от использования тангажного замедления, сохранив при этом параметры работы линейки (один кадр получается за 1,5 мс), то результат съемки представляет собой набор достаточно широких полос, который соответствует участку поверхности земли, над которым пролетел КА за время накопления. Схе-

ма на рис. 4 показывает соотношение реальных участков поверхности Земли с соответствующими им строчками изображения.

В случае использования тангажного замедления скорость движения изображения в фотозоне составляет 3 мм/с, т.е. за время накопления ФПЗС линейки (1,5 мс) изображение сместится на $3 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ м} = 4,5 \text{ мкм}$, т.е. смещение изображения на 10% меньше, чем размер пикселя, что позволяет снять данные зондирования с последовательно расположенных проекций участков поверхности Земли в фотозоне с небольшим перекрытием, обеспечивающим повышение уровня достоверности данных зондирования. Если же тангажирование отсутствует, то скорость бега изображения в фотозоне составляет 17 мм/с и смещение изображения за один интервал накопления равно $17 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ м} = 25,5 \text{ мкм}$, что превышает размер пикселя фотозоны более чем в 5 раз и приводит к соответствующим потерям данных зондирования.

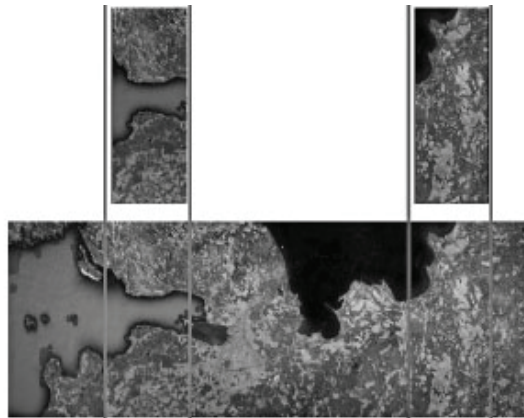


Рис. 4. Результаты моделирования процесса съемки с использованием тангажного замедления: сверху – результат съемки; снизу – реальное изображение, использованное как объект съемки

Для исследования формирования изображения в процессе съемки с использованием линейки ФПЗС была разработана вторая модель. Как и первая использованная модель, эта система состоит из двух независимых потоков, что наиболее точно отображает реальный процесс съемки. В качестве исходных данных в модель загружается изображение, которое представляет снимаемую поверхность. Первый поток модели отвечает за движение этого изображения, за его скорость и направление. Второй поток отвечает за моделирование поведения спутника и построение результирующего изображения с учетом заданных характеристик съемки (использование тангажирования, ширина линейки, время экспонирования и др.). Таким образом, первый процесс отвечает за относительное движение поверхности Земли в системе координат, привязанной к спутнику, что есть суперпозиция движения поверхности Земли и спутника относительно Земли. Второй поток моделирует поведение покоящегося спутника, который находится над движущейся поверхностью и может только отклоняться по углу тангажа. К достоинствам этой модели можно отнести ее относительную простоту и, в то же время, полноту описания процесса съемки. Еще одной полезной особенностью является возможность загрузки различных снимков земной поверхности (с разным увеличением) что позволяет моделировать различные настройки оптической системы, а также возможность загрузки тестовых изображений для оценки качества передачи элементов различных типов (вертикальных или горизонтальных относительно положения линейки, более ярких или темных). На рис. 5 показан результат моделирования съемки с учетом скорости бега изображения в фотозоне, равной 17 мм/с.

Приведенный результат моделирования отличается от реальной картинке, которую можно было бы получить при тех же исходных условиях, тем, что на приведенном рисунке присутствуют белые полосы, которых нет во время ведения реальной съемки. Так как смещение изображения в 5 раз превышает ширину сенсора, то в реальной жизни снимок будет состоять из полос шириной, равной 5 ширинам активного пикселя. Иными словами, вместо 5 информативных узких полос будет получаться одна, в 5 раз более широкая и содержащая информацию обо всех 5 участках. Такое ведение съемки не допустимо, так как не дает достоверной информации о каждой узкой полоске, а усредненная широкая полоса не является достаточно информативной из-за существенного смаза, вызванного сильным смещением изображения. Рис. 6 иллюстрирует результат строчного восстановления такого изображения с использованием данных о соседних известных точках. Как видно из снимка модели, восстановленное изображение позволяет четко получить данные только о положении береговой линии. Детали объектов, расположенных в море или на суше, практически полностью утеряны.

Используемое время экспонирования, равное 1,5 мс, является аппаратным ограничением, так как это минимальное время, за которое в ФПЗС-системе успевает накопиться заряд, необходимый для получения снимков нужного качества. Однако это ограничение может быть отброшено, если фотодиоды экс-

понировать не напрямую, а с использованием усилителя яркости (например, Photonis-DEP (Нидерланды)), выход которого посредством прямого сочленения связан с волоконно-оптическим входным окном ПЗС. Использование усилителя яркости в качестве оптического входного затвора позволяет существенно, в пределе до десятков наносекунд, снизить время экспонирования. Чтобы отказаться от использования тангажного замедления без ухудшения качества результирующих снимков, необходимо сохранить соотношение смещения изображения и времени экспонирования линейки. Как показано в [3], в этом случае время экспонирования должно быть 0,29 мс или в 5,2 раза меньше, чем при использовании замедления изображения в фотозоне. Указанное время экспонирования существенно превосходит сотни наносекунд и, как следствие, такое уменьшение времени экспозиции вполне возможно за счет использования усилителя яркости в качестве входного затвора.

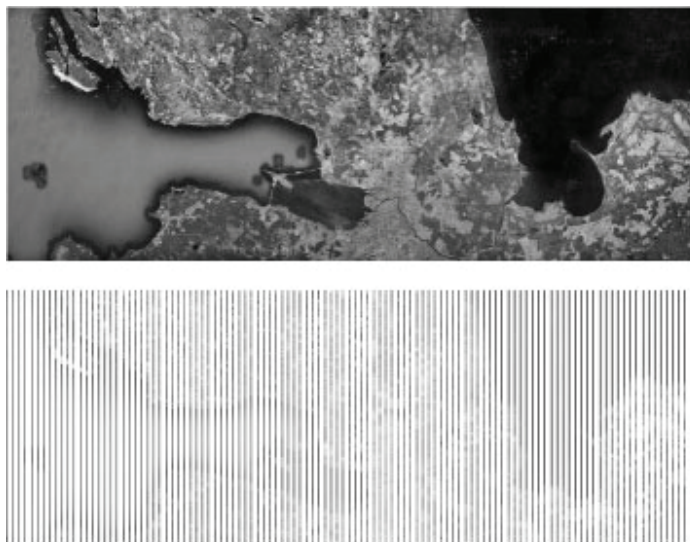


Рис. 5. Результат моделирования процесса съемки с использованием ФПЗС-линейки без применения метода тангажного замедления (сверху – оригинальное изображение, внизу – результат моделирования процесса съемки)

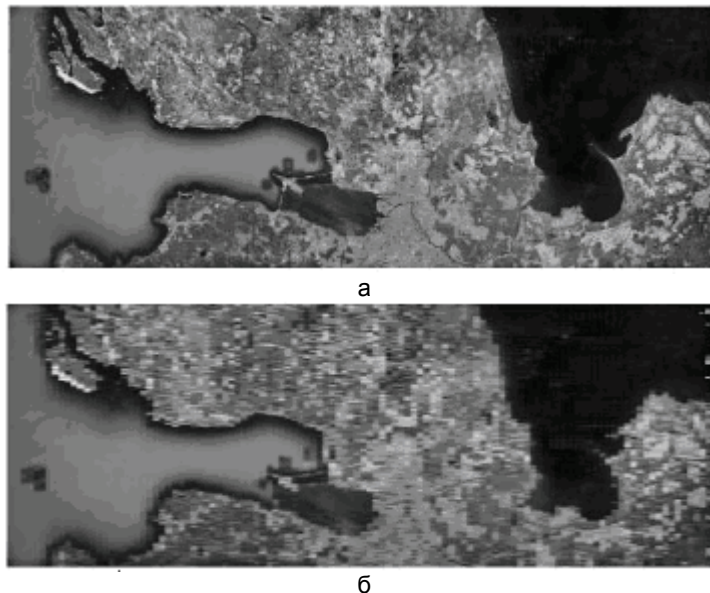


Рис. 6. Оригинальное изображение, использованное как объект съемки (а); результат восстановления изображения, полученного в результате маршрутной съемки с использованием линейки ФПЗС (б)

Заключение

Таким образом, оптимизация и повышение производительности работы сенсоров ФПЗС линейного типа должны быть сфокусированы именно на развитии механизмов вывода данных, так как из всех операций, происходящих внутри сенсора подобного типа, именно выдача результатов съемки является наиболее длительной. В дополнение к требованиям производительности, использование подобных сенсоров в системах ДЗЗ выдвигает еще требование повышенной надежности сенсора, что не позволяет повышать скорость выдачи данных из сенсора простым повышением частоты работы системы.

Литература

1. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 261 с.
2. Гош С., Чандра А. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 328 с.
3. Аванесов Г.А., Василевский А.С., Зиман Я.Л., Полянский И.В. Цифровые авиационные съемочные системы на линейных ПЗС-детекторах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2. – С. 189–195.
4. Демин А.В., Денисов А.В., Перл И.А., Третьякова А.А. Оптико-электронный комплекс повышенной производительности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3. – С. 3–5.

Перл Иван Андреевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, j-pearl@mail.ru

УДК 681.786.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ДОКОВОГО ПРОГИБОМЕРА

А.М. Алеев, А.А. Горбачёв, В.В. Коротаев, А.В. Пантюшин

Рассмотрена схема и принцип действия оптико-электронного прогибомера, предназначенного для непрерывного автоматизированного контроля продольного прогиба плавучего дока. Приведены результаты экспериментального исследования случайной составляющей погрешности прогибомера.

Ключевые слова: док плавучий, прогиб, прогибомер оптико-электронный.

Введение

Докование судов в плавучем доке представляет собой сложный и ответственный процесс, в течение которого должен производиться оперативный контроль различных параметров дока. Одним из важнейших параметров является величина прогиба, характеризующая продольную деформацию дока в целом. Обеспечение надежного и оперативного контроля прогиба дока является одной из приоритетных задач как для снижения риска возникновения аварийных ситуаций, так и для оптимизации времени выполнения операций докования.

На кафедре оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС) СПбГУ ИТМО разработан оптико-электронный доковый прогибомер (ПОЭД), позволяющий проводить непрерывное автоматизированное измерение текущего значения прогиба дока бесконтактным методом. В настоящей работе описаны принцип действия и схема построения прогибомера, а также приведены методика и результаты экспериментальной проверки случайной составляющей его основной погрешности.

Схема построения и принцип работы прогибомера

Прогибомер реализован по схеме двухканальной оптико-электронной системы (ОЭС) контроля смещений (рис. 1). В данной схеме базовый блок (ББ), задающий приборную систему координат, устанавливается в центральной части топ-палубы дока. В своем составе ББ содержит два фотоприемных модуля, выполненных в виде цифровых камер, развернутых друг относительно друга на угол 180° . Такое расположение фотоприемных модулей позволяет образовать два измерительных канала, каждый из которых предназначен для регистрации смещения одной из активных реперных меток – МР1, МР2, закрепленных на корме и носу дока по обе стороны от ББ.

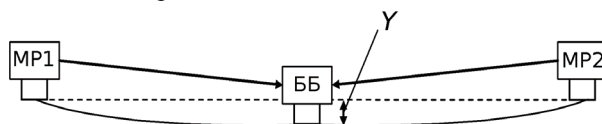


Рис. 1. Схема двухканальной ОЭС контроля смещений

Контроль смещений меток позволяет дифференцированно определять деформации носовой и кормовой частей дока относительно его центральной части, которые в общем случае не равны друг другу. При симметричном расположении меток относительно ББ величина прогиба дока Y определяется как полусумма их смещений. По конструктивным требованиям схема размещения блоков прогибомера может быть и несимметричной, что приводит к введению весовых коэффициентов для смещений меток при расчете величины прогиба. Величины данных коэффициентов определяются из конкретных условий взаимного положения меток и базового блока.

Измерительная схема прогибомера, приведенная на рис. 2, состоит из двух одинаковых измерительных каналов, развернутых друг относительно друга на 180° в горизонтальной плоскости. Каждый из каналов содержит активную реперную метку (MP1, MP2), выполненную в виде полупроводникового излучающего диода (ПИД), излучение которого регистрируется фотоприемным модулем (ФМ1, ФМ2), состоящим из объектива (Об1, Об2) и видеокамеры (ВК1, ВК2) с КМОП-фоточувствительной матрицей.

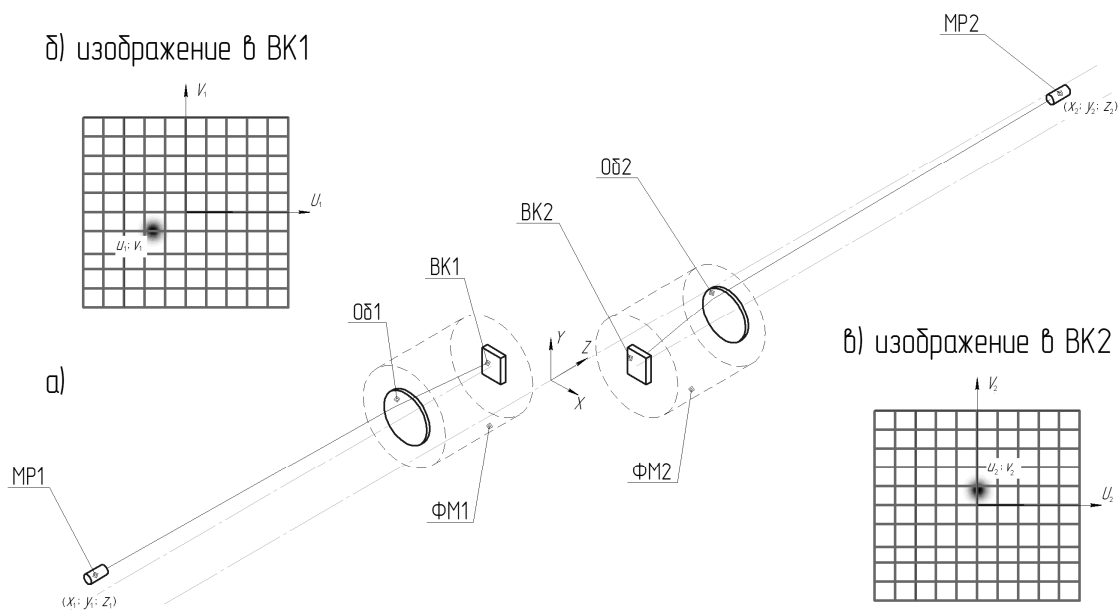


Рис. 2. Измерительная схема прогибомера:
а – схема измерительных каналов; б, в – изображения меток, сформированные видеокамерами 1 и 2 соответственно

Видеокамеры обоих каналов через интерфейс USB подключены к промышленному компьютеру, входящему в состав блока обработки (БО) и выполняющему функцию анализа изображений с целью определения смещений реперных меток и расчета величины прогиба.

Алгоритм работы прогибомера – следующий. БО управляет режимом работы ПИД реперных меток MP1 и MP2 так, чтобы в каждом из каналов фиксировалось два изображения пространства, лежащего в поле зрения объектива: первое – при излучающем ПИД (рис. 3, а), второе – при неизлучающем ПИД (рис. 3, б).

Обработка полученных таким образом пар изображений в БО осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится выделение из фона изображения метки с помощью алгоритма межкадровой разности. Из изображения при излучающем ПИД «вычитается» изображение при неизлучающем ПИД, в результате чего получается изображение (рис. 2, б, в; рис. 3, в), очищенное от фона, общего для двух кадров. Применение данного алгоритма позволяет достаточно простым в реализации способом эффективно выделить изображение метки и уменьшить влияние различного рода помех, одинаково присутствующих на обоих кадрах серии. Однако этот подход не позволяет избавиться от присутствия на результирующем изображении такого рода объектов, как следы от движущихся объектов, блики, вызванные излучением ПИД реперной метки и других объектов, изменяющихся во времени за период съемки [1, 2].

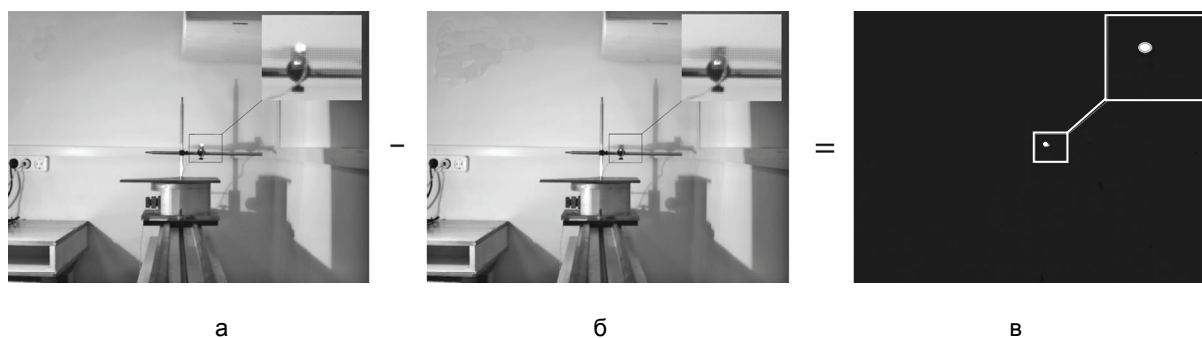


Рис. 3. Пояснение к алгоритму вычисления межкадровой разности: изображение при излучающем ПИД (а); изображение при неизлучающем ПИД (б); очищенное от фона изображение (в)

На втором этапе очищенные от фона изображения анализируются на предмет поиска их энергетических центров тяжести, принимаемых за центры изображений (u_1, v_1) ПИД 1 (рис. 2, б) и (u_2, v_2) ПИД 2 (рис. 2, в).

Поскольку фактически проводится измерение координат точечного источника, изображение которого занимает небольшую часть матрицы, то оценка координат центра тяжести проводится в некоторой области вокруг элемента с максимальной освещенностью в соответствии с выражениями [3]

$$u = \frac{\sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} \sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} E_{i,j}}{\sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} \sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} E_{i,j}},$$

$$v = \frac{\sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} \sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} E_{i,j}}{\sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} \sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} E_{i,j}},$$

где $E_{i,j}$ – амплитуда видеоимпульса; m, n – число строк и столбцов матрицы ПОИ; U_m, V_m – координаты элемента с наибольшим сигналом; k, l – размер области расчета по горизонтали и вертикали соответственно. Для увеличения быстродействия системы поиск элемента с максимальной освещенностью производится, исключая определенные строки и столбцы. Такой поиск элемента основан на том факте, что изображение ПИД занимает несколько элементов [3].

После нахождения элемента с максимальной освещенностью проводится уточнение его положения в выбранном окне без пропуска строк и столбцов с целью снижения риска возникновения ошибок. На основе найденных координат изображений ПИД рассчитываются величины смещений меток в вертикальном направлении в каждом из каналов:

$$y = (u - U_0) \cdot M_u,$$

где U_0 – координата элемента, соответствующая положению метки без прогиба; M_u – масштабный коэффициент, определяемый при калибровке системы.

При симметричном расположении меток относительно базового блока величина прогиба определяется как полусумма вертикальных смещений меток в каждом из каналов:

$$Y = \frac{y_1 + y_2}{2}.$$

Измеренные смещения реперных меток в обоих каналах y_1, y_2 и величина прогиба Y отображаются на дисплее, подключенном к БО через VGA-интерфейс. Также эти данные могут быть переданы в автоматизированную систему управления доком в цифровом виде по интерфейсу RS-485.

Экспериментальная оценка случайной составляющей основной погрешности прогибомера

При калибровке измерительных каналов подбором коэффициентов M_u удается практически полностью исключить влияние систематической погрешности на результат измерения смещений меток. Таким образом, инструментальная погрешность прибора после калибровки определяется величиной случайной составляющей основной (возникающей при нормальных условиях) погрешности.

Измерение величины случайной погрешности проводилось поочередно в каждом из каналов. Структура измерительного стенда представлена на рис. 4: на расстоянии 17 м от базового блока 1 на моторизованном трансляторе 4 закреплена реперная метка 3. Моторизованный транслятор 4 управляется персональным компьютером 5, в который непрерывно передаются данные о величине смещения метки от блока обработки 2.

В эксперименте был задействован прогибомер со следующей элементной базой. В одном канале установлена цветная 5-мегапиксельная камера VEC-545 (ООО «ЭВС», г. Санкт-Петербург) со следующими параметрами: разрешение 1280×960 пикселей, частота кадров 15 Гц. Во втором канале установлена черно-белая 1,3-мегапиксельная камера VAA-135 (ООО «ЭВС», г. Санкт-Петербург), с параметрами: разрешение 1280×1024 пикселей, частота кадров 7,5 Гц. В обоих каналах установлены объективы Юпитер-11, $f' = 135$ мм. В качестве излучателей реперных меток использованы инфракрасные ПИД Kingbright L-53SF6C, $\lambda = 860$ нм. В блоке обработки установлен промышленный компьютер Lippert CRR-945GSE с центральным процессором Intel Atom N270.

Измерения величины случайной составляющей основной погрешности в каждом из каналов были проведены по следующей методике. С помощью моторизованного транслятора Standa 8MT160-300 задавалось перемещение реперной метки на величину 290 мм с шагом 10 мм в вертикальном направлении

сверху вниз и обратно (один цикл измерений, содержащий 60 точек). Всего при проверке каждого из каналов произведено по 8 циклов измерений, причем в каждой точке производилась запись одного результата измерения смещения метки.

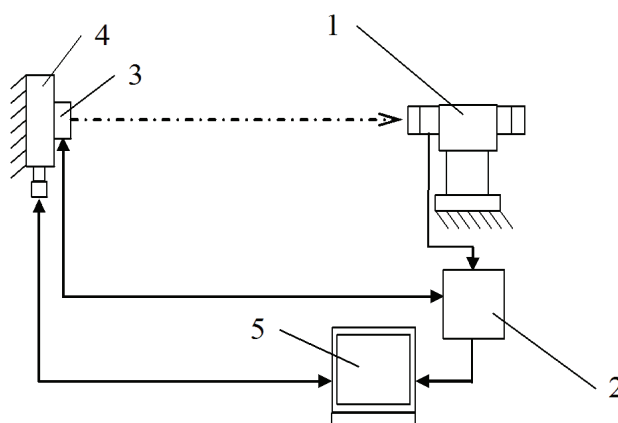


Рис. 4. Общий вид экспериментального стенда:
1 – базовый блок; 2 – блок обработки; 3 – реперная метка; 4 – моторизованный транслятор;
5 – ПК управления экспериментом

Среднее квадратическое отклонение (СКО) показаний прогибомера в каждой точке в одном канале определяется выражением

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2},$$

где s_1, s_2 – СКО измерений смещения метки в прямом и обратном направлениях.

Результаты эксперимента представлены на рис. 5.

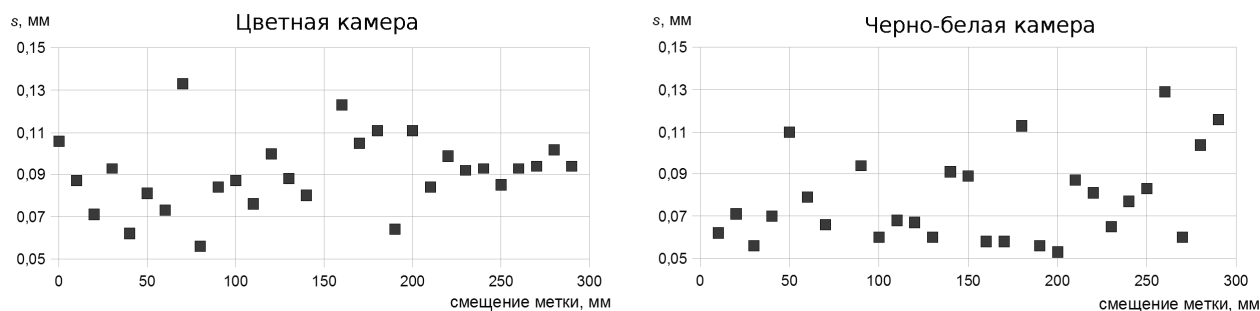


Рис. 5. Результаты эксперимента: СКО показаний прогибомера в каждом из каналов в зависимости от смещения метки

Эксперимент показал, что для данной конфигурации прогибомера средняя величина СКО измерения смещения метки в канале с цветной камерой равна $s = 0,089 \pm 0,007$ мм, в канале с черно-белой камерой $s = 0,076 \pm 0,008$ мм при доверительной вероятности 95%. Как видно на графиках (рис. 5), во всем диапазоне смещений реперной метки не наблюдается существенной разницы в величине СКО измеренных значений между цветной и черно-белой камерами. Данное обстоятельство позволяет сделать заключение об эффективности использования более дешевой черно-белой камеры. В таком случае случайная составляющая основной погрешности прогибомера, определяемая выражением

$$s_{\text{ПРОГИБ}} = \sqrt{0,5(s_{\text{НОС}}^2 + s_{\text{КОРМА}}^2)},$$

будет равна $s_{\text{ПРОГИБ}} = 0,08$ мм.

Заключение

Предложена схема построения оптико-электронного прогибомера, состоящего из двух фотоприемных модулей, развернутых друг относительно друга на угол 180° . Рассмотрены принцип действия и алгоритм работы оптико-электронного прогибомера.

Лабораторные исследования показали целесообразность использования недорогих черно-белых камер. В результате экспериментальных исследований СКО составило 0,08 мм. В дальнейшем планируется провести исследования дополнительной и методической погрешностей оптико-электронного прогибомера, возникающих вследствие влияния таких факторов, как температура, влажность, наличие фоновых засветок на месте эксплуатации прибора.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ и проведена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Анисимов А.Г., Горбачев А.А., Краснящих А.В. Исследование влияния блюминга на погрешность оптико-электронной системы контроля соосности // VII Международная конференция «Прикладная оптика – 2006» 16–20 октября 2006 г. – СПб, Россия. Сб. трудов. – Т. 1. Оптическое приборостроение. – СПб, 2006. – С. 24–28.
2. Коняхин И.А., Михеев С.В., Ворона А.М. Сравнительный анализ методов компьютерной обработки видеокладов ПЗС-камер // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2003. – Вып. 9. – С. 57–59.
3. Андреев А.Л., Ярышев С.Н., Стрелков А.Р. Аппаратные и программные средства оптико-электронных приборов с телевизионными датчиками на ФПЗС. Методические указания. – СПб: СПбГИТМО, 1995. – 49 с.
4. Жуков Д.В., Коняхин И.А., Усик А.А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 1. – С. 43–45.

<i>Алеев Алексей Муратович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, lexmaister@yandex.ru
<i>Горбачев Алексей Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, gorbachev@grv.ifmo.ru
<i>Коротаев Валерий Викторович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru
<i>Пантюшин Антон Валерьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pantyushin@ya.ru

УДК 621.397

АЛГОРИТМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.Л. Андреев, Н.А. Бурдова, В.В. Коротаев

Рассматривается алгоритм, сочетающий процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов в автоматизированных системах наблюдения за подвижными объектами в сложной фоновой обстановке. Приводится анализ взаимосвязанных факторов, предопределяющих характеристики обнаружения. Даются зависимости, на основе которых возможна оперативная организация управления решающим правилом в системе, обладающей способностью оптимизации и самоадаптации параметров алгоритма в изменяющихся условиях наблюдения в режимах обнаружения и последующего слежения за подвижными объектами.

Ключевые слова: межкадровый разностный сигнал, пространственная фильтрация, накопление сигнала по площади области изменений, характеристики обнаружения, оптимизация параметров.

Введение

В общем виде процесс автоматического выделения информации о подвижных объектах предполагает анализ не одного, а нескольких (как минимум двух) изображений, полученных в различные моменты времени. В результате такого анализа автоматизированной видеоинформационной системой (АВС) может осуществляться не только обнаружение объектов, но и определение габаритов, координат, скорости и направления перемещения в пространстве.

Наибольший интерес представляет случай, когда менее контрастные подвижные объекты наблюдаются на фоне значительно более контрастных предметов, находящихся в угловом поле АВС. В такой ситуации процесс выделения информации о подвижных объектах распадается на два этапа:

- формирование межкадрового разностного сигнала (МРС), в котором сосредоточена вся информация об изменениях, происходящих в изображении, и в то же время отсутствуют (или значительно подавлены) мешающие перепады уровня, соответствующие неподвижным объектам, находящимся в кадре;
- оптимальная обработка МРС с целью выделения необходимой информации с максимальной достоверностью.

Пусть, например, на некотором неоднородном фоне, содержащем неподвижные предметы, перемещается объект *A* (рис. 1).

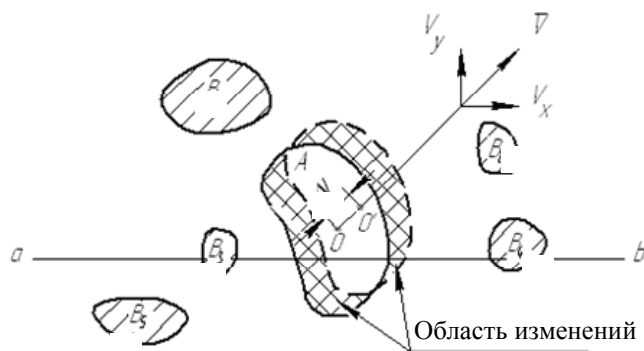


Рис. 1. Пример изображения, содержащего подвижный объект A и неподвижные предметы B1, ... B5 в зоне наблюдения

За время, равное периоду следования сравниваемых кадров ΔT_k , объект сместится на некоторое расстояние Δl . В общем случае $\Delta T_k = kT_k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа натурального ряда; T_k – период следования смежных кадров. Конкретное значение k выбирается с учетом динамики перемещения объекта, исходя из оптимальных условий формирования МРС. Как видно из рис. 1, МРС, выделяемый при сравнении сигналов, соответствующих строке ab n -го и $(n+k)$ -го кадров, должен нести определенную информацию о параметрах объекта – о положении, габаритах, направлении и скорости перемещения. Соответствующие этим признакам параметры МРС можно использовать для управления параметрами решающего правила в режиме слежения за объектами с целью оптимизации режима работы автоматизированной системы наблюдения. Заметим, что такие параметры, как скорость и направление перемещения объекта, могут быть с наибольшей достоверностью определены при анализе последовательности разностных сигналов, полученной в результате сравнения видеосигналов как минимум двух пар кадров:

$$\begin{aligned} Z^I[E_{i,j}] &= [E_{i,j}^{(n+k)}] - [E_{i,j}^{(n)}], \\ Z^{II}[E_{i,j}] &= [E_{i,j}^{(n+2k)}] - [E_{i,j}^{(n+k)}]. \end{aligned} \quad (1)$$

Дополнительные возможности улучшения вероятностных характеристик обнаружения в сложных условиях наблюдения при высоком уровне помех могут быть реализованы путем использования в составе решающего правила принципа пространственного накопления МРС по площади области изменений.

Целью работы является определение зависимостей, на основе которых возможна организация оперативного управления решающим правилом в автоматизированной системе, обладающей способностью оптимизации и самоадаптации параметров алгоритма в изменяющихся условиях наблюдения в режимах обнаружения и последующего слежения за подвижными объектами.

Анализ источников помех и ошибок обнаружения

При решении задачи обнаружения подвижных объектов могут иметь место ошибки двух родов.

- Ошибка первого рода, называемая ложной тревогой, заключается в принятии автоматическим устройством ошибочного решения о наличии сигнала об изменениях в содержании кадра, когда такой сигнал отсутствует, вследствие превышения в каком-либо элементе массива шумовой составляющей порогового уровня Π_0 :

$$|Z[E_{i,j(w)}]| \geq \Pi_0, \quad (2)$$

здесь $|Z[E_{i,j(w)}]|$ – абсолютное значение шумовой составляющей в межкадровом разностном сигнале.

- Ошибка второго рода – пропуск сигнала – возникает в том случае, если в результате взаимодействия сигнала с шумом на входе порогового устройства суммарное напряжение окажется меньше напряжения порога:

$$|Z[E_{i,j(w)}] + Z[E_{i,j}]| \leq \Pi_0. \quad (3)$$

Выбор порога ограничения Π_0 определяется соображениями эффективного подавления помехи, присутствующей в разностном сигнале. Считая, что шум на входе порогового устройства имеет нормальное распределение, и учитывая симметричность функции, описывающей закон нормального распределения, вероятность ложной тревоги при двухстороннем пороге ограничения $\pm \epsilon$ может быть рассчитана по формуле

$$P_{лт} = 1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Pi_0/\sigma} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 1 - 2 \cdot \Phi\left[\frac{\Pi_0}{\sigma}\right], \quad (4)$$

где σ – среднеквадратическое значение шумовой составляющей в МРС.

Условная вероятность правильного обнаружения сигнала от объекта

$$P_{прав} = 2\Phi[\mu_{(pc)} - \varepsilon / \sigma], \quad (5)$$

где $\mu_{(pc)}$ – отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале (1).

$$\text{В выражениях (4) и (5) } \Phi[v] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^v e^{-\frac{x^2}{2}} dx \text{ – интеграл вероятностей.}$$

Важно отметить, что отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале $\mu_{(pc)}$ всегда меньше отношения сигнал/шум μ в исходных сигналах сравниваемых кадров.

Примем следующие обозначения: v – скорость перемещения изображения объекта в плоскости изображения; d – пространственный период элементов фотоприемного устройства (ФПУ); T_n – время накопления сигнала в ФПУ; T_k – период смены кадров; $\Delta T_k = k \cdot T_k$ – интервал времени между сравниваемыми кадрами; $k = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа натурального ряда.

Рассмотрим вначале случай относительно медленных перемещений, когда за время накопления изображение подвижного объекта успевает переместиться на расстояние значительно меньшее одного пространственного периода элементов: $T_n \cdot v \ll d$. Чтобы зарегистрировать максимально возможные изменения в кадре, связанные с перемещением наблюдаемого объекта, необходимо выполнение условия $k \gg 1$ (т.е. $\Delta T_k \gg T_k$). В этом случае шумовые составляющие в каждом из сравниваемых кадров можно рассматривать как случайные не коррелированные между собой процессы. Тогда отношение сигнал/шум в разностном сигнале $\mu_{(pc)}$ равно

$$\mu_{(pc)} \approx \mu/\sqrt{2}. \quad (6)$$

В случае быстрых перемещений изображения наблюдаемого объекта, когда $T_n \cdot v \gg d$, фактическое время накопления T'_n , определяющее величину сигнала от подвижного объекта, уменьшается пропорционально скорости $T'_n = d/v$. Тогда величину $T_n / T'_n = T_n \cdot v/d$ можно рассматривать как коэффициент дополнительного уменьшения отношения сигнал/шум при быстрых перемещениях объекта. Таким образом, фактическое отношение сигнал/шум в разностном сигнале при быстрых перемещениях можно оценивать по приближенной формуле

$$\mu_{(pc)} \approx \mu/(\sqrt{2} \cdot T_n \cdot v/d). \quad (7)$$

Дополнительные возможности внутрикадровой обработки

Ниже рассмотрим дополнительные возможности повышения обнаружительной способности АВС, основанные на использовании внутрикадровой пространственной корреляции в анализируемых изображениях.

Обычно изменения, происходящие в кадре в результате перемещения объектов, находящихся в угловом поле телевизионной системы, занимают площадь, в несколько раз большую, чем площадь одного элемента изображения. Таким образом, на этапе обработки МРС представляется возможным использовать алгоритм накопления сигналов по площади области изменений, позволяющий существенно повысить чувствительность автоматизированной системы наблюдения к обнаружению малоконтрастных подвижных объектов при наличии значительных шумов во входном сигнале [1–3]. Указанный алгоритм заключается в следующем.

Площадь кадра разбивается на большое число дискретных участков, каждый из которых анализируется отдельно и является элементарной зоной накопления. Зона накопления представляет собой прямоугольный участок кадра, состоящий из $m \times n$ элементов. Размеры дискретной области накопления нужно выбирать с таким расчетом, чтобы при любых изменениях в кадре, вызванных перемещением объектов, хотя бы одна из дискретных областей накопления была полностью расположена в области изменений (рис. 2).

Обозначим через $P_{лт}(k)$ вероятность ложного обнаружения сигнала об изменениях в k -ой зоне накопления. Тогда вероятность ложной тревоги при анализе сигнала целого кадра можно записать в следующем виде:

$$P_{лт}(T_k) = 1 - \prod_{k=1}^N [1 - P_{лт}(k)], \quad (8)$$

где N – число зон накопления в кадре, равное отношению полного числа элементов изображения к числу элементов элементарной зоны накопления,

$$N = K/(m \times n). \quad (9)$$

Учитывая, что ложные обнаружения в любой из зон равновероятны, выражение (8) можно записать иначе:

$$P_{лт}(T_k) = 1 - [1 - P_{лт}(k)]^N. \quad (10)$$

Величина $P_{лт}(k)$ обычно настолько мала ($P_{лт}(k) \ll 1$), что выражение можно значительно упростить, ограничившись всего одним членом полинома:

$$P_{лт}(T_k) \approx N \cdot P_{лт}(k). \quad (11)$$

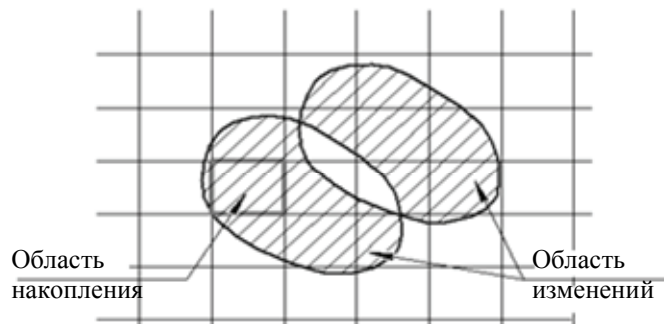


Рис. 2. Выбор размеров дискретной области накопления

Решение об обнаружении подвижного объекта в k -ой зоне накопления принимается в том случае, если число элементов (в пределах данной зоны накопления), в которых межкадровый разностный сигнал по абсолютной величине превышает значение заданного порога, больше или равно p при общем числе $q = m \times n$ элементов ($p \leq q$). Иначе говоря, выполняется условие (3) в не меньшем, чем p , числе элементов в k -ой зоне накопления.

При этом вероятность ложной тревоги в k -той зоне накопления можно вычислить по формуле

$$P_{лт}(k) = \sum_{l=p}^q C_q^l [P_{лт}]^l \cdot [1 - P_{лт}]^{q-l}, \quad (12)$$

где $P_{лт}$ – вероятность выполнения события, описываемого условием (2), т.е. вероятность регистрации выброса шума за установленный порог ограничения, которая может быть рассчитана по формуле (5); C_q^l – число сочетаний из q по l .

Вероятность ошибки второго рода – пропуска объекта – при использовании рассмотренного алгоритма накопления равна

$$P_{проп}^{(H)} = 1 - P_{прав}^{(H)} = \sum_{l=q-p+1}^q C_q^l [P_{проп}]^l \cdot [1 - P_{проп}]^{q-l}, \quad (13)$$

где $P_{проп}$ – вероятность выполнения события, описываемого условием (3) т.е. условная вероятность пропуска сигнала в одном из элементов зоны накопления, которая может быть рассчитана по формуле (6).

На рис. 3 в качестве примера приведен фрагмент характеристик обнаружения, иллюстрирующий зависимость вероятности правильного обнаружения $P_{прав} = 1 - P_{проп}^{(H)}$ от величины $[\mu_{(pc)} - \varepsilon/\sigma_{(pc)}]$, при соотношениях p/q , предопределяющих решающее правило в случае использования алгоритма накопления сигналов по площади области изменений в кадре (см. выше).

Дополнительный эффект повышения надежности АВС с точки зрения улучшения характеристик обнаружения и снижения вероятности ложных тревог может дать многоканальный принцип построения архитектуры системы. При наличии нескольких (например, трех) независимых каналов наблюдения за объектами, различающихся используемым спектральным оптическим диапазоном или какими-либо другими параметрами, вероятности ошибок первого и второго рода могут оцениваться следующим образом:

$$P_{лт} = P_{лт(1)} \cdot P_{лт(2)} \cdot [1 - P_{лт(3)}] + P_{лт(2)} \cdot P_{лт(3)} \cdot [1 - P_{лт(1)}] + P_{лт(1)} \cdot P_{лт(3)} \cdot [1 - P_{лт(2)}] + P_{лт(1)} \cdot P_{лт(2)} \cdot P_{лт(3)}, \quad (14)$$

$$P_{проп} = P_{проп(1)} \cdot P_{проп(2)} \cdot [1 - P_{проп(3)}] + P_{проп(2)} \cdot P_{проп(3)} \cdot [1 - P_{проп(1)}] + P_{проп(1)} \cdot P_{проп(3)} \cdot [1 - P_{проп(2)}] + P_{проп(1)} \cdot P_{проп(2)} \cdot P_{проп(3)}, \quad (15)$$

где $P_{лт(1),(2),(3)}$ и $P_{проп(1),(2),(3)}$ – вероятности ложных обнаружений и пропусков в первом, втором и третьем каналах. Эти выражения соответствуют условию принятия решения об обнаружении объекта по правилу «2 из 3-х», т.е. условию совпадения результатов обнаружения не менее чем в 2-х из 3-х независимых каналах.

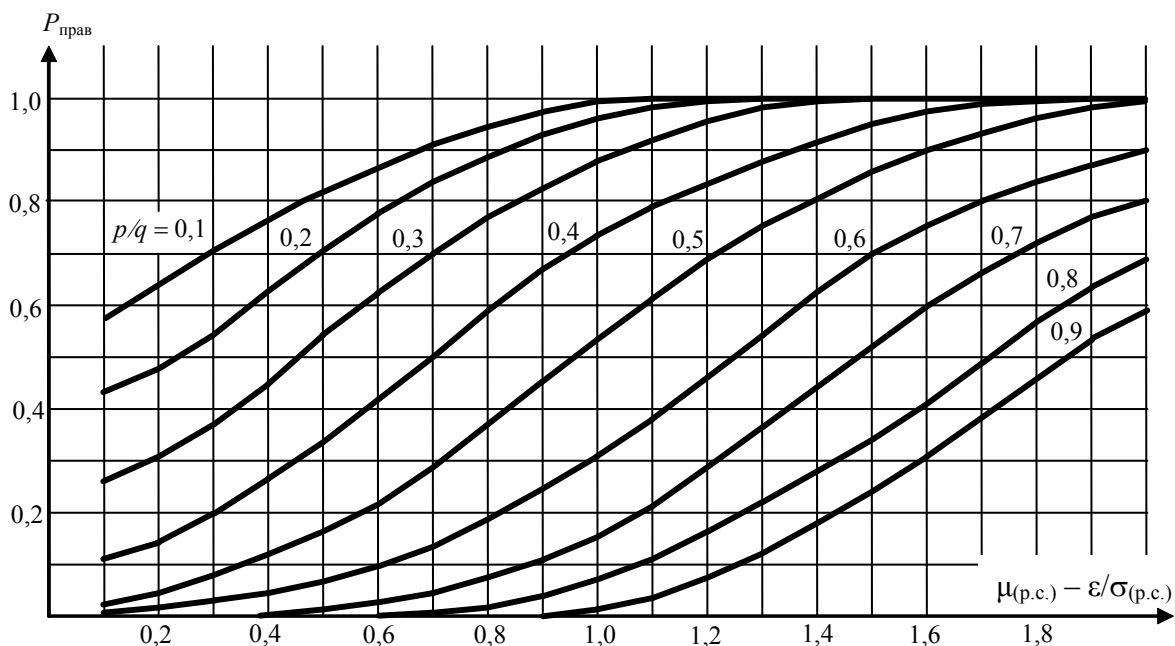


Рис. 3. Фрагмент характеристик обнаружения при различных соотношениях p/q

Заключение

При наличии информации о возможных размерах, диапазоне скоростей, относительном контрасте и других параметрах объектов наблюдения можно, используя выражения (2)–(15), оптимизировать параметры алгоритма обнаружения. Однако, учитывая достаточно сложный характер взаимосвязей множества различных, рассмотренных выше параметров (μ , ε , σ , p , q , N , m , n , v , d , k , T_k и др.), решение подобной задачи может быть с наибольшей эффективностью реализовано путем компьютерного моделирования [4, 5].

Очевидно, что при использовании встроенных вычислительных средств на основе полученных зависимостей возможно создание автоматизированных видеоинформационных систем наблюдения за объектами, обладающих способностью адаптации и самоадаптации к возможным изменениям реальных условий функционирования в режимах обнаружения и последующего слежения за объектами.

Работа проведена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г. по государственному контракту № П695 от 12 августа 2009 г.

Литература

1. Андреев А.Л. Устройство подавления помех. Авт. свид. СССР № 713497 от 5.10.1979 г.
2. Андреев А.Л. Оптико-электронный датчик для автоматического обнаружения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1984. – № 2. – С. 79–85.
3. Андреев А.Л., Ярышев С.Н. Перестраиваемый телевизионный датчик на ПЗС для оптико-электронных систем обнаружения объектов // Изв. вузов СССР. Приборостроение. – 1989. – № 10. – С. 73–76.
4. Андреев А.Л., Тоткайло С.В. Комплексная модель оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Сборник трудов VII Международной конференции «Прикладная оптика-2006». Т. 1. Оптическое приборостроение. – СПб, 2006. – С. 48–52.
5. Андреев А.Л., Лбова Т.П. Разработка структуры комплексной модели оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5(63). – С. 10–15.

Андреев Андрей Леонидович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, and-andr@yandex.ru

Бурдова Наталья Александровна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Bagira_koshara@mail.ru

Коротаев Валерий Викторович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ НА ФОТОМЕТРИЧЕСКУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ

А.С. Шерстобитова

Проведен анализ фотометрических погрешностей измерения коэффициентов отражения для различных конструкций интегрирующей сферы. Выполнен расчет освещенности внутри этих сфер, а также на поверхности образца. Рассмотрены факторы, влияющие на погрешность измерения. Установлено, что освещенность на образце остается практически равномерной для всех рассмотренных конструкций сферы. Основная фотометрическая погрешность связана с различием коэффициентов отражения образцов. Использование экрана не создает дополнительной фотометрической погрешности.

Ключевые слова: фотометрическая погрешность, интегрирующая сфера, освещенность, коэффициент отражения, экран.

Введение

Фотометрическая интегрирующая сфера широко используется для измерений оптических характеристик объектов с диффузным отражением и пропусканием света. В большинстве приборов излучатель и фотоприемник располагаются за пределами полости интегрирующей сферы. Анализ фотометрических погрешностей в подобной конструкции сферы проводился ранее, например в [1]. Для повышения эффективности светоотдачи излучателя целесообразно располагать его внутри фотометрической сферы, а сбор отраженного излучения проводить с помощью оптического волокна. При этом необходимо исключить прямое попадание света от излучателя на образец. Это можно обеспечить установкой непрозрачного экрана. Цель настоящей работы состояла в анализе фотометрических погрешностей измерения коэффициентов отражения света для различных конфигураций интегрирующей сферы.

Расчет освещенности

В анализе рассматривались три специально разработанные конструкции фотометрической сферы, показанные на рис. 1. Первая – традиционного типа с внешним осветителем и фотоприемником – не имела экрана (рис. 1, а). Вторая сфера имела осевую симметрию: экран и излучатель располагались вблизи центра сферы (рис. 1, б). В третьей конфигурации осветитель и экран располагались в плоскости большого круга сферы, волоконный жгут – в центре сферы (рис. 1, в).

Сферы имели сходные оптогеометрические характеристики: диаметр полости 70 мм; диаметр выходного люка 15 мм; коэффициент отражения поверхности сферы 0,97; коэффициент отражения образца 0,7; диаметр входного люка первой сферы 15 мм; диаметр экрана второй сферы 23 мм; размеры третьей сферы 7,5 × 12,5 мм; для второй и третьей сфер диаметр волоконно-оптического коллектора 1 мм, коэффициент отражения экранов 0,97.

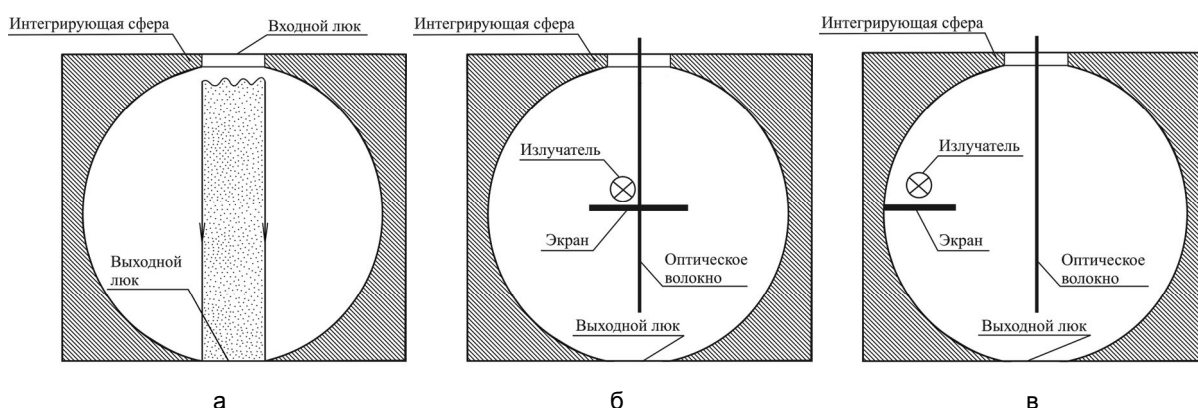


Рис. 1. Конструкции фотометрической интегрирующей сферы: с внешним излучателем (а); с экраном и излучателем вблизи центра (б); с экраном и излучателем в плоскости большого круга (в)

Для анализа фотометрических погрешностей было исследовано распределение освещенности в полости сфер. Предполагалось, что отражение подчиняется закону Ламберта. Освещенность внутри сферы рассчитывалась матричным методом [1–3]. В соответствии с этим методом на внутренней поверхности сферы, а также на поверхностях экрана и образца выделялись кольцевые зоны, которые имели одинаковую освещенность и коэффициент отражения. Обмен излучением между элементами двух зон в точках с координатами Ω_i и Ω_j определялся конфигурационными факторами:

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \frac{\cos(\xi_i) \cdot \cos(\xi_j)}{\pi \cdot \chi^2},$$

где χ – расстояние между точками Ω_i и Ω_j ; ξ_i и ξ_j – углы между направлениями $\Omega_j, \Omega_i, \Omega_i, \Omega_j$ и нормалью к поверхности в точках Ω_i и Ω_j соответственно. Тогда освещенность i -ой зоны можно представить в виде уравнения [1]:

$$E_v(\Omega_i) = E_{v0}(\Omega_i) + \sum_j E_v(\Omega_j) \cdot \rho(\Omega_j) \cdot G(\Omega_i, \Omega_j) \cdot \lambda_j,$$

где E_{v0} – первичная освещенность от источника излучения; $E_v(\Omega_j)$ – освещенность j -зоны; $\rho(\Omega_j)$ – ее коэффициент отражения; λ_j – весовой множитель, определяемый методом интегрирования по поверхности зоны, i и j – индексы зон.

Задача представляется в виде матричного уравнения

$$E_v = (I - M)^{-1} E_{v0},$$

где I – единичная матрица; M – переходная матрица.

Влиянием волоконно-оптического жгута на распределение освещенности в сфере пренебрегалось. Начальная освещенность в сфере принималась за единицу и задавалась в предположении равномерности распределения светового потока на поверхности образца (первая конфигурация сферы) или на верхней поверхности экрана (вторая и третья конфигурации сферы). Поверхности, участвующие в обмене излучением, были разделены на поверхность образца и сферы (первая сфера), поверхность образца, верхнюю и нижнюю части сферы и экрана (вторая и третья сферы). Если обмена излучением между участками не происходило или какие-то зоны перекрывались экраном, то соответствующие конфигурационные факторы считались равными нулю.

Результаты расчетов и экспериментов

На рис. 2 показано вычисленное матричным методом распределение освещенности ($E_v - E_{v0}$) на поверхности сферы и на поверхности образца для трех конфигураций соответственно. Здесь по оси абсцисс приводятся номера колец. На рис. 2, а, видно, что освещенность на стенках сферы и на образце остается равномерной. По рис. 2, б, в, можно заметить, что наибольшую неравномерность освещенности имеет верхняя часть сферы в обеих конструкциях, поскольку на нее падает отраженный от верхней плоскости экрана световой поток. Освещенность же нижней части сферы и поверхности образца остается практически равномерной. Однако сравнение трех конструкций показывает, что с учетом вычета E_{v0} освещенность сферы и образца в конфигурации без экрана в целом ниже, чем освещенности для конфигураций с использованием экрана.

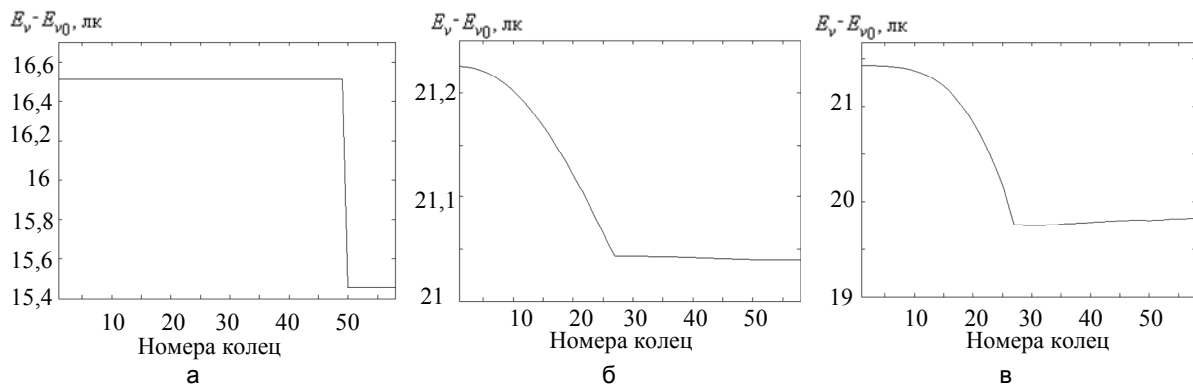


Рис. 2. Расчетные зависимости освещенности от номеров колец: первая сфера (а); вторая сфера (б); третья сфера (в)

При анализе учитывались такие факторы, влияющие на погрешность измерений, как изменение диаметра выходного люка или образца и изменение диаметра экрана. Кроме того, интегрирующая сфера имеет нелинейный отклик освещенности на присутствие образца [4]. Поэтому этот фактор также принимался во внимание.

Размеры экрана варьировались в пределах 10,1–25,5 мм (для третьей сферы ширина экрана оставалась 7,5 мм, изменялась только его длина), а выходного люка – в пределах 11–17 мм. На рис. 3 для каждого кольца показана относительная разность освещенностей второй и третьей интегрирующих сфер с различными размерами экранов при постоянстве других параметров, на рис. 4 показана относительная разность освещенностей трех сфер с различными диаметрами выходных люков, но одинаковыми другими параметрами. Поскольку разница в освещенностях для всех конфигураций интегрирующей сферы

мала, то ни изменение размеров экрана, ни изменение размеров выходного люка или образца не приводят к значительному изменению распределения освещенности.

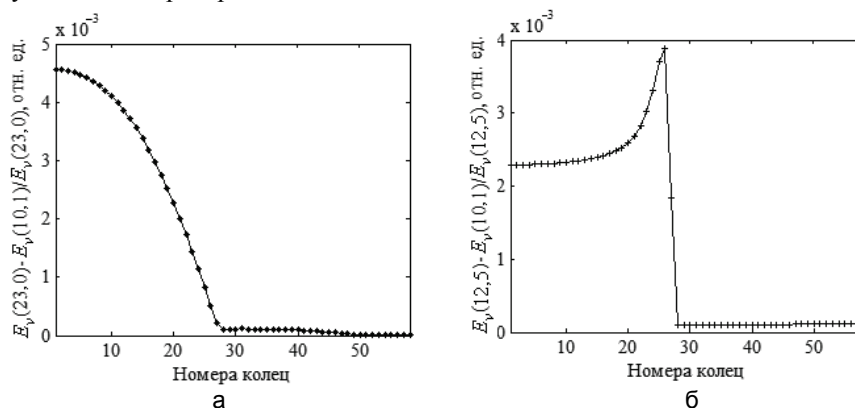


Рис. 3. Зависимости относительной разности освещенностей от номеров колец для различных размеров экранов (23,0 мм и 10,1 мм; 12,5 мм и 10,1 мм): вторая сфера (а); третья сфера (б)

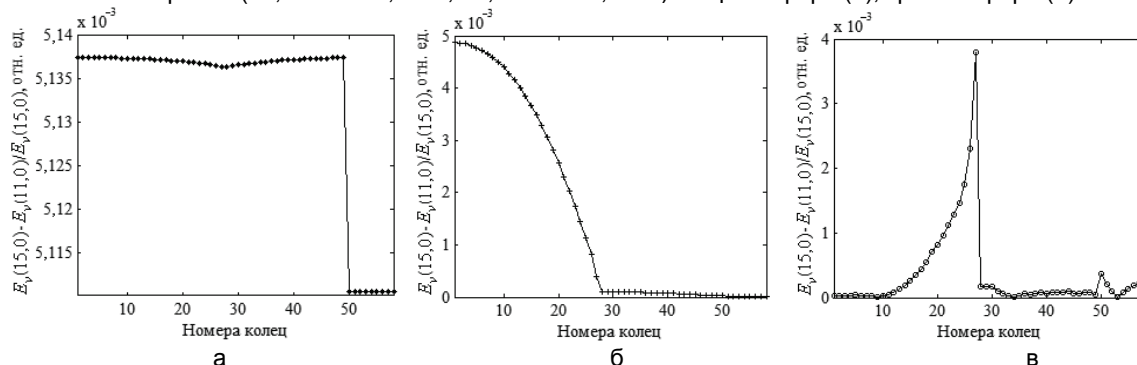


Рис. 4. Зависимости относительной разности освещенностей от номеров колец для различных размеров выходных люков (11,0 мм и 15,0 мм): первая сфера (а); вторая сфера (б); третья сфера (в)

Для проверки влияния на фотометрическую погрешность изменения коэффициентов отражения образцов был выполнен расчет для пяти образцов с коэффициентами отражения в пределах 0,1–1,0. Результаты расчетов показали, что уменьшение коэффициентов отражения образцов приводит к снижению освещенности для всех сфер.

Для экспериментальной проверки расчетных данных использовалось пять образцов с коэффициентами диффузного отражения $\rho = 0,4-0,85$ на длине волны 457 нм, а также эталон МС 22 с коэффициентом отражения $\rho = 0,952$. Измерения проводились в видимом диапазоне длин волн 380–760 нм на лабораторном спектрометре, аналогичном [5], с применением всех трех конструкций интегрирующей сферы. Экспериментальные данные в целом подтвердили результаты расчетов, сходимость результатов измерений находилась на уровне 0,01 для всех исследованных образцов.

На рис. 5 приведены фотометрические погрешности для трех конфигураций интегрирующей сферы в зависимости от коэффициента отражения образца.

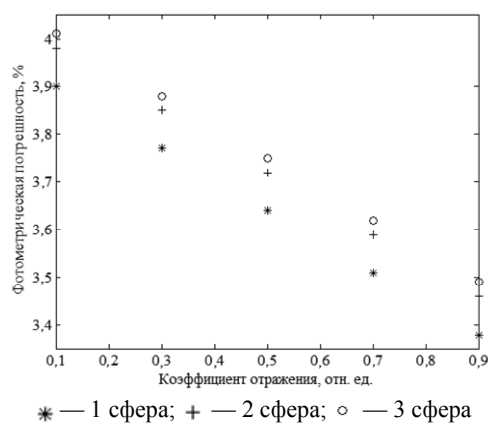


Рис. 5. Зависимости фотометрической погрешности трех конфигураций интегрирующей сферы от коэффициента отражения образца

Основная фотометрическая погрешность обусловлена уменьшением коэффициента отражения образца. Использование экрана во второй и третьей конфигурациях сферы (рис. 1, б, в) как в центре, так и в плоскости большого круга не вносит значительной неравномерности освещенности образца, приводящей к дополнительной фотометрической погрешности. Также неравномерность освещенности в верхней части сферы не влияет на погрешность измерений. Влияние изменения размеров экрана, выходного люка и оптоволоконного коллектора пренебрежимо мало по сравнению с основной фотометрической погрешностью.

Заключение

После проведения расчетов освещенности внутри различных конфигураций интегрирующей сферы и на образце, а также анализа фотометрических погрешностей измерения коэффициентов отражения установлено, что освещенность на образце остается практически равномерной для всех рассмотренных конструкций сферы, а основная фотометрическая погрешность связана с различием коэффициентов отражения образцов. Применение экрана не создает дополнительной фотометрической погрешности.

Литература

1. Tardy H.L. Matrix method for integrating-sphere calculations // Optical Society of America. – 1991. – V. 8. – № 9. – P. 1411–1418.
2. Clare J.F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // Optical Society of America. – 1998. – V. 15. – № 12. – P. 3086–3096.
3. Альтшулер Е.В., Путилин Э.С. Математическая и программная обработка данных спектрофотометрических измерений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 58. – С. 11–16.
4. Prahl S.A. Inverse adding-doubling for optical property measurements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.omlc.ogi.edu/software/iad>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 21.09.2010).
5. Белов Н.П., Яськов А.Д., Грисимов В.Н. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 7. – С. 74–78.

Шерстобитова Александра Сергеевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ashev87@mail.ru

УДК 004.387; 535.417

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАТТЕРНА ЗАДАЧИ НА АДЕКВАТНОСТЬ ГИПОТЕЗ, ПОРОЖДАЕМЫХ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ СО СВЯЗЯМИ ПО СХЕМЕ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

З.С. Бекашева, В.Н. Васильев, А.А. Востриков, А.В. Павлов

В развитие подхода к реализации механизмов творческого мышления на нейросетях со связями, реализуемыми методом голографии Фурье, исследовано влияние размера паттерна внутренней репрезентации условий задачи в связи с его спектральными характеристиками на адекватность порождаемых сетью гипотез. Показано, что адекватность порождаемых гипотез возрастает при увеличении обобщенной частоты паттерна.

Ключевые слова: голография, нейронная сеть, искусственный интеллект, когнитивная система.

Введение

Одна из актуальных задач искусственного интеллекта – реализация механизмов творческого мышления [1]. По мнению ряда исследователей, творческие способности зависят в значительной степени от двух факторов – развитости образного (правополушарного) мышления [1–5] и способности к «погружению в хаос», т.е. переходу к хаотической динамике нейронной активности [6–8].

Один из возможных подходов к реализации образного мышления в искусственных интеллектуальных системах основан на том, что мозг, являясь нейронной сетью (НС), обрабатывает картины нейронной активности, формирующиеся в коре мозга при восприятии сенсорами информации из внешнего мира. Эти картины нейронной активности суть паттерны внутренней репрезентации (ПВР) воспринимаемой информации. В работах [9, 10] был сформулирован подход, согласно которому процесс решения задач может рассматриваться как процедура обработки ПВР, а именно:

- условия встреченной задачи представляются в нейронной сети системой сенсоров и сенсорных трактов в виде ПВР воспринимаемой информации – ПВР условий задачи;
- решение задачи – это ПВР ответа, формируемые в результате обработки сетью ПВР задачи на основе имеющихся знаний, представленных межнейронными связями.

Подход [9, 10] основан на результатах, полученных в когнитивной науке, согласно которым жизнедеятельность организма направлена на восстановление целостности внутренней картины мира, нарушаемой поступающей извне информацией [7]. Соответственно, воспринимаемая информация является субъективно проблемной, т.е. ПВР такой информации рассматривается как ПВР задачи, которую надо решить, если он не соответствует имеющимся знаниям – воспринимается как искаженный или дефектный вариант «правильного» или эталонного образа. Тогда процесс решения задачи представляет собой достройку или восстановление субъективно целостного образа, а ответ задачи – достроенный или исправленный ПВР.

В этих рамках творческая задача (ТЗ) отличается от нетворческой тем, что ПВР ответа не может быть сформирован НС посредством обработки ПВР условий задачи на основе имеющихся знаний методами какого-либо из формальных выводов (дедуктивного, абдуктивного или индуктивного). В этом случае один из возможных методов решения ТЗ предполагает генерацию большого числа образов, несколько отличающихся друг от друга, но принадлежащих одной области фазового пространства сети [6]. Эти образы, не связанные с ПВР условиями задачи и знаниями правил формального вывода, суть творческие гипотезы – варианты ответов на встреченную задачу. «Погружение в хаос», т.е. переход к хаотической динамике нейронной активности, как раз и является методом генерации большого числа новых образов, каждый из которых представляет собой ПВР гипотезы.

В работах [9, 10] обоснована реализуемость этого подхода на НС с двунаправленными связями, формируемыми методом голографии Фурье (рис. 1).

Напомним кратко суть этого подхода.

1. ПВР воспринимаемой информации $\text{Im}_{\text{Per}}(x,y)$ (условия задачи) формируется в слое репрезентаций R , знания (голограмма Фурье эталонного образа) $\text{Im}_R(x,y)$ реализуются в виде матрицы связей нейронных слоев H , а в слое корреляций C формируется функция взаимной корреляции условий задачи и имеющихся знаний.
2. Мерой «проблемности» воспринимаемой информации служит мера сходства ПВР $\text{Im}_{\text{Per}}(x,y)$ с имеющимися знаниями $\text{Im}_R(x,y)$, в качестве которой используется амплитуда глобального максимума корреляционной функции $\text{Im}_{\text{Per}}(x,y) \otimes \text{Im}_R(x,y)$ (ГМКФ). Если ПВР условий задачи не соответствует имеющимся знаниям, то ГМКФ либо отсутствует, либо его амплитуда не превосходит амплитуды боковых максимумов. Ни вспомнить правильный ПВР, ни вывести его не удастся. ПВР ответа можно только придумать (увидеть во сне, например) – это творческая задача. Для того чтобы «придумать»

ПВР ответа, НС переходит в режим хаотической активности, в котором в слое R на каждой итерации $R \rightarrow C \rightarrow R$ генерируется новый образ – творческая гипотеза.

3. Последний этап – верификация порожденных гипотез по критерию адекватности реальности для выбора только одной гипотезы – решения задачи.

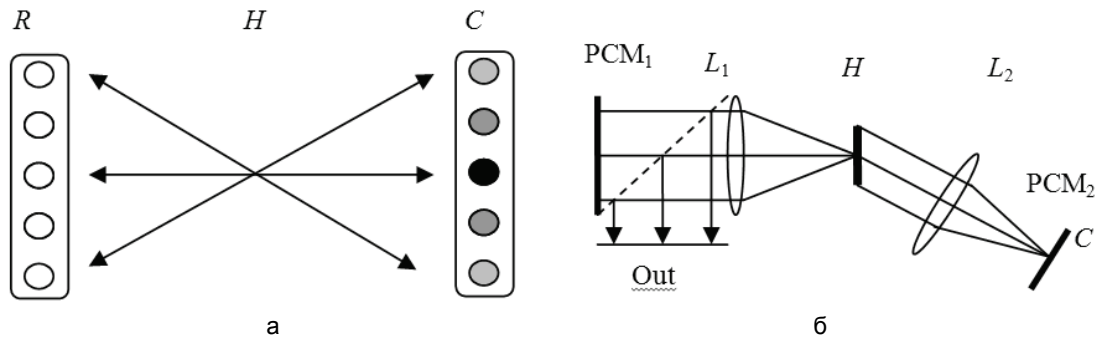


Рис. 1. Схема двухслойной нейронной сети с матрицей двунаправленных связей (а) и ее реализация методом голографии Фурье (б): R – слой репрезентаций; C – слой корреляций; L_1 и L_2 – Фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями f ; H – матрица межнейронных связей (голограмма); PCM_1 и PCM_2 – фазосопрягающие зеркала во входной и корреляционной плоскостях

В [11] выделено два аспекта проблемы адекватности:

- адекватность ПВР условий задачи реальности, обусловленная свойствами сенсора и сенсорного тракта;
- адекватность ПВР гипотезы условиям задачи, обусловленная свойствами НС.

В работе [11] рассмотрен второй аспект проблемы адекватности в части влияния фильтрации, возникающей в схеме рис. 1, б, вследствие ограниченности динамического диапазона регистрирующих сред, на статистические характеристики гипотезы. В настоящей работе, в развитие [9–11], исследовано влияние ограниченности области существования (размера) ПВР условий задачи на характеристики ПВР гипотезы.

Механизм формирования гипотез

Свойства ПВР гипотез, порождаемых в режиме хаотической динамики, определяются тем, что в НС (рис. 1) связи нейронных слоев R и C , представляющие имеющиеся знания, формируется в виде голограммы Фурье

$$H_{R \rightarrow C}(v_x, v_y) = F^*(\text{Im}_R(x, y)),$$

где (v_x, v_y) – пространственные частоты; астериск (*) обозначает комплексное сопряжение; F – символ преобразования Фурье. Голограмма Фурье удовлетворяет определению знаний [2]. При предъявлении в слое R ПВР условий задачи $\text{Im}_{Per}(x, y)$ в слое C формируется функция корреляции $\text{Im}_{Per}(x, y)$ и эталонного ПВР (знаний) $\text{Im}_R(x, y)$

$$C(\zeta, \eta) = \text{Im}_{Per}(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y) = F(F(\text{Im}_{Per}(x, y))F^*(\text{Im}_R(x, y))),$$

где ζ, η – координаты в слое C . На этапе обратного прохождения возбуждения $C \rightarrow H \rightarrow R$ используется матрица связей, реализуемая посредством инверсной голограммы

$$H^{-1}(v_x, v_y) = \left(\frac{1}{F^*(\text{Im}_R(x, y))} \right),$$

тогда, в предположении линейности активационных функций нейронов в слое C (C -нейронов), картина нейронной активности в слое R в области вокруг исходного ПВР $\text{Im}_R(x, y)$, восстановленная в итерации $R \rightarrow H \rightarrow C \rightarrow H^{-1} \rightarrow R$, описывается выражением

$$\text{Im}(x_k, y_l) = F \left(\frac{F(C(x_k + \zeta, y_l + \eta))}{F^*(\text{Im}_R(x, y))} \right), \tag{1}$$

где (x_k, y_l) – координаты в плоскости R вне области существования $\text{Im}_R(x, y)$ (т.е. в области ореола). Выражение (1) может быть приведено [12, 13] к развитой в теории случайных процессов модели линейного предсказателя [14, 15]. Если ПВР $\text{Im}(x, y)$ описывается как реализация однородного случайного поля, то (1) дает наилучшую по критерию минимума среднего квадрата ошибки оценку линейного прогноза.

Для перехода к режиму хаотической динамики по сценарию Фейгенбаума активационные функции C -нейронов должны иметь соответствующую нелинейность Nl [16], тогда для итерации N выражение (1) примет вид

$$\text{Im}_N(x_k, y_l) = F \left(\frac{F(Nl(C_{N-1}(x_k + \zeta, y_l + \eta)))}{F^*(\text{Im}_R(x, y))} \right).$$

Это выражение описывает ПВР гипотезы, порождаемой сетью на N -ой итерации.

Ограниченность области существования ПВР $\text{Im}_R(x, y)$ влияет на характеристики автокорреляционной функции (АКФ) и, тем самым, на характеристики ПВР порождаемой гипотезы.

Для упрощения дальнейших выкладок примем допущение о разделимости переменных при описании ПВР и соответственно используем термины «процесс» вместо «поле» и «стационарность» вместо «однородность».

Влияние ограниченности паттерна условий задачи на адекватность гипотезы

Для большей наглядности начнем анализ с предположения, что ПВР задачи представляет собой гармонику ограниченной длины. Тогда в слое R (без учета нелинейности в слое C) одна гармоника при использовании корреляционной функции (КФ) бесконечного процесса (т.е. теоретической КФ) экстраполируется линейным предсказателем с нулевой ошибкой.

Однако, поскольку корреляционная функция строится на основе ограниченной реализации (измеренная КФ) и, следовательно, КФ имеет линейно зависимый от длины реализации дополнительный спад к краям, то возникает ошибка экстраполяции.

Если предсказание на максимальную глубину x_{\max} строится по реализации длиной L , которую будем называть базой предсказания, то для реализации модели [14, 15] необходима АКФ, имеющая размер области определения (длину) $2(L+x_{\max})$.

Предсказание по измеренной АКФ длиной $2(L+x_{\max})$:

$$\begin{aligned} \text{Im}(x) &= \frac{1}{L} \int_x^{L+x} A^3 \cos(\omega_0 \zeta) \left(1 - \frac{\zeta}{L+x_{\max}}\right) \sin(\omega_0(L+x-\zeta)) d\zeta + \\ &+ \frac{1}{L} \int_x^{L+x} A^3 \frac{\sin(\omega_0 \zeta) - \sin(\omega_0(2L-\zeta))}{2\omega_0(L+x_{\max})} \sin(\omega_0(L+x-\zeta)) d\zeta = \\ &= \left(A^3 \sin(\omega_0(L+x)) \left(\frac{1}{2} - \frac{((L+x)^2 - x^2)}{4L(L+x_{\max})} \right) \right) + \frac{1}{L(L+x_{\max})} \frac{A^3 \cos(\omega_0(x+L))(-x+x_{\max}-L)}{4\omega_0} + \\ &+ \frac{1}{L(L+x_{\max})} \left(\frac{A^3 \cos(\omega_0(x-L))(x-x_{\max}-2L)}{4\omega_0} - A^3 \frac{\sin(\omega_0(x-L)) + \sin(\omega_0(3L-x))}{8\omega_0^2} \right). \end{aligned}$$

Первые два слагаемых описывают спад предсказания к краям, остальные слагаемые имеют меньшую амплитуду и характеризуют набег фазы, появляющийся также вследствие ограниченности реализации. Их амплитуды малы по сравнению с двумя первыми слагаемыми и равны $\frac{1}{4\pi K}$, $\frac{1}{2\pi K}$ и $\frac{1}{4\pi^2 K^2}$

соответственно, где $K = \frac{L}{T_0}$ – отношение длины паттерна к периоду гармоники (так называемая норми-

рованная частота). При достаточно большом K , в зависимости от требуемой точности, этими слагаемыми можно пренебречь (рис. 2). Ошибка в таком случае зависит от глубины предсказания и от длины реализации. Таким образом, при большой величине нормированной частоты K ошибка предсказания одной гармоники описывается выражением

$$\text{Err}(x) = \left(\sin(\omega_0 x) - \frac{\sin(\omega_0(L+x))}{4(L+x_{\max})L} \left(L^2 + 2L(x_{\max} - x) \right) \right).$$

Для компенсации этой ошибки при большой величине нормированной частоты можно ввести в корреляционной плоскости фильтр с пропусканием, обратным спаду, который описывается следующей функцией (рис. 3):

$$F_{fil}(\zeta) = \begin{cases} 1, & \zeta \geq (L+x_{\max}); \\ \frac{1}{1 - \frac{\zeta}{L+x_{\max}}}, & \zeta < (L+x_{\max}). \end{cases}$$

В результате такой фильтрации АКФ на интервале $(L+x_{\max})$ становится пропорциональной теоретической АКФ. В этом случае ошибка предсказания будет состоять только из слагаемых, описывающих набег фаз.

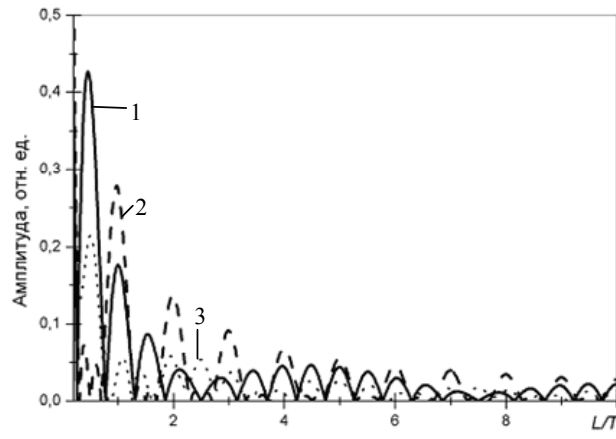


Рис. 2. Зависимости амплитуды слагаемых, характеризующих набег фазы, от нормированной частоты при различной глубине предсказания $\frac{\zeta}{L}$ и максимальной глубине предсказания $\frac{\zeta_{max}}{L}$

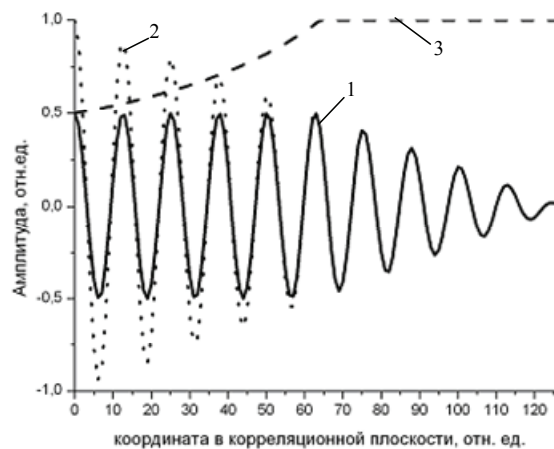


Рис. 3. Автокорреляционные функции и фильтр в корреляционной плоскости: 1 – АКФ до фильтрации; 2 – фильтр, обратно пропорциональный спаду АКФ; 3 – АКФ после фильтрации

Для ПВР со сложным спектральным составом казалось бы логичным просуммировать результаты экстраполяции отдельных гармоник. Однако ограниченность реализации обуславливает появление кросс-корреляции между гармониками, что ведет к уменьшению радиуса корреляции. Этот фактор не учитывается при суммировании результатов экстраполяции отдельных гармоник. Рассмотрим реализацию процесса, состоящего из двух гармоник. АКФ такой ограниченной реализации описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 C(\zeta) &= \frac{1}{L} \int_0^{L-\zeta} \left(\sum_{i=0}^n (A_i \sin(\omega_i x)) \right) \left(\sum_{i=0}^n (A_i \sin(\omega_i (x + \zeta))) \right) dx = \\
 &= \frac{\sum_{i=0}^n \left(A_i^2 \cos(\omega_i \zeta) \left(1 - \frac{\zeta}{L} \right) - \frac{A_i^2 (\sin(\omega_i (2L - \zeta)) - \sin(\omega_i \zeta))}{2\omega_i} \right)}{2} + \\
 &+ \sum_{i \neq j}^n \frac{2A_i A_j \cos\left(\zeta \frac{(\omega_i + \omega_j)}{2}\right) \left(\sin\left(L(\omega_j - \omega_i) + \zeta \frac{(\omega_j - \omega_i)}{2}\right) - \sin\left(\zeta \frac{(\omega_j - \omega_i)}{2}\right) \right)}{2L(\omega_j - \omega_i)} \\
 &- \sum_{i \neq j}^n \frac{2A_i A_j \cos\left(\zeta \frac{(\omega_i - \omega_j)}{2}\right) \left(\sin\left(L(\omega_j + \omega_i) + \zeta \frac{(\omega_j + \omega_i)}{2}\right) - \sin\left(\zeta \frac{(\omega_j + \omega_i)}{2}\right) \right)}{2L(\omega_j + \omega_i)}.
 \end{aligned}$$

Первое слагаемое – это сумма АКФ каждой из гармоник, а два последних – сумма их кросс-корреляций. Чем больше разность этих частот, тем меньше их кросс-корреляция и, следовательно, тем ближе АКФ реализации к сумме АКФ гармоник. Если же частоты кратные ($\omega_1=N\omega_0$, где N – целое), то кросс-корреляция равна нулю, и АКФ суммы гармоник равна сумме АКФ каждой гармоники.

Таким образом, для ПВР условий задачи с дискретным спектром, частоты которого далеко отстоят друг от друга, ПВР гипотезы можно построить с достаточно малой ошибкой. Для иллюстрации на рис. 4 представлена зависимость ошибки экстраполяции, которая возникает вследствие кросс-корреляции двух гармоник, от координаты в корреляционной плоскости для трех случаев соотношения частот гармоник: 1) $\omega_1=5, \omega_2=3$; 2) $\omega_1=16, \omega_2=3$; 3) $\omega_1=6, \omega_2=3$.

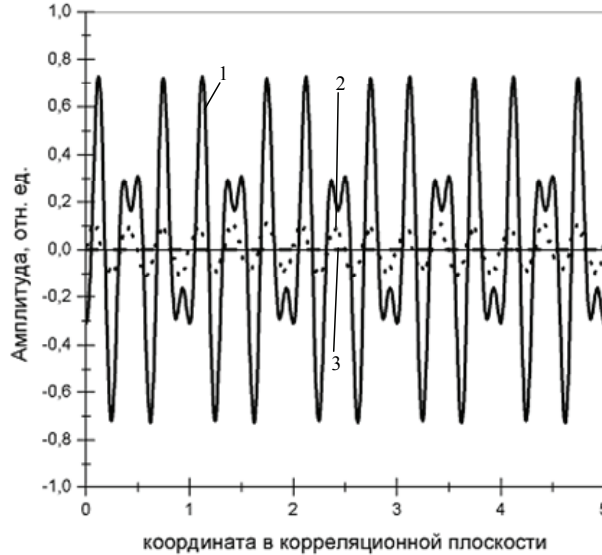


Рис. 4. Кросс-корреляционные слагаемые корреляционной функции паттерна из двух гармоник при разных частотах гармоник

В [11] было показано, что при малых L вследствие малых значений обобщенной частоты (отношения длины реализации к радиусу корреляции) статистические характеристики паттерна не соответствуют требованиям модели линейного предсказателя на стационарность реализации, и поэтому далее случай малых значений L и малых нормированных частот $K = \frac{L}{T_0}$ рассматриваться не будет. Тогда АКФ (2) будет состоять из слагаемых, которые описывают АКФ каждой гармоники. ПВР построенной гипотезы, соответственно, можно приближенно описать выражением, в котором, учитывая громоздкость точного выражения, авторы работы, основываясь на результатах, приведенных на рис. 2, пренебрегли членами высшего порядка малости, начиная с членов с множителями $\frac{1}{L}$ перед амплитудой:

$$\begin{aligned} \text{Im}(x) &= \frac{1}{L} \int_x^{L+x} \frac{A_1^2 \cos(\omega_0 \zeta) ((L+x_{\max} - \zeta))}{2(L+x_{\max})} (A_1 \sin(\omega_0(L+x-\zeta)) + A_2 \sin(\omega_1(L+x-\zeta))) d\zeta + \\ &+ \frac{1}{L} \int_x^{L+x} \frac{A_2^2 \cos(\omega_1 \zeta) ((L+x_{\max} - \zeta))}{2(L+x_{\max})} (A_1 \sin(\omega_0(L+x-\zeta)) + A_2 \sin(\omega_1(L+x-\zeta))) d\zeta \approx \\ &\approx \frac{1}{8} \left(A_1^3 \sin(\omega_0(L+x)) \left(2 - \frac{(L+x)^2 - x^2}{(L+x_{\max})L} \right) + A_2^3 \sin(\omega_1(L+x)) \left(2 - \frac{(L+x)^2 - x^2}{(L+x_{\max})L} \right) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь первые два слагаемых описывают идеальное, в соответствии с моделью линейного предсказателя, построение ПВР гипотезы, а два последних – ошибку, обусловленную спадом АКФ. Заметим также, что в формуле отсутствуют слагаемые кросс-корреляции гармоник, поскольку при больших значениях нормированной частоты (больших значениях L) кросс-корреляция (2) между гармониками незначительна.

Из сравнения выражения (3) с выражением, даваемым моделью линейного предсказателя, следует, что ошибка построения ПВР гипотезы из двух гармоник описывается следующим выражением, также приближенным в предположении достаточно больших L :

$$Err(x) \approx \frac{1}{8} \left(A_1^3 \sin(\omega_0(L+x)) \left(6 + \frac{(L+x)^2 - x^2}{(L+x_{\max})L} \right) + A_2^3 \sin(\omega_1(L+x)) \left(6 + \frac{(L+x)^2 - x^2}{(L+x_{\max})L} \right) \right).$$

В данное выражение входят слагаемые, описывающие спад к краям амплитуд ПВР гипотезы по мере увеличения глубины предсказания, зависящий от размера ПВР задачи. Ошибка имеет вид суммы двух гармоник с амплитудой, возрастающей по мере увеличения глубины предсказания. Следовательно, ограниченность ПВР условий задачи обуславливает появление ошибки ПВР гипотезы относительно ПВР, даваемого моделью линейного предсказателя, которая уменьшается с ростом нормированной частоты, т.е. с увеличением размера ПВР условий задачи.

Поскольку вследствие ограниченности полосы пропускания тракта ввода и динамического диапазона регистрирующих сред спектр ПВР задачи всегда занимает ограниченную спектральную область, то в первом приближении можно ограничиться рассмотрением только нижней и верхней граничных нормированных частот, от значений которых и зависит точность экстраполяции. Если граничные частоты в силу плавного спада спектра определить затруднительно, то более точную оценку позволяет получить использование не нормированных граничных частот, а обобщенной частоты.

Заключение

Таким образом, на адекватность условию задачи гипотезы, порождаемой нейронной сетью со связями по схеме голографии Фурье, влияет ограниченность размера области существования паттерна условий задачи. Этот фактор влечет дополнительный спад и набег фазы автокорреляционной функции паттерна относительно теоретической автокорреляционной функции случайного поля, используемого для описания паттерна. Это, в свою очередь, ведет к ошибке формирования гипотезы относительно даваемого моделью линейного предсказателя. Эта ошибка уменьшается с ростом обобщенной частоты паттерна условий задачи. Данная зависимость универсальна в том смысле, что малая длина ПВР условий задачи обуславливает ошибку не только вследствие спада АКФ, но и, как было показано в [11], вследствие изменения стационарности исходного ПВР.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-01-00165-а и 09-02-00223-а) и ФЦП № 02.740.11.0390.

Литература

1. Фоминых И.Б. О технологии решения творческих задач // Сб. трудов VIII Национальной конференции по искусственному интеллекту «КИИ-2002». – М.: Физматлит, 2002. – Т. 1. – С. 519–525.
2. Кузнецов О.П. Неклассические парадигмы в ИИ // Известия АН. Сер. Теория и системы управления. – 1995. – № 5. – С. 3–23.
3. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. Нейронные сети и экспертные системы: перспективы интеграции // Новости искусственного интеллекта. – 1996. – № 4. – С. 121–145.
4. Семинар «Отражение образного мышления и интуиции специалиста в системах искусственного интеллекта» // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 1. – С. 22–136; 1998. – № 3. – С. 64–100.
5. Леутин В.П., Николаева Е.И. Функциональная асимметрия мозга. Мифы и реальность. – СПб: Речь, 2005. – 368 с.
6. Фриман У.Дж. Динамика мозга в восприятии и сознании: творческая роль хаоса // В сб. «Синергетика и психология». Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 13–28.
7. Князева Е.Н. Методы нелинейной динамики в когнитивной науке // В сб. «Синергетика и психология». Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 29–48.
8. Комбс А. Сознание: Хаотическое и странно-аттракторное // В сб. «Синергетика и психология». Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 49–60.
9. Павлов А.В. О применимости голографических технологий в задаче моделирования творческого мышления // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Коломна, 28–30 мая 2007. – М.: Физматлит, 2007. – С. 282–290.
10. Павлов А.В. О возможности моделирования творческого мышления методом голографии Фурье // Труды XI Национальной конференции по искусственному интеллекту. – М.: URSS, 2008. – Т. 1. – С. 384–392.
11. Бекашева З.С., Васильев В.Н., Павлов А.В. Статистические свойства гипотез, порождаемых нейронной сетью со связями по схеме голографии Фурье // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6(70). – С. 17–21.
12. Павлов А.В. Возможности ассоциативной обработки информации, реализуемые методом Фурье-голографии // Новости искусственного интеллекта. – 2006. – № 2. – С. 41–56.
13. Павлов А.В. О применимости модели линейной регрессии к описанию Фурье-голографии // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 98. – № 6. – С. 1033–1037.

14. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Известия АН СССР. Сер. мат. – 1941. – № 5. – С. 3–14.
15. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. – М.: Наука, 1975. – 320 с.
16. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

<i>Бекяшева Зоя Салаватовна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, zoya.bekyasheva@phoi.ifmo.ru
<i>Васильев Владимир Николаевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ректор, vasilev@mail.ifmo.ru
<i>Востриков Алексей Алексеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, lehav@inbox.ru
<i>Павлов Александр Владимирович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, pavlov@phoi.ifmo.ru

УДК 681.7.063

СОЗДАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ БРЭГГОВСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО НАНОСЕКУНДНОГО ЭКСИМЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

В.С. Брунов, С.В. Варжель, Н.В. Никоноров, В.Е. Стригалева

Описывается метод создания голографических брэгговских решеток в кристаллах ниобата лития в результате импульсного облучения эксимерного лазера, рассматриваются возможности записи решеток в различных режимах. Проводятся исследования зависимости основных параметров получаемых фазовых голографических элементов от мощности и количества импульсов.

Ключевые слова: брэгговские решетки, ниобат лития, фоторефрактивные материалы, фазовые голографические решетки.

Введение

Одним из наиболее перспективных материалов для создания брэгговских дифракционных структур является кристалл ниобата лития, так как сильно выраженные электрооптические, пьезооптические и нелинейно-оптические свойства кристалла могут быть использованы для их управления и перестройки [1]. В современной интегральной оптике дифракционные решетки, сформированные в этих кристаллах, активно используются в качестве перестраиваемых и фиксированных узкополосных оптических фильтров [2, 3] и интегрально-оптических частотных модуляторов [4]. В последнее время большой интерес связан с исследованиями модификации оптических свойств материалов при импульсном облучении лазерным излучением и возможностью использования лазерных импульсов для изготовления интегрально-оптических устройств. Особый интерес представляет запись дифракционных решеток в кристалле ниобата лития с волновым вектором, направленным поперек оси поляризации, что позволяет эффективно управлять такой решеткой за счет электрооптического эффекта.

Следует отметить, что технология получения дифракционных решеток в ниобате лития при импульсном облучении эксимерным лазером до сих пор недостаточно полно изучена. Используя разные режимы записи (варьируя энергию в импульсе, длительность и количество импульсов, длину волны лазерного излучения и т.д.) можно получать разнообразные характеристики решеток. В связи с этим целью данной работы является исследование процесса создания голографических брэгговских решеток в кристаллах ниобата лития, изучение влияния различных режимов записи на спектральные и голографические характеристики получаемых решеток, а также определение оптимальных условий их записи.

Запись брэгговских решеток

При облучении фоторефрактивного кристалла мощным излучением (в области его поглощения) в участках максимальной интенсивности свободные электроны кристаллической решетки поглощают энергию фотонов, и происходит перераспределение зарядов. Оно приводит к образованию локального электрического поля, которое благодаря электрооптическому эффекту вызывает локальное изменение показателя преломления [5]. Таким образом, записанная в кристалле интерференционная картина синусоидального распределения интенсивности, полученная вследствие интерференции двух падающих на образец когерентных пучков, будет представлять собой фазовую голографическую брэгговскую решетку с наведенным изменением показателя преломления. Схема записи решеток показана на рис. 1.

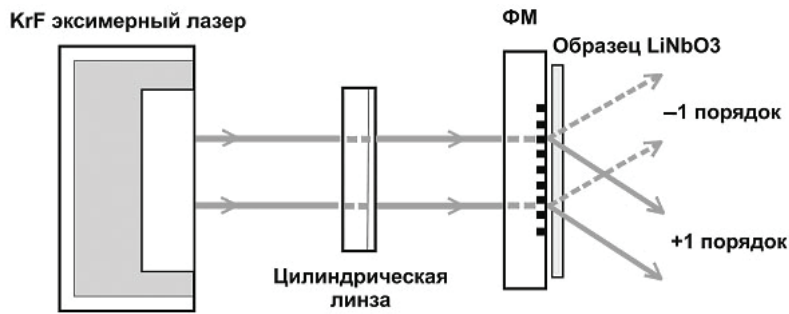


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для записи брэгговских решеток

Лазерный импульс KrF эксимерного лазера длительностью 20 нс, проходя через фазовую маску (ФМ), оптимизированную для длины волны 248 нм с подавлением нулевого порядка (< 3%), дифрагирует на +1 и -1 порядки [6, 7]. Эффективность каждого – около 37% от падающего излучения. Эти дифрагированные пучки, падая под определенным углом на образец кристалла ниобата лития, при достаточной когерентности лазерного импульса создают оптическую неоднородность в материале в виде фазовой дифракционной решетки с переменным показателем преломления. Для достижения большей плотности энергии в пучке использовалась цилиндрическая линза, которая сводила пучок по одной из осей. Записанные решетки подчиняются закону Брэгга:

$$2 \cdot d \cdot \sin(\Theta) = n \cdot \lambda_{\text{Бр}}, \quad (1)$$

где d – период решетки; Θ – угол падения лучей +1 и -1 порядков; n – порядок дифракции; $\lambda_{\text{Бр}}$ – брэгговская длина волны.

Измерение параметров записанных решеток

В работе измерения проводились с использованием He-Ne лазера на длине волны 633 нм (рис. 2). Исследуемый образец с решеткой находился на поворотном столике, управляемом с компьютера и обеспечивающем шаг поворота 10^{-5} рад.

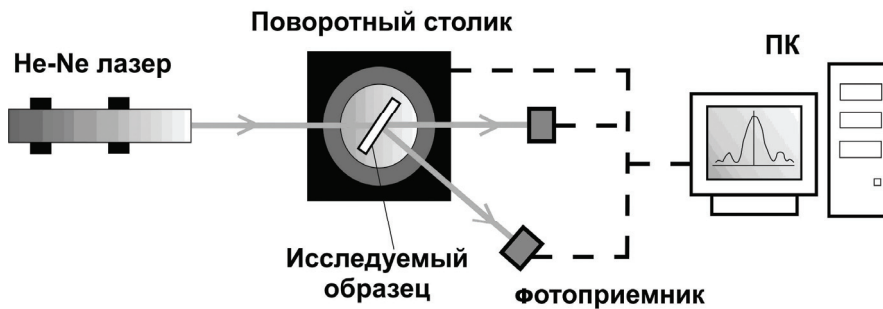


Рис. 2. Схема установки для тестирования брэгговских решеток

Измерение зависимости интенсивности прошедшего и дифрагированного пучка с последовательным изменением угла поворота столика позволяет построить контур угловой селективности решетки и определить дифракционную эффективность решеток, их глубину и величину амплитуды модуляции наведенного показателя преломления.

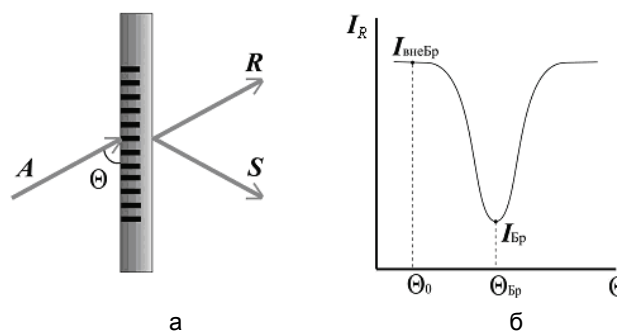


Рис. 3. Схема дифракции лучей на фазовой голографической решетке (а); зависимость интенсивности проходящего пучка от угла падения (б)

При анализе дифракции на объемных решетках необходимо учитывать, что каждый луч последовательно рассеивается от большого числа периодически расположенных поверхностей. На рис. 3, а, показана схема дифракции лучей на фазовой голографической решетке: A – падающая волна; S – дифрагированная; R – прошедшая. Для того чтобы амплитуда результирующей дифрагированной волны S была максимальной, волны, рассеянные последовательными слоями, должны быть синфазными. Для этого необходимо выполнить определенное соотношение между длиной волны света λ , углом падения Θ и периодом решетки d . Это соотношение представляет собой закон Брэгга (1). При отступлении от условий Брэгга интенсивность дифрагированной волны падает и определяется спектрально-угловой селективностью данной голографической решетки. Дифракционная эффективность η первого порядка дифракции определялась из контура, прошедшего через решетку пучка R вблизи выполнения условий Брэгга, по формуле

$$\eta = \frac{I_{\text{вне Бр}} - I_{\text{Бр}}}{I_{\text{вне Бр}}},$$

где $I_{\text{Бр}}$ – значение интенсивности проходящего через решетку пучка R при выполнении условий Брэгга; $I_{\text{вне Бр}}$ – значение интенсивности проходящего пучка R при выходе за пределы выполнения условий Брэгга. На рис. 3, б, продемонстрирована зависимость интенсивности проходящего пучка R от угла падения Θ .

Спектры ослабления голографических элементов

В исследовании спектральных характеристик полученных голографических элементов были получены зависимости величины ослабления сигнала от длины волны при разном количестве и разной мощности импульсов. Спектры ослабления измерялись на спектрофотомере в диапазоне 200–1700 нм с шагом 1 нм (рис. 4, 5).

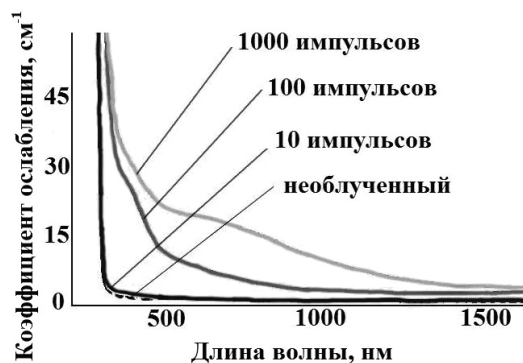


Рис. 4. Зависимость коэффициента ослабления от длины волны при разном количестве импульсов

Из спектра ослабления (рис. 4) видно, что поглощение в слое монотонно растет с увеличением числа импульсов и при больших количествах (100, 1000 импульсов) становится критическим.

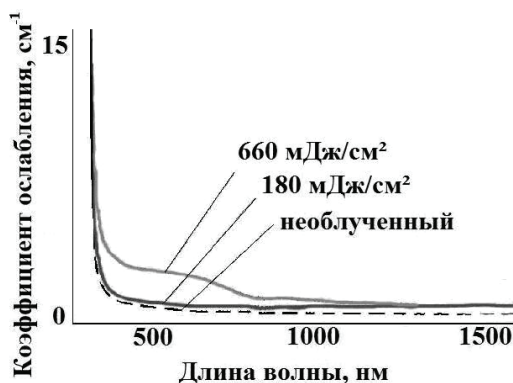


Рис. 5. Зависимость коэффициента ослабления от длины волны при разной мощности импульсов

Также небольшой рост поглощения наблюдается и при увеличении мощности импульса (рис. 5).

Результаты

На рис. 6 показаны фотографии записанных микроструктур.

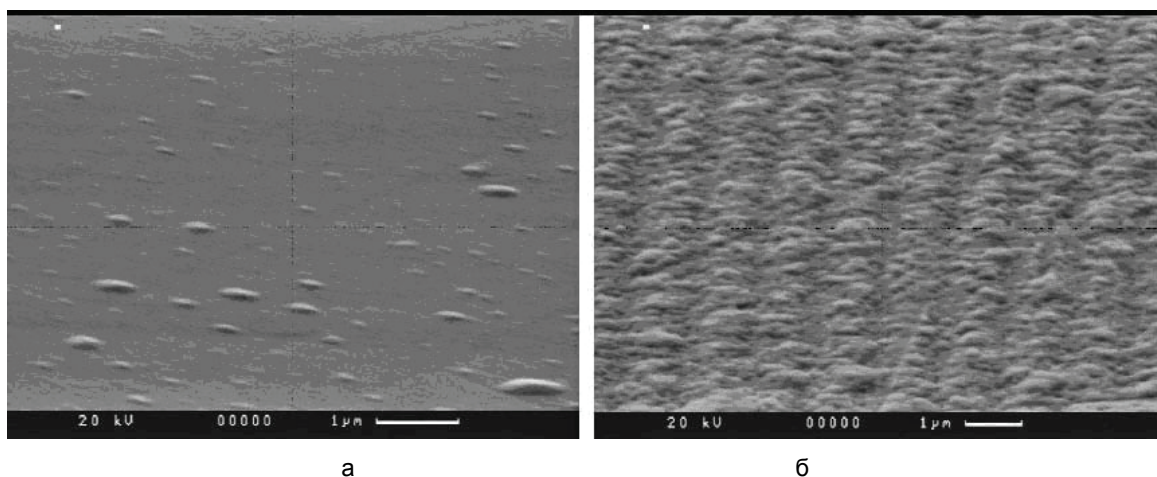


Рис. 6. Фотографии записанных микроструктур: решетка с изменением показателя преломления (а); решетка с поверхностным рельефом (б)

Снимок на рис. 6, а, свидетельствует о том, что в данной решетке после облучения мощным эксимерным лазером произошло изменение показателя преломления, связанное с фоторефрактивными свойствами ниобата лития. При увеличении мощности и количества импульсов в образце происходит модификация поверхности вследствие выжигания материала в зонах максимальной интенсивности. Такая структура имеет вид периодической поверхностной решетки с ярко выраженным рельефным характером (рис. 6, б).

Измерение дифракционной эффективности η , толщины полученной голограммы T и величины модуляции показателя преломления Δn проводилось для решеток, не имеющих критического поглощения в рабочих длинах волн. Результаты измерений сведены в таблицу.

Количество импульсов	180 мДж/см ²	660 мДж/см ²
1	$\eta = 0,5\%$; $T = 4$ мкм; $\Delta n = 1,9 \times 10^{-3}$	$\eta = 1,55\%$; $T = 7$ мкм; $\Delta n = 3,37 \times 10^{-3}$
10	$\eta = 0,8\%$; $T = 5$ мкм; $\Delta n = 2,46 \times 10^{-3}$	*
100	–	–
1000	–	–

* – Высокое поглощение

Таблица. Результаты измерений

По результатам измерений получаем, что решетки с максимальной дифракционной эффективностью и наиболее пригодные к использованию соответствуют двум различным режимам записи – одноимпульсному с плотностью энергии 660 мДж/см² и многоимпульсному (10 импульсов с плотностью энергии 180 мДж/см² в импульсе). Остальные режимы с большим количеством импульсов и плотностью энергии ведут к разрушению материала (превышению порога абляции) и, как следствие, к большому поглощению во всем диапазоне длин волн.

Заключение

Получены брэгговские дифракционные структуры в кристалле ниобата лития в одноимпульсном и многоимпульсном режиме записи наносекундным КгF эксимерным лазером, обладающие большим динамическим диапазоном модуляции показателя преломления ($\Delta n \sim 3 \times 10^{-3}$) и дифракционной эффективностью $\sim 1,5\%$. Определены оптимальные режимы записи на длине волны 248 нм. Исследовано влияние плотности энергии и количества импульсов на характеристики записанных решеток.

Авторы выражают благодарность А.В. Шамраю, заведующему лабораторией квантовой электроники Физико-технического института им. Иоффе РАН, за предоставленные образцы кристалла ниобата лития и полезные обсуждения в ходе выполнения настоящей работы.

Литература

1. Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 49. – С. 42–53.
2. Pierno L., Dispenza M., Secchi A. A lithium niobate electro-optic tunable Bragg filter fabricated by electron beam lithography // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2008. – V. 10. – № 6. – P. 1–6.
3. Shamray A.V., Ilichev I.V., Kozlov A.S. Controllable Holographic Optical Filters in Photorefractive Crystals // Journal of Holography and Speckle. – 2009. – № 5. – P. 1–10.
4. Ryoung-Han Kim. Design and fabrication of highly efficient electrooptic modulators using Bragg gratings reflectors / Ph.D. dissertation. – Texas A&M University, 2005. – 140 p.
5. Sones C., Valdivia C., Scott J. Ultraviolet laser induced sub-micron periodic domain formation in congruent undoped lithium niobate crystals // Appl. Phys. B. – 2005. – V. 80. – P. 341–344.
6. Luo G.P., Lu Y.L., Ming N.B. LiNbO₃ phase gratings prepared by a single excimer pulse through a silica phase mask // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 69. – P. 1352–1354.
7. Luo Guipeng, Wu Haiming. Periodic surface structures fabricated by one excimer laser pulse through a silica phase mask grating // Chinese Science Bulletin. – 1997. – V. 42. – 1997. – P. 1787–1792.

- | | |
|---------------------------------------|---|
| <i>Брунов Вячеслав Сергеевич</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, brunov@oi.ifmo.ru |
| <i>Варжель Сергей Владимирович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com |
| <i>Никонов Николай Валентинович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, nikonov@oi.ifmo.ru |
| <i>Стригалева Владимир Евгеньевич</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru |

УДК 535.4

**ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СРЕДЫ,
ВОЗБУЖДАЕМОЙ УЛЬТРАКОРОТКИМ СВЕТОВЫМ ИМПУЛЬСОМ**

Р.М. Архипов, М.В. Архипов, Ю.А. Толмачев

Рассматриваются особенности излучения резонансной среды, возбуждаемой ультракоротким световым импульсом. Показано, что, когда возбуждающий импульс распространяется по среде со сверхсветовой скоростью, в спектре излучения среды, помимо собственной частоты элементарных осцилляторов среды, возникают новые частоты. Они зависят от пространственной частоты распределения осцилляторов и угла наблюдения.

Ключевые слова: сверхсветовое возбуждение, дифракция, ультракороткий импульс.

Введение

Теория относительности «запрещает» движение физических объектов, при котором сигнал (информация) передается в пространстве со скоростью, большей скорости света в вакууме c . Однако, если передачи сигнала не происходит, перемещение физического объекта со сверхсветовой скоростью можно реализовать. В литературе уже достаточно давно известно множество различных примеров объектов и источников, движущихся со скоростью, большей скорости света. Впервые они были рассмотрены еще на рубеже XIX–XX в.в. О. Хевисайдом и А. Зоммерфельдом [1–3]. К известным примерам можно отнести излучение Вавилова–Черенкова, возникающее при движении в среде заряженной частицы, скорость которой превосходит фазовую скорость света в данной среде [4–6]. В работах [7–9] показана возможность существования коротких световых импульсов, распространяющихся в вакууме и нелинейных резонансных средах со скоростью, большей скорости света.

При движении точки пересечения фронтов двух интерферирующих волн, или ультракоротких световых импульсов (УКИ), возникающий сгусток электромагнитного поля локализуется в области пересечения импульсов и перемещается в пространстве со скоростью $V = c / \cos(\alpha / 2)$, т.е. быстрее скорости света c (α – угол между плоскими волновыми фронтами). Именно таким образом можно реализовать оптическое возбуждение среды со скоростью большей скорости света, если расположить среду вдоль движения точки пересечения фронтов интерферирующих волн.

Другой способ сверхсветового возбуждения резонансной среды реализуется при падении ультракороткого импульса на плоскую границу раздела среда–вакуум. При этом область освещения границы плоской импульсной волной движется по границе раздела со сверхсветовой скоростью $V = c / \sin \varphi$, где φ – угол падения импульса [9].

Учитывая сказанное, в настоящей работе теоретически рассматривается одна интересная особенность, которая может наблюдаться при сверхсветовом возбуждении ультракоротким световым импульсом среды, состоящей из одинаковых гармонических осцилляторов с резонансной частотой ω_0 . Данная особенность заключается в том, что при возбуждении в спектре излучения среды, помимо основной частоты ω_0 , возникают новые частоты. Они зависят от пространственной частоты распределения осцилляторов, от угла наблюдения. Появление новых частот связано с наличием переходного процесса, длительность которого зависит от скорости возбуждения и параметров среды. Как правило, оно не принимается во внимание в литературе, поэтому рассмотрение сверхсветового возбуждения резонансной среды с учетом переходных процессов представляется интересным.

Элементарный расчет поля излучения резонансной среды, возбуждаемой УКИ со сверхсветовой скоростью

Рассмотрим систему тождественных друг другу и не взаимодействующих между собой осцилляторов, вдоль оси z от $z=0$ до $z=Z_m$ (рис. 1), имеющих собственную частоту резонанса ω_0 и параметр затухания интенсивности резонансного излучения γ .

Пусть плотность осцилляторов имеет периодическое, гармоническое распределение в пространстве вдоль оси z :

$$N(z) = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha_z z), \tag{1}$$

где $\alpha_z \equiv \frac{2\pi}{\Lambda}$ – пространственная частота распределения, а Λ – пространственный период этого распределения. В момент времени $t = 0$ по этой системе начинает распространяться со скоростью V в положительном направлении импульс возбуждения. Под действием импульсного возбуждения осцилляторы начинают излучать на собственной частоте ω_0 . Пусть излучение УКИ линейно поляризовано, а плоскость поляризации перпендикулярна плоскости рисунка. Вызывают интерес свойства излучения, регистрируемого под углом φ к оси Oz (рис. 1) на большом расстоянии от системы (или собранного в точке наблюдения P , расположенной в фокальной плоскости MM' линзы L). Для расчета удобно вместо точки P рассмотреть сопряженную ей «опорную» плоскость, проходящую через точку Z_m и ортогональную направлению распространения поля (рис. 1).

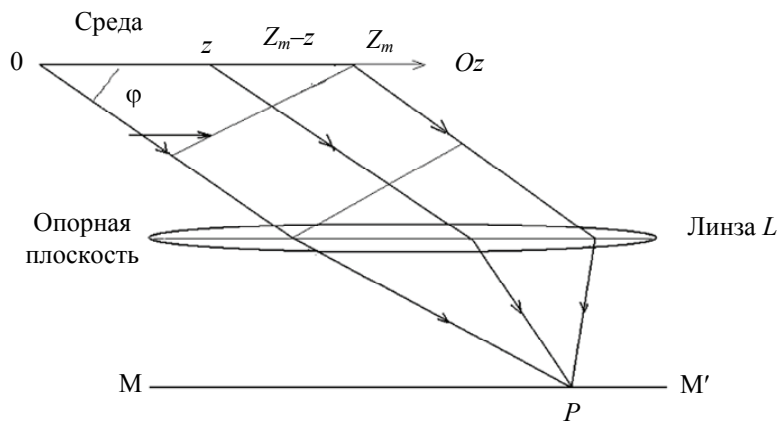


Рис. 1. Резонансная среда и излученное ею поле на опорной плоскости

Для вычисления электрического поля $E(t)$ в P надо провести суммирование полей, излученных каждым диполем среды, с учетом времени распространения света от диполя до точки наблюдения, задержки начала излучения осциллятора, вызванной конечной скоростью распространения возбуждения по среде и неоднородного (в данном случае – гармонического) распределения плотности осцилляторов.

В зависимости от величины угла наблюдения φ и соотношения скоростей c/V излучение на опорную плоскость от различных точек среды приходит в разной последовательности. На этапе, когда возбуждающий импульс идет по резонансной среде, имеет место некий переходный процесс, который сопровождается появлением новых частот в излучении. Этот этап аналогичен частному случаю рассеяния УКИ, нормально падающего на дифракционную решетку, рассмотренному в [10]. После того как возбуждающий импульс выйдет за пределы среды, наблюдатель будет регистрировать обычные колебания системы осцилляторов с собственной частотой ω_0 .

Электрическое поле излучения осциллятора, находящегося в точке z , в непосредственной близости к ней описывается выражением

$$E_z(t) = \exp\left(-\frac{\gamma}{2}\left(t - \frac{z}{V}\right)\right) \cos\left[\omega_0\left(t - \frac{z}{V}\right)\right] \cdot \Theta\left(t - \frac{z}{V}\right). \quad (2)$$

Здесь $\Theta\left(t - \frac{z}{V}\right)$ – «ступенчатая» функция Хевисайда, равная 0 при $t \leq \frac{z}{V}$ и равная 1 при $t > \frac{z}{V}$, а $\gamma/2$ – постоянная затухания амплитуды колебаний поля осцилляторов.

Перейдем к вычислению суммарного поля в точке наблюдения. Для этого необходимо модифицировать выражение (2).

Рассмотрим поле, созданное осциллятором на опорной плоскости. Из-за задержки на время $\frac{Z_m - z}{c} \cos \varphi$ при распространении излучаемой электромагнитной волны со скоростью c меняется, с точки зрения наблюдателя, электрическое поле, излученное точкой z , оно имеет вид

$$E(t) = A \cos\left[\omega_0\left(t - \frac{z}{V} - \frac{Z_m - z}{c} \cos \varphi\right)\right] \Theta\left(t - \frac{z}{V} - \frac{Z_m - z}{c} \cos \varphi\right). \quad (3)$$

Полное поле $E(t, \varphi)$ в точке P (при $\gamma = 0$) выразится интегралом от $E(t)$ из формулы (3) по z от $z = 0$ до $z = Z_m$:

$$E(t, \varphi) = \int_0^{Z_m} N(z) \cdot \cos\left[\omega_0\left(t - \frac{z}{V} - \frac{Z_m - z}{c} \cos \varphi\right)\right] \Theta\left(t - \frac{z}{V} - \frac{Z_m - z}{c} \cos \varphi\right) dz, \quad (4)$$

где плотность распределения осцилляторов $N(z)$ выражается формулой (1). Вычисление интеграла (4) показывает, что наряду с колебаниями на частоте ω_0 , в спектре переходного процесса появляется новая частота Ω :

$$\Omega = 2\pi \frac{V/\Lambda}{V \cos \varphi - 1} \cdot c. \quad (5)$$

Числитель выражения (5) имеет смысл частоты процесса возбуждения системы периодически расположенных осцилляторов (в частности, например, «штрихов» пространственной дифракционной решетки) падающим импульсом.

Амплитуда новой частотной компоненты имеет экстремум при выполнении условия резонанса:

$$\frac{V}{c} = \frac{\Lambda}{\lambda_0}, \quad (6)$$

т.е. время пробега возбуждающим импульсом одного периода пространственной решетки должно совпадать с периодом колебаний осциллятора. Если возбуждение обусловлено наклонным падением плоского импульса на рассматриваемую периодическую систему под углом ϑ к нормали, то условие (6) совпадает с классической формулой дифракции на решетке с синусоидальным распределением показателя рассеяния штриха: $\Lambda \sin \vartheta = \pm \lambda_0$. Общее условие максимума амплитуды новой частотной компоненты имеет вид $|\omega_0/\Omega| = 1$. Отметим, что в случае сложного (но периодического) распределения частиц вдоль оси z наряду с частотой Ω будут возбуждаться и кратные ей гармоники (порядки дифракции выше первого).

Примеры расчета и анализ полученных результатов

Результаты численного расчета интеграла (4) с учетом затухания осцилляторов и спектр показаны на рис. 2, 3 ($c = 1$; $\frac{V}{c} = 2$; $Z_m = 10$; $\frac{\Lambda}{\lambda_0} = 5$; $\omega_0 = 20$; $\gamma = 0,9$; $\varphi = 0$; $\Omega = 8$). В этом примере и далее параметры в расчетах являются модельными для демонстрации эффекта.

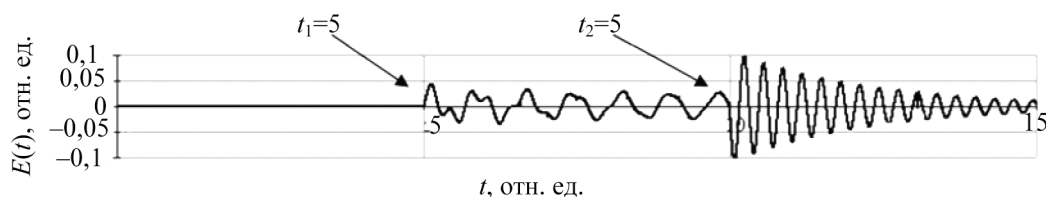


Рис. 2. Зависимость от времени электрического поля $E(t)$ в точке P

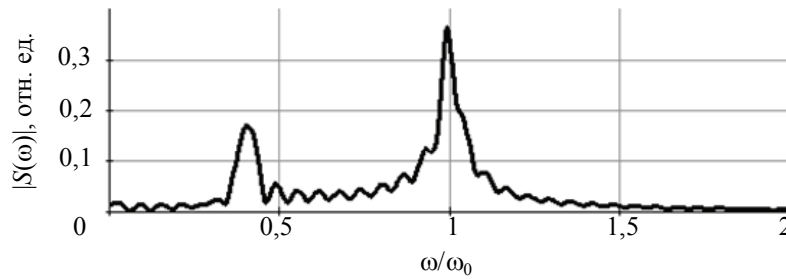


Рис. 3. Спектр $E(t)$

Как показывают рис. 2 и анализ решений, излучение исследуемой системы фиксируется наблюдателем, начиная с момента времени $t_1 = Z_m/V$, когда сверхсветовое возбуждение достигает конца среды. Затем в точку наблюдения приходит излучение от остальных, более далеких участков. В результате интерференции формируется сложный переходный процесс, который длится до момента времени $t_2 = Z_m \cos \varphi/c$, соответствующего приходу излучения от начала среды. После t_2 наблюдатель регистрирует обычное излучение системы осцилляторов на основной частоте ω_0 (затухающая синусоида после момента времени t_2).

Рассмотрим случай совпадения собственной частоты осцилляторов с новой частотой $\omega_0 = \Omega$ (рис. 4). Из (5) следует, что это условие выполнено, когда наблюдение ведется под углом

$$\varphi = \arccos\left(\frac{\lambda_0}{\Lambda} + \frac{c}{V}\right).$$

Пример поведения $E(t)$ при $\omega_0 = \Omega$ представлен на рис. 4 ($c=1$; $V/c=2$; $Z_m=10$; $\Lambda/\lambda_0=5$; $\omega_0 = \Omega = 20$; $\varphi \approx \arccos(\frac{\lambda_0}{\Lambda} + \frac{c}{V}) \approx 0,795$; $\gamma = 0,9$).

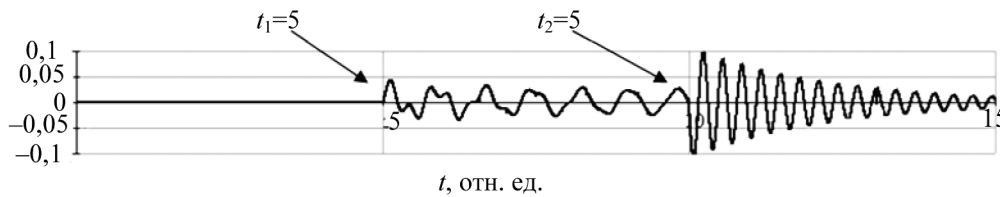


Рис. 4. Зависимость от времени электрического поля $E(t)$ в точке P при $\omega_0 = \Omega$

В течение переходного процесса, как показывают расчеты, в точке наблюдения будут складываться амплитуды монохроматических колебаний с одинаковой частотой $\omega_0 = \Omega$. Сложение волн происходит когерентно с линейно возрастающим во времени моментом начала колебаний осцилляторов, что приводит к почти линейному росту амплитуды колебаний вплоть до момента, когда импульс возбуждения достигает конца среды.

Соотношение (5) верно как при $V > c$, так и при $V < c$, однако только при сверхсветовом возбуждении возможно обращение знаменателя дроби в нуль, тогда $\cos \varphi = c/V$, что совпадает с условием образования волны черенковского излучения [4–6]. Как показывают расчеты, при выполнении этого условия излучение от всех точек решетки приходит на опорную плоскость одновременно и фиксируется, как излучение одного осциллятора, имеющее суммарную амплитуду. Переходный процесс отсутствует. Соответствующий пример колебания поля приведен на рис. 5 ($c=1$; $V/c=2$; $Z_m=10$; $\Lambda/\lambda_0=5$; $\omega_0 = 20$;

$$\varphi \approx \arccos \frac{c}{V} \approx 1,04; \gamma = 0,9).$$

Из-за того, что в примере на рис. 5 условие $\cos \varphi = c/V$ выполнено приближенно, на начальном этапе имеет место маленькое нарастание амплитуды колебаний $E(t)$.

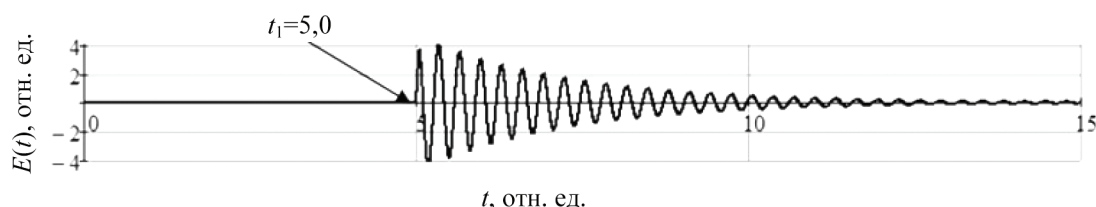


Рис. 5. Зависимость от времени электрического поля $E(t)$ в точке P

Заключение

В работе рассмотрены, без учета нелинейных эффектов, особенности излучения резонансной среды, возбуждаемой УКИ, идущим сквозь среду. Аналитические расчеты и результаты компьютерного моделирования показывают, что при гармонической (или иной периодической) модуляции пространственной плотности осцилляторов, наряду с собственной частотой осцилляторов, в спектре излучения имеется новая частота. Она зависит от скорости распространения возбуждения, периода пространственного распределения осцилляторов и угла наблюдения. Наличие в спектре излучения среды новой частоты связано именно с тем, что возбуждение происходит очень коротким импульсом.

По аналогии с эффектом Вавилова–Черенкова, измерение частоты новой компоненты можно использовать для определения скорости движения сверхсветовых возбуждений в резонансной среде. Используемая в работе техника анализа может применяться, в частности, при изучении нестационарной дифракции света на пространственных периодических структурах. Если взять не гармоническую, а иную пространственную модуляцию распределения элементарных излучателей среды, то можно сформировать профилированный во времени импульс излучения, длительность и структура которого будут определяться геометрическими параметрами среды и плотностью распределения осцилляторов.

Литература

1. Болотовский Б.М. Оливер Хевисайд. – М.: Наука, 1985. – 259 с.
2. Болотовский Б.М., Гинзбург В.Л. Эффект Вавилова–Черенкова и эффект Допплера при движении источника со скоростью, большей скорости света в вакууме // УФН. – 1972. – Т. 106. – № 4. – С. 577–592.
3. Болотовский Б.М., Серов А.В. Излучение сверхсветовых источников в вакууме // УФН. – 2005. – Т. 175. – № 9. – С. 943–955.
4. Черенков П.А. Излучение частиц сверхсветовой скорости и некоторые применения этого излучения в экспериментальной физике // УФН. – 1959. – Т. 68. – № 3. – С. 378–386.
5. Франк И.М. Развитие представлений о природе излучения Вавилова–Черенкова // УФН. – 1982. – Т. 143. – № 2. – С. 111–127.
6. Болотовский Б.М. Излучение Вавилова–Черенкова: открытие и применение // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 11. – С. 1161–1173.
7. Ораевский А.Н. Сверхсветовые волны в усиливающих средах // УФН. – 1998. – Т. 168. – № 1. – С. 1311–1321.
8. Сазонов С.В. Сверхсветовые электромагнитные солитоны в неравновесных средах // УФН. – 2001. – Т. 171. – № 6. – С. 663–677.
9. Розанов Н.Н. Сверхсветовые локализованные структуры электромагнитного излучения // УФН. – 2005. – Т. 175. – № 2. – С. 181–185.
10. Лебедев М.К., Толмачев Ю.А. Импульсный метод в решении задач дифракции и интерференции. I. Дифракция ультракороткого импульса // Лазерные исследования в Санкт-Петербургском государственном университете. Третий выпуск. – СПб: НИИ «Российский центр лазерной физики», 2004. – С. 81–153.

<i>Архипов Ростислав Михайлович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет, аспирант, arhipm@mail.wplus.net
<i>Архипов Михаил Викторович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет, кандидат физ.-мат. наук, начальник отдела, arhipm@mail.wplus.net
<i>Толмачев Юрий Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет, доктор физ.-мат. наук, профессор, Yurii.Tolmach@rambler.ru

УДК 621.383.5

**ВЛИЯНИЕ ПЛЕНКИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ
ХАРАКТЕРИСТИКУ КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА**

В.И. Соколов, Хуинь Конг Ту

Рассмотрено влияние пленки пористого кремния, сформированной методом анодного электрохимического травления р-области, на спектральную характеристику кремниевого фотодиода. Показано, что созданный слой пористого кремния приводит к существенному увеличению спектральной чувствительности во всей области спектра. Наблюдается изменение спектральной чувствительности фотодиода во времени.

Ключевые слова: пористый кремний, спектральная характеристика, фотодиод.

Введение

Важными характеристиками фотодиодов (ФД) является спектральная характеристика и величина фоточувствительности. Известно, что спектральная характеристика фоточувствительности ФД зависит как от объемных параметров полупроводника, так и от конструкции поверхности. Существующие технологии полупроводникового приборостроения позволяют реализовать конструкции фотоприемников, параметры которых, в большинстве случаев, далеки от теоретически достижимых пределов. Это обусловлено использованием высокотемпературных технологических процессов, которые способствуют увеличению дефектности полупроводниковых кристаллов и уменьшению времени жизни носителей заряда [1, 2]. Дальнейшее улучшение параметров и характеристик ФД может быть связано, например, с использованием флип-чип конструкций [3] или конструкций ФД с точечным контактом на обращенной к источнику поверхности [4].

В работе рассматриваются результаты исследований влияния на спектральную характеристику кремниевого ФД пленки пористого кремния (ПК), сформированной методом анодного электрохимического травления р-области ФД [5, 7].

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались планарные структуры кремниевых ФД типа ФП-1, изготовленные по стандартной планарной технологии методом локальной диффузии из газовой фазы. Исходной подложкой для изготовления ФД являлась пластина монокристаллического кремния п-типа с удельным сопротивлением 20 Ом·м, легированная фосфором и ориентированная в кристаллографической плоскости (100). Ниже приведена сокращенная схема технологического процесса изготовления планарной структуры ФД:

- термическое окисление кремниевой подложки (формирование маскирующего слоя SiO₂);
- травление слоя SiO₂ с обратной стороны подложки;
- диффузия фосфора из газовой фазы, источник – POCl₃; концентрация фосфора в подложке составляет порядка 10²⁰;
- травление фосфоросиликатного стекла и окисла;
- термическое окисление кремниевой подложки (формирование маскирующего слоя SiO₂);
- фотолитография в слое SiO₂ (вскрытие «окон» для локальной диффузии бора), размер «окон» – 5×5 мм²;
- локальная диффузия бора из постоянного источника BBr₃ (первая стадия диффузии);
- вторая стадия диффузии (разгонка фосфора в атмосфере сухого кислорода), глубина диффузии – 1,2 мкм;
- фотолитография в слое SiO₂ (вскрытие окон для омических контактов к анодам ФД);
- термовакуумное напыление пленки алюминия для получения омических контактов;
- фотолитография в пленке алюминия и термический отжиг (формирование омических контактов к анодам фотодиодов).

Схема структуры ФД, изготовленной по приведенной выше технологии, представлена на рис. 1. Для получения пленки ПК на фоточувствительной поверхности ФД использовался процесс анодирования в растворе HF (30%). Слои ПК формировались в однокамерной ячейке с платиновыми электродами при комнатной температуре. Плотность тока была фиксирована и равнялась 20 мА/см², а продолжительность процедуры анодирования варьировалась и составляла $t = 1, 2, 3, 4, 5$ мин. При временах анодирования 2–3 мин стабильно получались тонкие слои ПК. Такие слои обеспечивали получение повторяемых спек-

тральных характеристик ФД. При увеличении времени травления до 4–5 мин часто возникали трудности при снятии спектральных характеристик, что, по-видимому, было связано с локальными протравлениями p-областей анодов, приводящими к частичному закорачиванию p-n-переходов. В связи с этим все экспериментальные образцы, на которых проводились исследования спектральных характеристик, анодировались в течение 3 мин. Все образцы анодировались при естественном освещении подложек. После электрохимической обработки образцы промывались в деионизованной воде и просушивались на воздухе в термостате при температуре 80–90°C. Площадь пленки ПК занимает около 50% площади анода ФД.

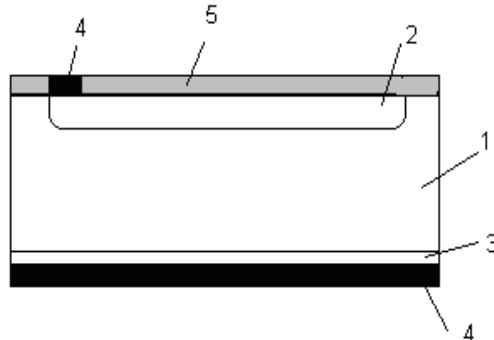


Рис. 1. Схема кремниевого планарного ФД: 1 – кремниевый кристалл n-типа; 2 – диффузионная p-область; 3 – контактная n+ – область, легированная фосфором; 4 – омический контакт; 5 – просветляющее покрытие SiO₂

С помощью спектрофотометра СФ–26 на полученных экспериментальных образцах проводились измерения спектральной зависимости структур при комнатной температуре в диапазоне длин волн 400–1200 нм с шагом 20 нм. В результате измерений спектральных характеристик образцов, полученных при разных временах травления, оптимальным временем травления, как уже было сказано выше, было установлено 3 мин.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований изменения спектральной чувствительности экспериментальных образцов до и после травления слоя SiO₂ и электрохимической обработки представлены на рис. 2. Как видно из приведенного рисунка, для ФД с ПК покрытием спектральная чувствительность существенно увеличивается.

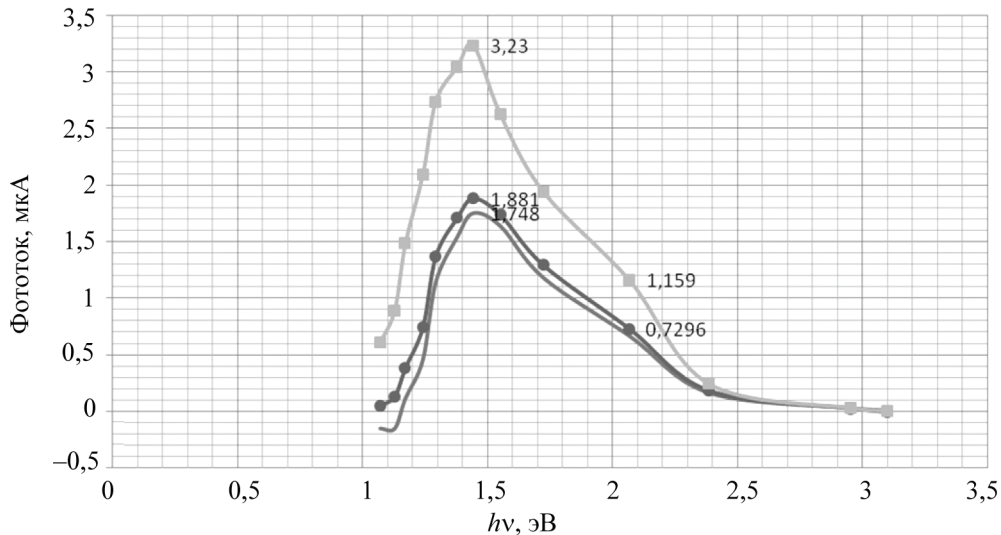


Рис. 2. Спектральная характеристика фотодиода, с которого снят слой защитного окисла и поверхность его p-области обработана электрохимическим травлением: —●— без слоя SiO₂; — — со слоем SiO₂; —■— с ПК покрытием

Чувствительность ФД зависит как от физических ограничений, связанных с выбором материала для его получения, так и от конструкции фотоприемника. Для ее увеличения необходимо уменьшать отражение падающего оптического излучения от поверхности ФД и увеличивать коэффициент собирания носителей заряда.

Известно, что малые размеры нанокристаллов ПК и большая общая площадь их поверхности обуславливают большую чувствительность ПК к внешней среде. Поверхность свежеприготовленного ПК

покрыта группами Si-H_x, причем количество атомов водорода в таких группах может быть больше, чем в группах на поверхности монокристаллического кремния [8]. Такое покрытие в малых нанокристаллах (меньше 3 нм), согласно [9], увеличивает энергию излучаемых квантов света из-за ликвидации связей Si-O, которые захватывают электроны экситонов, уменьшая этим энергию излучаемых квантов.

Более того, ПК рассматривается как двухфазная система, содержащая квантово-размерные нанокристаллы (nc-Si) в матрице пористого SiO_x. При этом граница ПК с p-Si содержит участки nc-Si/p-Si и SiO_x/p-Si. При поглощении света в ПК имеет место также захват неравновесных дырок на ловушки внутренней поверхности nc-Si/SiO_x во время действия последовательного излучения.

Если энергия кванта падающего излучения больше ширины запрещенной зоны p-Si, но меньше ширины запрещенной зоны ПК, то излучение поглощается в p-Si. С увеличением энергии квантов падающего излучения до значений, соответствующих энергии ширины запрещенной зоны ПК, происходит фотогенерация дырок в ПК.

Кроме того, немаловажным механизмом, определяющим высокую спектральную чувствительность исследуемых фотодиодов, является низкая скорость поверхностной рекомбинации на границе раздела пористый кремний – монокристаллический кремний. При исследовании фотоиндуцированного захвата заряда в ПК в [10] была обнаружена компонента фотоЭДС, связанная с областью обеднения в p-Si на границе с ПК, и установлено присутствие медленных состояний на поверхности пор.

Следует отметить, что в случае хранения экспериментальных образцов на воздухе был обнаружен спад спектральной чувствительности. Она постепенно уменьшается с увеличением времени хранения. Данные, иллюстрирующие изменение спектральной чувствительности экспериментальных образцов, приведены на рис. 3. Эффект уменьшения спектральной чувствительности можно объяснить тем, что поверхность свежеприготовленного ПК покрыта группами Si-H_x. В процессе хранения ПК происходит окисление кремния, и группы Si-H_x замещаются группами Si-O_x, т.е. имеет место дегидрирование поверхности. Эти группы захватывают электроны экситонов, уменьшая этим энергию излучаемых квантов. В дополнение к этому, поверхность ПК очень чувствительна к внешней среде. На ней адсорбированы также OH-группы, углеродные соединения и следы фтора, хлора и азота [11].

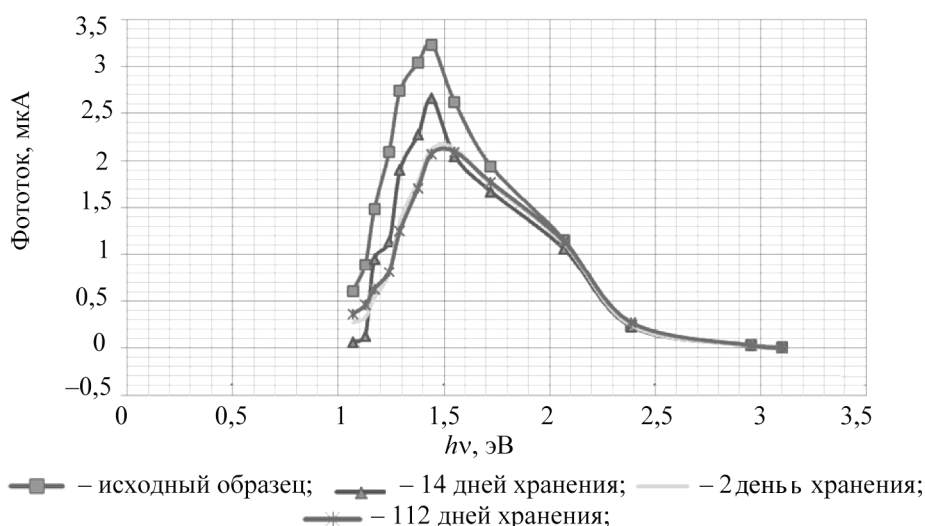


Рис. 3. Изменение спектральной характеристики фотодиода с пленкой ПК на поверхности анода в процессе хранения в комнатных условиях

Заключение

Из сказанного можно делать вывод, что формирование пленки пористого кремния на чувствительной поверхности фотодиода приводит к увеличению его спектральной чувствительности. Эти результаты могут быть использованы при разработке перспективных кремниевых солнечных элементов и оптических фильтров.

Литература

1. Торопкин Г.Н. Основы надежности изделий квантовой электроники. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
3. Holland S.E., Wang N.W., Moses W.W. Development of low noise, back-side illuminated silicon photodiode arrays // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – V. 44. – № 3. – P. 443–447.

4. Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Куницына Е.В., Михайлова М.П., Яковлев М.П. Высокоэффективные фотодиоды на основе GaInAsSb / GaAlAsSb для спектрального диапазона 0,9–2,55 мкм с большим диаметром чувствительной площадки // ФТП. – 2003. – Т. 37. – Вып. 8. – С. 974–979.
5. Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.H., Pernicone N., Ramsay J.D.F., Sing K.S.W., Unger K.K. Recommendations for the characterization of porous solids // Pure Appl. Chem. – 1994. – V. 66. – № 8. – P. 1739–1758.
6. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // J.Appl. Phys. Lett. – 1990. – V. 57. – № 10. – P. 1046–1048.
7. Федулова Г.В., Нечитайлов А.А. Щелочное вскрытие макропор при изготовлении кремниевых структур со сквозными каналами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Т. 40. – С. 75–79.
8. Canham L.T. Properties of porous silicon. – London: INSPEC, 1997. – 364 p.
9. Wolkin M.V., Jorne J., Fauchet P.M., Allan G., Delerue C. Electronic States and Luminescence in Porous Silicon Quantum Dots: The Role of Oxygen // Phys. Rev. Lett. – 1999. – V. 82. – № 1. – P. 197–200.
10. Матвеева А.Б., Константинова Е.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Исследование фотоЭДС и фотоиндуцированного захвата заряда в пористом кремнии // ФТП. – 1995. – Т. 29. – Вып. 12. – С. 2180–2188.
11. Балагуров Л.А., Павлов В.Ф., Петрова Е.А., Боронина Г.П. Исследование пористого кремния и его старения методами полного внешнего отражения рентгеновских лучей и инфракрасной спектроскопии // ФТП. – 1997. – Т. 31. – Вып. 8. – С. 957–960.

Соколов Владимир Иванович

– Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Хуинь Конг Ту

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Picochip912@yahoo.com

УДК 532.783

ПРИМЕНЕНИЕ НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

О.Г. Габараев, Ю.И. Купоросов, М.Г. Томилин

Описано применение нематических жидких кристаллов (НЖК) для визуализации структурных дефектов в кварцевом элементе резонатора промышленного производства. Объектом исследования были структурные неоднородности в кристаллическом кварце, как природного происхождения, так и возникающие в процессе технологических операций. Проведено сравнение метода НЖК с методами травления, рентгеновской и акустической дефектоскопии. Показано, что предложенный метод НЖК является неразрушающим по сравнению с методом травления; точнее акустического метода и позволяет в отличие от него дать интегральную картину свойств изучаемой области поверхности; является экспрессным и более дешевым по сравнению с рентгеновским методом. Метод НЖК можно рассматривать как независимый метод, дающий дополнительную информацию о свойствах поверхности изучаемых объектов.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, дефектоскопия, поверхность, структурные неоднородности, неразрушающий контроль, кристаллический кварц.

Введение

Кварцевый резонатор – это прибор, в котором пьезоэлектрический эффект и явление механического резонанса используются для построения высокочастотного резонансного элемента электронной схемы [1, С. 10–16; 21–27; 85]. Внешний вид кварцевого резонатора показан на рис. 1.

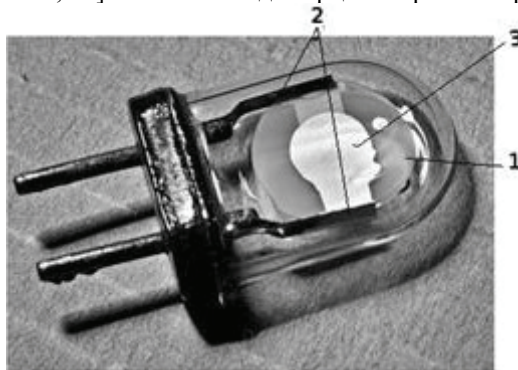


Рис. 1. Внешний вид кварцевого резонатора: 1 – кварцевый элемент (КЭ); 2 – кварцедержатель; 3 – электрод

Кварцевые резонаторы нашли широкое применение в навигационном и телекоммуникационном оборудовании, радиосвязи и вычислительной технике. Развитие технологий в данных сферах требует все более высокого качества кварцевых резонаторов, в частности, повышения стабильности их частоты. Она напрямую зависит от природной однородности материала КЭ и дефектов, образующихся в процессе изготовления резонатора. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов контроля однородности КЭ. Разработано несколько методов контроля – травление КЭ во фторсодержащих соединениях, рентгеновская и акустическая дефектоскопии. Эти методы имеют свои преимущества и недостатки.

Травление представляет собой химический способ обработки поверхности, в ходе которого она частично растворяется в травящем веществе. Поскольку границы структурных неоднородностей содержат наибольшее количество разного рода дефектов, то именно они, в первую очередь, подвергаются разрушению. По этой причине визуализация дефектов методом травления подразумевает обнаружение только крупных структурных неоднородностей. Кроме того, метод является разрушающим и относится к экологически опасным технологическим операциям.

Рентгеновская дефектоскопия представляет собой совокупность дифракционных методов изучения дефектов строения в почти совершенных кристаллах [2, С. 23–24; 186]. К таким дефектам относят блоки и границы структурных элементов, дефекты упаковки, дислокации, скопления атомов примесей. Осуществляя дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах на просвет и на отражение в специальных рентгеновских камерах, регистрируют дифракционное изображение кристалла – топограмму, расшифровка которой дает информацию о дефектах. Физическую основу метода составляет изучение дифракционного контраста в изображении различных областей кристалла в пределах одного дифракционного пятна, который формируется вследствие различий интенсивностей или направлений лучей от разных точек кристалла в соответствии с совершенством или ориентацией кристаллической решетки в этих точках. Эффект, вызываемый изменением хода лучей, позволяет оценивать размеры и разориентацию элементов структуры в кристаллах (фрагментов, блоков), а различие в интенсивностях пучков используется для выявления дефектов упаковки, дислокаций, сегрегации примесей и напряжений. Чувствительность методов достаточна для выявления отдельных блоков, дислокаций, выделений и других дальнедействующих полей деформаций. Однако эти методы не выявляют точечные дефекты, за исключением плотных скоплений, и слабые внутренние напряжения. Особенностью метода является возможность осуществления структурной дефектоскопии не только в объеме образца, но и на поверхности (рис. 2).

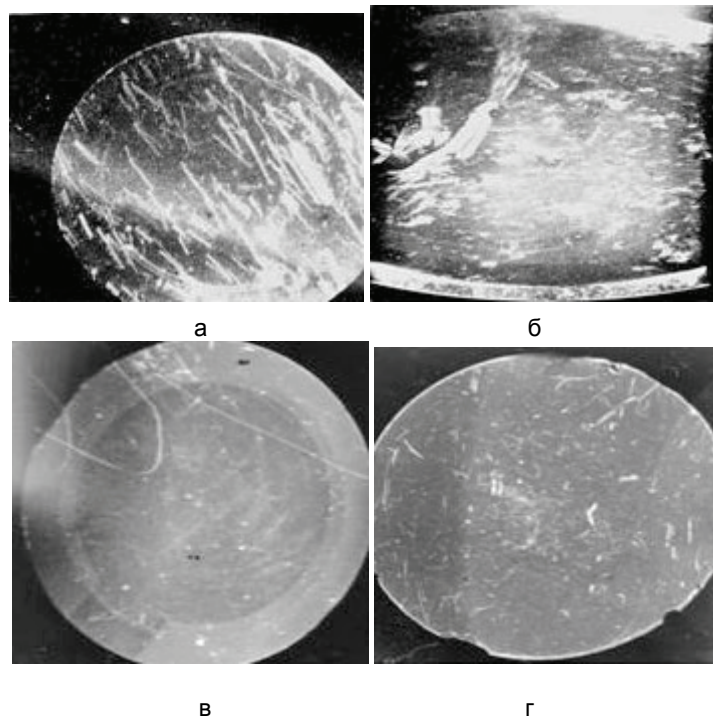


Рис. 2. Визуализация структурных дефектов в КЭ методом рентгеновской дефектоскопии: а, б – в объеме образца; в, г – на его поверхности. Фото И.Л. Шутьпиной (Физико-технический институт им. А. Иоффе)

Линейное разрешение методов рентгеновской топографии составляет 20–1 мкм, угловое разрешение – $1''-0,01''$. Недостатком методов является необходимость использования специального сложного оборудования.

Акустические методы разделяют на низкочастотные и высокочастотные. К первым относят колебания в звуковом и низкочастотном ультразвуковом диапазоне (до десятков кГц). Ко вторым – колебания

в высокочастотном ультразвуковом диапазоне от нескольких сотен кГц до 20 мГц. Ультразвуковая дефектоскопия основывается на способности ультразвука распространяться в материале изделия и отражаться от внутренних дефектов и границ неоднородностей. Широкое распространение в практике ультразвуковой дефектоскопии нашли импульсные методы, в том числе эхо-метод и теневой метод. Для излучения и приема ультразвука используют два соосно расположенных преобразователя, а о наличии дефектов судят по уменьшению амплитуды принимаемых колебаний. Излучатель ультразвуковых волн, проверяемая деталь и приемник образуют акустический тракт, по которому распространяется ультразвуковая волна. Решение о дефектности проверяемой детали принимают по величине амплитуды принятого сигнала на выходе принимающего преобразователя. Недостатками метода являются необходимость двустороннего доступа к изделию, низкая чувствительность при контроле изделий средней и большой толщины, а также технологические сложности выполнения работы.

Недостаточная наглядность и чувствительность описанных методов заставляет обратиться к изучению и использованию новых методов структурной дефектоскопии.

Метод нематических жидких кристаллов

Один из передовых методов дефектоскопии основан на использовании НЖК. Он был применен на заводе ОАО «Морион» в Санкт-Петербурге. Метод НЖК как альтернативный метод контроля структурной однородности КЭ позволяет получить ряд преимуществ – экспрессность, низкую стоимость и высокую чувствительность [3]. Разработка метода потребовала определения критерия оценки структурных неоднородностей КЭ, обеспечивающего стабильность колебаний резонатора.

Основными требованиями, предъявляемыми к жидкокристаллическим материалам, являются большая величина оптической анизотропии Δn , широкий температурный интервал мезофазы, лежащий в области комнатной температуры, нетоксичность и смачивание изучаемой поверхности.

Перед нанесением на КЭ тонкого слоя НЖК он проходит очистку в ультразвуковой камере. При нанесении необходимо добиваться однородного по толщине (порядка 1 мкм) слоя НЖК. Осуществляя визуализацию структурных дефектов на поверхности, метод НЖК не позволяет получать информацию о структурных дефектах в объеме. В ряде случаев объемные дефекты структуры выходят на поверхность и могут декорироваться слоем НЖК. Однако для получения достоверных данных об объемных дефектах следует совмещать метод НЖК с рентгеновским, используемым в режиме на просвет. Схема визуализации, приведенная на рис. 3, с использованием поляризационного микроскопа иллюстрирует переориентацию молекул НЖК в области структурного дефекта D поверхности КЭ [4].

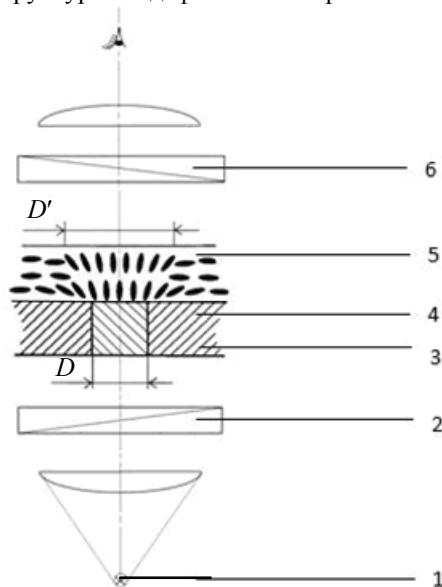


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая переориентацию молекул НЖК в области дефекта поверхности объекта: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – образец; 4 – дефект; 5 – слой НЖК; 6 – анализатор

При наблюдении в поляризационный микроскоп виден не сам дефект D , а его изображение D' на модифицированной поверхности жидких кристаллов (ЖК); при этом деформированная зона слоя НЖК влияет на цвет изображения. Вращением анализатора относительно поляризатора можно добиться как полной поляризации для четкого выделения дефектов, так и частичной, которая позволяет видеть не только деформации слоя ЖК, но и поверхность КЭ. На образцах КЭ, исследованных методом НЖК, бы-

ли выявлены структурные дефекты в виде четко наблюдаемых блоков (рис. 4), а также точечные дефекты, выколки и скопления дислокаций.

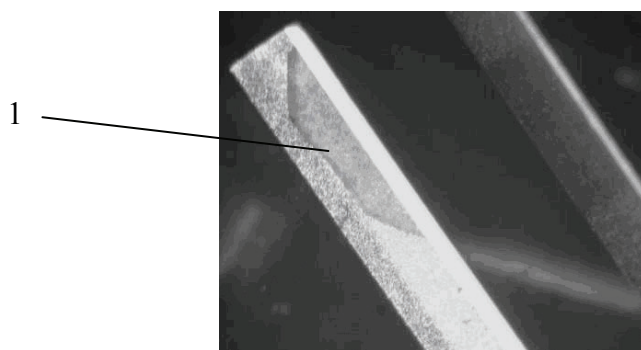


Рис. 4. Снимок дефектного кварцевого резонатора: 1 – структурный дефект в виде блока

Для повторного использования КЭ в производстве резонаторов в ряде случаев осуществляется снятие электрода химическим травлением в предположении сохранности качества поверхности. Однако метод НЖК показал, что такие элементы заведомо дефектны (рис. 5).

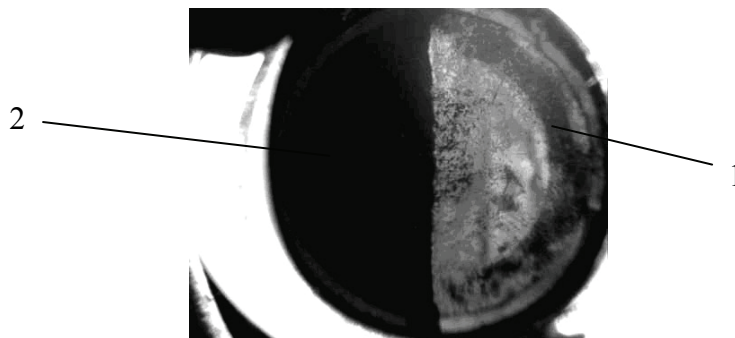


Рис. 5. Снимок резонатора после подготовки к повторной эксплуатации: 1 – след от стравленного электрода; 2 – область без НЖК

Другим достоинством метода НЖК является возможность наблюдения за изменениями структуры в реальном времени. Отобрав КЭ с областью скопления трещин (которую не удалось обнаружить без НЖК) и оказав на него механическое воздействие, можно было наблюдать динамику разрушения образца (рис. 6).

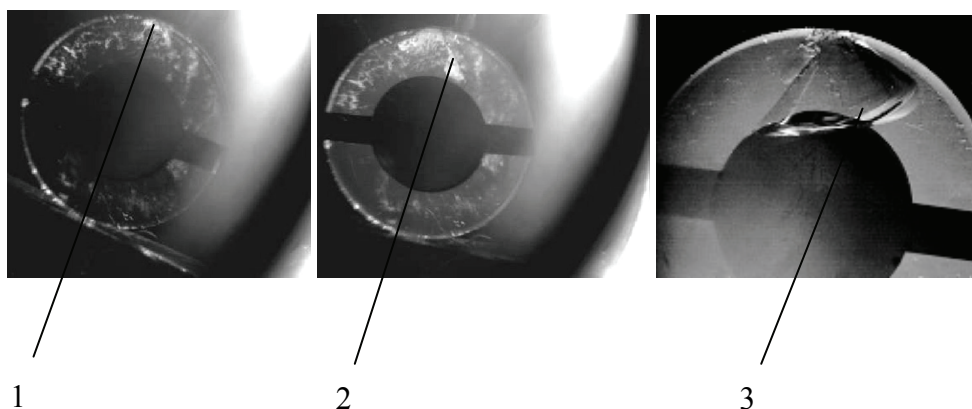


Рис. 6. Серия снимков кварцевого резонатора под действием механической нагрузки: 1 – область повышенного скопления трещин; 2 – область повышенного скопления трещин после механического воздействия; 3 – скол, образовавшийся в зоне повышенного скопления трещин

После увеличения механической нагрузки произошло разрушение КЭ в области повышенного скопления трещин, что свидетельствует о недостаточной механической прочности КЭ после его травления.

Заключение

Метод НЖК обладает рядом преимуществ по сравнению с альтернативными методами: является неразрушающим по сравнению с травлением; точнее акустического метода и позволяет в отличие от него дать интегральную картину свойств изучаемой области поверхности; является экспрессным и более дешевым по сравнению с рентгеновским методом. Применение метода НЖК позволило успешно выявить как природные дефекты кварцевого элемента, такие как точечные дефекты, блоки, мелкие выколки и дефекты рельефа, так и дефекты, возникшие при изготовлении кварцевого резонатора: следы снятия электрода травлением и области скопления трещин на поверхности. Предложенный метод можно рассматривать как независимый метод изучения свойств поверхности, альтернативный существующим методам и позволяющий получать новую информацию о свойствах поверхности изучаемых объектов.

Литература

1. Глюкман Л.И. Пьезо-электрические кварцевые резонаторы. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с.
2. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография. – СПб: Наука, 2002. – 274 с.
3. Томилин М.Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. – СПб: Политехника, 2001. – 325 с.
4. Томилин М.Г., Барсуков О.А. Новый поляризационный микроскоп с расширенными функциональными возможностями // Оптика и спектроскопия. – 2010. – № 1. – С. 122–128.

Габараев Олег Григорьевич – ОАО «Морион», инженер, gabaraev@morion.com.ru
Купоросов Юрий Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, i.jadded@gmail.com
Томилин Максим Георгиевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, mgtomilin@mail.ru

УДК [517.938 + 519.713/.718]: 621.398

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ДВОИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИХ РЕКУРРЕНТНОГО МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

А.В. Ушаков, Е.С. Яицкая

Рассматриваются проблемы, связанные со спецификой структуры пространства состояний линейных двоичных динамических систем (ЛДДС), характеризующихся наличием неподвижных состояний и замкнутых циклов при отсутствии и наличии экзогенной задающей последовательности на входе ЛДДС. Показывается, что решаемая задача связана с особенностью структуры алгебраического спектра собственных значений матрицы состояния ЛДДС, особенностями структуры геометрического спектра собственных векторов той же матрицы и в значительной степени зависит от показателя μ , которому принадлежит эта матрица. Предлагается алгоритм анализа структуры пространства состояний ЛДДС. Приводится пример.

Ключевые слова: двоичная динамическая система, структура пространства состояния, собственный вектор, принадлежность показателю, неподвижные состояния, замкнутые циклы.

Введение

Класс линейных динамических систем как объект научных исследований появился в последней четверти прошлого века благодаря работам [1, 2]. Авторы указанных работ называли линейные динамические системы линейными последовательностными машинами (ЛПМ), потому что они возникли из задач преобразования временных последовательностей с дискретным временем над конечными полями Галуа $GF(p) = \{0, 1, \dots, (p-1)\}$ с произвольной характеристикой (модулем) p и модулярной арифметикой по $\text{mod}(p)$. Достаточно быстро в силу наибольшей практической применимости выделился класс ЛПМ с характеристикой $p = 2$, который стал именоваться линейными двоичными динамическими системами (ЛДДС).

В это же время завершалось формирование такой системной парадигмы, как аппарат пространства состояний (АПС), опирающийся на возможности векторно-матричного формализма линейной алгебры, который разрабатывался в основном для систем над бесконечным полем с непрерывным и дискретным временем. Возможности указанного формализма АПС не могли быть замечены специалистами по ЛДДС. Без сомнения, перенос положений АПС на класс ЛДДС имеет свою специфику, которая определяется в основном конечностью числа возможных состояний.

В этой связи становится достаточно логичной постановка задачи анализа структуры пространства состояний ЛДДС на основе их рекуррентного модельного представления [1–5]

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k), \quad x(0), \quad (1)$$

где x, u – соответственно вектор состояния и вектор входной последовательности размерности $\dim(x) = m$, $\dim(u) = r$ с элементами; $\mathbf{A} - (m \times m)$ матрица состояния; $\mathbf{B} - (m \times r)$ матрица входа. Элементы векторов и матриц принадлежат двоичному полю Галуа $GF(p) = \{0, 1\}$. Исследования, результаты которых приводятся ниже, выполнены для случая $r = 1$, т.е. матрица \mathbf{B} представляет собой m -мерный вектор-столбец.

Следует ожидать, что структура пространства состояний автономной ЛДДС, т.е. ЛДДС (1) при $u(k) = 0$, определяется свойствами матрицы \mathbf{A} состояния системы, а структура ЛДДС при $u(k) \neq 0$ определяется свойствами пары матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) .

Предпринятые исследования начнем с рассмотрения базовых свойств квадратных матриц над двоичным полем Галуа.

Базовые свойства квадратных $(m \times m)$ матриц над двоичным полем Галуа

Свойство 1 (С.1). (Теорема Гамильтона–Кэли). Произвольная квадратная $(m \times m)$ -матрица \mathbf{A} над простым полем Галуа $GF(p)$ при $p = 2$ обладает тем свойством, что обнуляет свой характеристический модулярный многочлен (ХММ) так, что выполняется равенство

$$\det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A})|_{\lambda=\mathbf{A}} = a_0 \mathbf{A}^m + a_1 \mathbf{A}^{m-1} + \dots + a_{m-1} \mathbf{A} + a_m \mathbf{I} = \mathbf{O}. \quad \square$$

Доказательство утверждения строится по той же схеме, что и теорема Гамильтона–Кэли над бесконечным полем [3].

Свойство 2 (С.2). Будем говорить, что квадратная $(m \times m)$ - матрица \mathbf{A} с элементами из $GF(2)$ обладает свойством нильпотентности индекса ν , если она удовлетворяет условию

$$\mathbf{A}^\nu = \mathbf{O}, \quad \square$$

при этом $1 \leq \nu \leq m$.

Свойство 3 (С.3). Будем говорить, что квадратная $(m \times m)$ - матрица \mathbf{A} с элементами из $GF(2)$ обладает свойством принадлежности показателю μ , если она удовлетворяет условию

$$\mathbf{A}^\mu = \mathbf{I}. \quad \square \quad (2)$$

Примечание 1 (П.1). Нетрудно видеть, что в силу правил модулярной двоичной арифметики соотношение (4) имеет эквивалентное представление

$$\mathbf{A}^\mu + \mathbf{I} = \mathbf{O}. \quad (3)$$

Для целей дальнейших исследований сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 1 (У.1). Для того чтобы матрица \mathbf{A} обладала свойством принадлежности показателю μ достаточно, чтобы ее ХММ $D(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A})$ входил в разложение двучлена $\lambda^\mu + 1$. \square

Доказательство. Предположим, что $D(\lambda)$ входит в разложение двучлена $\lambda^\mu + 1$, тогда становится справедливым представление

$$\lambda^\mu + 1 = Q(\lambda) D(\lambda). \quad (4)$$

Построим на скалярном соотношении (4) матричное соотношение, заменив скаляр λ матрицей \mathbf{A} . Тогда будем иметь

$$\mathbf{A}^\mu + \mathbf{I} = Q(\mathbf{A}) D(\mathbf{A}).$$

Нетрудно видеть, что в соответствии с теоремой Гамильтона-Кэли $D(\mathbf{A}) = 0$, а, следовательно, выполняется соотношение (3). \blacksquare

Примечание 2 (П.2). Из доказанного утверждения следует, что μ является наименьшей степенью двучлена вида $\lambda^\mu + 1$, который характеризуется делимостью без остатка на ХММ

$$\mu = \min_j \left\{ \mu_j : \text{rest} \frac{\lambda^{\mu_j} + 1}{D(\lambda)} = 0 \right\}, \text{ при этом показатель } \mu \text{ удовлетворяет неравенству } \mu \geq m.$$

Постановка задачи анализа структуры пространства состояния ЛДДС с различными показателями μ принадлежности их матриц состояния

Структура пространства состояний ЛДДС определяется наличием неподвижных состояний, замкнутых циклов, возвратных состояний и состояний, из которых под действием входной последовательности ЛДДС переходит в нулевое состояние.

Неподвижные состояния линейных ДДС

Определение 1 (О.1). Состояние $x(k)$ автономной ЛДДС (АЛДДС), т.е. ЛДДС (1) при $u(k) = 0$, называется неподвижным, если оно удовлетворяет равенству

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) = x(k), \forall k. \quad \square \quad (5)$$

Примечание 3 (П.3). АЛДДС при любой $(m \times m)$ реализации матрицы \mathbf{A} имеет в качестве неподвижного состояния нулевое

$$x(k) \equiv 0.$$

Примечание 4 (П.4). Все ненулевые состояния АЛДДС оказываются неподвижными, если ее матрица состояния является единичной ($\mathbf{A} = \mathbf{I}$).

Утверждение 2 (У.2). Неподвижным состоянием АЛДДС является собственный вектор ξ матрицы \mathbf{A} , соответствующий собственному значению $\lambda = 1$. \square

Доказательство утверждения строится на определении понятия собственного вектора [6], в силу которого выполняется соотношение

$$\mathbf{A} \xi = \lambda \xi \Big|_{\lambda=1} \xi = \xi.$$

Если $x(k)$ выбран в форме $x(k) = \xi$, тогда для АЛДДС получим цепочку равенств

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) \Big|_{x(k)=\xi} = \mathbf{A} \xi = \xi = x(k). \quad \square$$

Рассмотрим теперь структуру неподвижных состояний ЛДДС (1) для случая $u(k) \neq 0$ ($u(k) = 1$).

Определение 2 (О.2). Состояние $x(k)$ ЛДДС (1) для случая $u(k)=1$ называется неподвижным, если оно удовлетворяет равенству $x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B} = x(k), \forall k$. □

Примечание 5 (П.5). Нулевое состояние $x(k)=0$ не принадлежит множеству неподвижных состояний ЛДДС при $u(k)=1$, так как система (1) при $x(k)=0$ и $u(k)=1$ переходит в состояние $x(k+1) = \mathbf{B}, \forall k$.

Утверждение 3 (У.3). Неподвижное состояние ЛДДС (1) при $u(k)=1$ задается выражением

$$x(k) = (\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}, \tag{6}$$

если матрица $(\mathbf{I} + \mathbf{A})$ обратима. □

Доказательство утверждения строится на подстановке $x(k+1) = x(k)$ и $u(k)=1$ в (1), в результате чего получаем

$$(\mathbf{I} + \mathbf{A})x(k) = \mathbf{B}. \tag{7}$$

Если матрица $(\mathbf{I} + \mathbf{A})$ обратима, то выполняется (6). ■

Примечание 6 (П.6). При обратимости матрицы $(\mathbf{I} + \mathbf{A})$ неподвижное состояние, определенное соотношением (6), представляет собой линейную комбинацию столбцов матрицы $(\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1}$. Матрица $(\mathbf{I} + \mathbf{A})$ есть матричная функция $f(\mathbf{A})$ от матрицы \mathbf{A} , по свойству которой [6] ее спектр $\sigma\{\mathbf{I} + \mathbf{A}\}$ собственных значений равен $\sigma\{\mathbf{I} + \mathbf{A}\} = \{\tilde{\lambda}_i = 1 + \lambda_i; i = \overline{1, m}\}$, а потому ее обратимость возможна при условии

$$\tilde{\lambda}_i = 1 + \lambda_i \neq 0, i = \overline{1, m}. \tag{8}$$

Условие (8) выполняется тогда, когда матрица \mathbf{A} является нильпотентной с любым индексом ν нильпотентности или обладает неприводимым характеристическим многочленом [1–3]. При этом в случае, когда матрица \mathbf{A} ЛДДС (1) такова, что ее характеристический полином имеет четное число ненулевых элементов, включая единичный свободный член, то такая система при $u(k)=1$ не имеет ненулевого неподвижного состояния.

Определим теперь состояния $x(k)$, из которых возможен переход в нулевое состояние $x(k+1)=0$. При $u(k)=0$ нулевое состояние $x(k)=0$ является неподвижным, поэтому переход в него возможен только из него. При $u(k)=1$ состояние $x(k)$, из которого возможен переход в нулевое состояние $x(k+1)=0$, в силу (1) определяется выражением $x(k) = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$.

Замкнутые циклы линейных ДДС

Вынесенную в название данного параграфа проблему, как и при исследовании неподвижных состояний, будем решать с использованием модельных представлений ЛДДС отдельно для каждого из случаев: $u(k)=0$ и $u(k)=1$.

Введем понятие *замкнутый цикл* в структуре пространства состояний линейной ДДС с помощью следующего определения.

Определение 3 (О.3). Пусть множество \tilde{X} мощности $[\tilde{X}] = \tilde{N} = 2^m$ состояний линейной ДДС (5), тогда подмножество \tilde{X} множества \tilde{X} , содержащее T состояний, на котором выполняется соотношение $x(k) = x(k+T)$, (9)

называется замкнутым циклом длиной T . □

Примечание 7 (П.7). Нетрудно видеть, что условие (9), по существу, содержит определение понятия возвратных состояний, множество которых мощности T образует замкнутый цикл той же длины.

Рассмотрим структуру возвратных состояний, образующих цикл некоторой длины $T = T(u)$, при двух возможных значениях $u(k)$. Нетрудно видеть, что при $u(k)=0$ множество возвратных состояний замкнутого цикла длиной T (9) состоит из состояний, определяемых в силу соотношений

$$\left\{ \begin{aligned} x(k); x(k+1) = \mathbf{A}x(k); x(k+2) = \mathbf{A}x(k+1) = \mathbf{A}^2x(k), \\ \dots, x(k+T-1) = \mathbf{A}^{T-1}x(k) \end{aligned} \right\}. \tag{10}$$

При $u(k)=1$ возвратные состояния задаются системой соотношений

$$\left\{ \begin{aligned} x(k); x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}; x(k+2) = \mathbf{A}x(k+1) + \mathbf{B} = \mathbf{A}^2x(k) + \mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{B}, \dots \\ \dots, x(k+T-1) = \mathbf{A}^{T-1}x(k) + \mathbf{A}^{T-2}\mathbf{B} + \dots + \mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{B} \end{aligned} \right\}. \tag{11}$$

Рассмотрим факторы, определяющие длину T замкнутых циклов на множестве состояний ЛДДС при $u(k) = 0$. С этой целью соотношение (9) запишем в форме

$$x(k) = \mathbf{A}^T x(k). \quad (12)$$

Сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 4 (У.4). При $x(k) \neq 0$ соотношение (12) выполняется в случаях, когда матрица \mathbf{A} принадлежит показателю $\mu = T$. \square

Доказательство справедливости первой части утверждения строится на определении показателя μ , которому принадлежит матрица \mathbf{A} , в соответствии с которым выполняется матричное равенство (2), подстановка $\mu = T$ делает справедливым (12). Доказательство справедливости второй части утверждения строится на определении собственного вектора с учетом специфики простого поля Галуа $GF(p)$ при $p = 2$. \blacksquare

Очевидно, что длина T замкнутых циклов при $u(k) = 0$ и $u(k) = 1$ удовлетворяет неравенствам

$$1 \leq T \leq 2^m - 1. \quad (13)$$

Очевидно, что в структуре пространства $(m \times m)$ матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС (5) имеется цикл длины $T = 1$, когда $x(k)$ является собственным вектором матрицы \mathbf{A} . Иначе говоря, ненулевое неподвижное состояние образует цикл длиной $T = 1$. Максимальная длина $T = 2^m - 1$ имеет место, когда $(m \times m)$ матрица \mathbf{A} и ее характеристический многочлен $D(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A})$ принадлежат показателю $\mu = 2^m - 1$.

Наложим на неравенства (13), определяющие возможные по длине T циклы на множестве ненулевых состояний \tilde{x} мощности $[\tilde{x}] = \tilde{N} = 2^m - 1$, неравенства, оценивающие возможные показатели μ , которым могут принадлежать $(m \times m)$ матрица состояний ЛДДС и ее характеристический многочлен $D(\lambda)$

$$m \leq \mu \leq 2^m - 1.$$

Рассмотрим теперь структуру замкнутых циклов линейной ДДС при $u(k) = 1$. Описание ЛДДС для этого случая задается представлениями (1), в которых следует положить $u(k) = 1$ так, что получим:

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}; x(0). \quad (14)$$

Следует заметить, что введенное с помощью **О.3** определение замкнутого цикла длиной T сохраняется, однако структура этих циклов не только зависит от показателя μ , которому принадлежит матрица \mathbf{A} , структуры собственных векторов $\{\xi_f\}$ степенных матричных функций $f(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^T$ от $(m \times m)$ матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС, но и от матрицы \mathbf{B} . Последняя может принадлежать пространству столбцов матрицы \mathbf{A} , т.е. ее образу

$$\mathbf{B} \subset Jm \mathbf{A},$$

тогда пара матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) оказывается неполностью управляемой, простейшим случаем такой ситуации является случай, когда матрица \mathbf{B} является собственным вектором матрицы \mathbf{A} .

В этой связи сформулируем утверждение.

Утверждение 5 (У.5). Если матрица \mathbf{B} векторно-матричного описания ЛДДС является собственным вектором матрицы \mathbf{A} , то ЛДДС с такой парой матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) не является полностью управляемой, при этом размерность подпространства управляемости равна единице. \square

Доказательство. Тот факт, что матрица \mathbf{B} есть собственный вектор матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС над простым полем Галуа $GF(2)$, позволяет записать $\mathbf{A} \mathbf{B} = \mathbf{B}$.

Составим матрицу управляемости пары (\mathbf{A}, \mathbf{B})

$$W_y(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A} \mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2 \mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{m-1} \mathbf{B}]. \quad (15)$$

Для элементов $W_y(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ можно записать

$$\mathbf{A} \mathbf{B} = \mathbf{B}; \mathbf{A}^2 \mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{B} = \mathbf{B}, \dots, \mathbf{A}^{m-1} \mathbf{B} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^{m-2} \mathbf{B}) = \dots = \mathbf{B}.$$

Подстановка полученных матричных равенств в (15) дает для матрицы управляемости

$$\text{rank } W_y(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \text{rank} [\mathbf{B} \quad \mathbf{B} \quad \mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{B}] = \text{rank } \mathbf{B} = 1 < m. \quad \blacksquare$$

Составим следующий алгоритм анализа структуры замкнутых циклов линейных ДДС с системной матрицей \mathbf{A} , имеющей своим характеристическим модулярным многочленом $D(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A})$ неприводимый многочлен степени m .

Алгоритм 1 (А.1)

1. Построить векторно-матричное представление линейной двоичной динамической системы в рекуррентной форме (1).
2. Перейти от представления ЛДДС (1) к ее представлению в форме (5), положив в (1) $u(k) = 0$.
3. Вычислить характеристический многочлен $D(\lambda)$ матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС в силу соотношения $D(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I} + \mathbf{A})$.
4. Определить показатель μ , которому принадлежит характеристический многочлен $D(\lambda)$ и матрица \mathbf{A} состояний ЛДДС, с использованием таблиц многочленов, принадлежащих конкретному μ , или возведением матрицы \mathbf{A} в степень над полем Галуа $GF(2)$ до момента выполнения равенства (2).
5. Проанализировать полученное значение μ по соотношению

$$2^m - 1 = m_\mu \mu + r_\Sigma,$$
 из которого определить m_μ – число циклов длины $T = \mu$ и r_Σ – суммарную длину циклов, длительности $1 \leq T_r \leq r_\Sigma$.
6. Определить состав и последовательность изменения состояний в замкнутых циклах длиной $T = \mu$, порожденных фактом принадлежности матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС показателю μ , используя представление циклов в форме (10), в котором за исходное состояние $x(k)$ цикла взять любое состояние множества \tilde{X} .
7. Сформировать структуру замкнутых циклов и неподвижных состояний линейной ДДС (5) (при $u(k) = 0$) п.п. 5, 6, дополнив их нулевым неподвижным состоянием.
8. Перейти от представления ЛДДС (1) к ее представлению в форме (14), положив в (1) $u(k) = 1$.
9. Определить неподвижное состояние $x(k): x(k+1) = x(k)$, используя соотношение (6) или (7).
10. Определить состав и последовательность изменения состояний в замкнутых циклах длиной $T = \mu$, порожденных фактом принадлежности матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС показателю μ , используя представление циклов в форме (11), в котором за исходное состояние $x(k)$ цикла взять любое состояние множества \tilde{X} .
11. Сформировать структуру замкнутых циклов и неподвижных состояний линейной ДДС (14) (при $u(k) = 1$) п. 10, дополнив их неподвижным состоянием п. 9. ■

Пример анализа структуры пространства состояний ЛДДС, представленной ее неподвижными состояниями и замкнутыми циклами

В качестве примера рассматриваются ЛДДС с матрицами \mathbf{A} состояний размерности $(m \times m) = (3 \times 3)$. Структура пространства изучается на реализациях пар матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) , в которых матрицы \mathbf{A} обладают характеристическими многочленами $D(\lambda)$, принадлежащими классу неприводимых степени $\deg\{D(\lambda)\} = m$, а множество ненулевых матриц \mathbf{B} характеризуется мощностью $[\mathbf{B}] = 2^m - 1$. Исследования начнем со случая, когда ХММ матрицы \mathbf{A} имеет вид $D(\lambda) = \lambda^3 + \lambda + 1$. Тогда, следуя алгоритму **А.1**:

1. выполним п.п. 1–2, в результате чего ЛДДС будет иметь матрицу \mathbf{A} состояний, заданной во фробениусовой форме так, что она получает представление

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

4. путем вычисления степенной матричной функции $f(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^l$ установим, что при $l = 7$ выполняется равенство $\mathbf{A}^l = \mathbf{I}$, на основании чего становится справедливым соотношение $\mu = 7$, где μ – показатель, которому принадлежит матрица \mathbf{A} ;
5. анализируя значение μ , обнаружим справедливость разложения мощности $2^m - 1$ множества ненулевых состояний в форме $2^m - 1 = 7 = 1 \cdot 7 + 0$, что свидетельствует о наличии в структуре пространства матрицы \mathbf{A} состояний ЛДДС одного замкнутого цикла длиной $T = \mu = 7$;

6. определим состав и последовательность смены состояний ЛДДС в замкнутом цикле длины $T = \mu = 7$, порожденного фактом принадлежности матрицы \mathbf{A} показателю $\mu = 7$. В качестве стартового состояния примем состояние, характеризующееся минимальным кодовым расстоянием с нулевым состоянием ЛДДС, не входящим в состав цикла $x(k) = [0 \ 0 \ 1]^T$. Если воспользоваться (10), то получим замкнутый цикл, характеризующийся составом и последовательностью

$$\left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\};$$

7. получим полную структуру замкнутых циклов и неподвижных состояний при $u(k) \equiv 0$ (рис. 1);

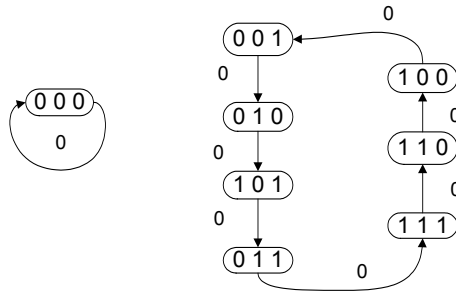


Рис. 1. Структура замкнутых циклов и неподвижных состояний ЛДДС при $u(k) \equiv 0$

8. для рассмотрения ЛДДС вида (14) для матрицы \mathbf{B} входа положим $\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 1]^T$;
 9. для поиска неподвижного состояния $x(k): x(k+1) = x(k)$ используем соотношение (6) и получим

$$x(k) = (\mathbf{I} + \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

10. определим состав и последовательность смены состояний ЛДДС в замкнутом цикле длины $T = \mu = 7$, порожденной фактом принадлежности матрицы \mathbf{A} показателю $\mu = 7$. В качестве стартового состояния одного из циклов примем состояние, отличное от состояния п. 9 примера, например, нулевое состояние ЛДДС $x(k) = [0 \ 0 \ 0]^T$. Если воспользоваться (11), то получим замкнутый цикл, характеризующийся составом и последовательностью

$$\left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\};$$

11. получим полную структуру замкнутых циклов и неподвижных состояний при $u(k) = 1$ (рис. 2).

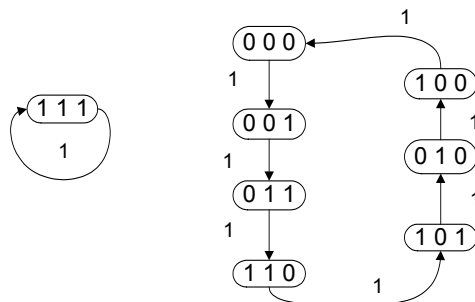


Рис. 2. Структура циклов и неподвижных состояний ЛДДС с парой матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) при $u(k) = 1$

Воспользуемся алгоритмом **A.1** для всех пар матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) , оговоренных в преамбуле примера. Полученные результаты сведены в таблицу. Для компактности записи в таблице использованы представления матриц, циклов, последовательностей в виде их десятичных эквивалентов, причем величина периодичности представлена скобочной записью с указанием длительности периода в виде нижнего индекса у правой скобки.

Матрица \mathbf{A}^T	Показатель μ	$u(k) \equiv 0$	$u(k) = 1$, Матрица \mathbf{B}^T						
		0	1	2	3	4	5	6	7
[2, 1, 6]	7	(1, 2, 5, 3, 7, 6, 4) ₇ , (0) ₁	(0, 1, 3, 6, 5, 4, 2) ₇ , (7) ₁	(0, 2, 7, 4, 3, 5, 1) ₇ , (6) ₁	(0, 3, 4, 2, 6, 7, 5) ₇ , (1) ₁	(0, 4, 5, 7, 2, 1, 6) ₇ , (3) ₁	(0, 5, 6, 1, 7, 3, 2) ₇ , (4) ₁	(0, 6, 2, 3, 1, 4, 7) ₇ , (5) ₁	(0, 7, 1, 5, 4, 6, 3) ₇ , (2) ₁
[2, 1, 5]	7	(1, 3, 7, 6, 5, 2, 4) ₇ , (0) ₁	(0, 1, 2, 5, 3, 6, 4) ₇ , (7) ₁	(0, 3, 4, 2, 7, 5, 1) ₇ , (1) ₁	(0, 3, 4, 2, 7, 5, 1) ₇ , (6) ₁	(0, 4, 5, 6, 1, 7, 2) ₇ , (3) ₁	(0, 5, 7, 3, 2, 1, 6) ₇ , (4) ₁	(0, 6, 3, 1, 5, 4, 7) ₇ , (2) ₁	(0, 7, 1, 4, 6, 2, 3) ₇ , (5) ₁

Таблица. Структура циклов и неподвижных состояний всех возможных вариантов реализаций пар (\mathbf{A}, \mathbf{B}) матриц, задающих соответствующие ЛДДС при размерности вектора состояния $\dim x = 3$

Анализ структуры состояний ЛДДС, из которых под действием $u(k) = 1$ возможен переход в нулевое состояние

Проблема вычисления состояний, из которых ЛДДС переходит в нулевое состояние $x(k+1) \equiv 0$, сводится к решению уравнения (14) при нулевой левой части. Тогда искомый $x(k)$ при $x(k+1) \equiv 0$ и $u(k) = 1$ определяется выражением

$$x(k) = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}. \tag{16}$$

Если рассмотреть ЛДДС с парой матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) , где матрица \mathbf{A} задается в форме п. 1 примера, а матрица \mathbf{B} – в форме п. 8 примера, то состояние $x(k)$, удовлетворяющее условию (16), получает представление

$$x(k) = [1 \ 0 \ 0]^T.$$

Заключение

Предложенная в работе алгоритмическая среда анализа структуры пространства состояний ЛДДС делает алгебраически прозрачным процесс преобразования двоичных кодов [1–3], что особенно важно при решении задач помехозащитного преобразования этих кодов. Становится наглядной необходимость выбора неприводимых многочленов в качестве образующих многочленов помехозащищенного кода с максимальным значением μ их принадлежности.

Литература

1. Фараджев Р.Г. Линейные последовательностные машины. – М.: Советское радио, 1975. – 248 с.
2. Гилл А. Линейные последовательностные машины. – М.: Наука, 1974. – 288 с.
3. Мельников А.А., Ушаков А.В. Двоичные динамические системы дискретной автоматики / Под ред. А.В. Ушакова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 214 с.
4. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – № 3. – С. 17–25.
5. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Динамическое наблюдение нелинейных двоичных динамических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4. – С. 38–44.
6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 5-е изд. – М.: Физматлит, 2004. – 560 с.

Ушаков Анатолий Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ushakov-AVG@yandex.ru
Яицкая Елена Сергеевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yaitskayaes@mail.ru

УДК 621.314

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ИСТОЧНИКА ТОКА ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ РАЗРЯДА В ЛАМПАХ НАКАЧКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

В.В. Тогатов, Е.М. Соложина, Р.А. Сидоров

Предложена схема поддержания разряда в лампах накачки твердотельных лазеров. Разработана математическая модель процессов в схеме, по результатам анализа которой дана методика расчета параметров схемы и построена ее вольт-амперная характеристика. Сформулировано условие получения максимальной частоты коммутации в схеме.

Ключевые слова: источник тока, лампа накачки, поддержания разряда, вольт-амперная характеристика, условие максимальной частоты коммутации.

Введение

В работе [Л] приведена простая схема поддержания разряда в лампах накачки твердотельных лазеров. Относительно лампы накачки и накопительного конденсатора эта схема симметрична силовой схеме, причем обе схемы имеют общую шину. Это позволило для питания обеих схем использовать один высоковольтный источник. Однако в ряде применений цепь лампы в схеме поддержания разряда должна быть гальванически развязана. Кроме того, у ламп с большой длиной разрядного промежутка величина напряжения, при котором схема «подхватывает» поджиг, может превосходить 1000 В, что превышает напряжение питания силовой схемы. В этих случаях предпочтительнее использование предложенной в данной работе полумостовой резонансной схемы на МОП-транзисторах.

Особенностью схемы поддержания разряда является то, что величина выходного напряжения схемы при переходе от режима холостого хода к режиму работы под нагрузкой может измениться на порядок. До поджига лампы схема поддерживает на выходе заданное высокое напряжение (1000 В и выше). После поджига это напряжение резко падает и устанавливается в соответствии с вольт-амперной характеристикой лампы и величиной выходного тока, определяемого режимом работы схемы.

В отличие от используемых полумостовых схем, в предлагаемой схеме накопительные конденсаторы шунтированы обратными диодами, что позволило эффективнее использовать коммутирующие транзисторы и избежать неконтролируемого перезаряда конденсаторов в контурах с высокой добротностью. При проектировании схемы анализировалась ее работа в двух режимах: холостого хода (при выключенной лампе) и под нагрузкой (после поджига лампы).

Режим холостого хода

Схема поддержания разряда на МОП-транзисторах VT_1 и VT_2 (рис. 1) получает питание от источника постоянного напряжения (на схеме не показан), шунтированного фильтровым конденсатором C_{IN} . Напряжение источника U_{IN} делится между конденсаторами C_1 и C_2 с равными емкостями $C_1 = C_2 = C$, которые шунтированы обратными диодами VD_1 и VD_2 . В диагональ моста включены дроссель L_1 и первичная обмотка трансформатора T_1 с индуктивностями намагничивания L_μ и рассеяния L_s . Вторичная обмотка трансформатора подключена к схеме удвоения напряжения, состоящей из конденсаторов C_3 , C_4 и диодов VD_3 , VD_4 . Высоковольтное напряжение U_{OUT} с выхода удвоителя через дроссель L_2 (на схеме не показан) подключено к электродам лампы.

Управление транзисторами VT_1 и VT_2 осуществляется драйвером IRS21531DS, который задает частоту работы схемы и формирует на выходах LO и HO прямоугольные импульсы напряжения с равной амплитудой и длительностью. При этом начало импульса на одном выходе сдвинуто относительно конца импульса на другом на 0,5 мкс.

Проанализируем работу схемы в режиме холостого хода (до поджига лампы), имея в виду, что транзисторы VT_1 и VT_2 поочередно переключаются через равные промежутки времени. При этом каждый из конденсаторов C_1 и C_2 поочередно разряжается с напряжения U_{IN} до нуля в течение одного полупериода и вновь заряжается до напряжения U_{IN} в течение следующего полупериода.

Для определенности будем считать, что в начале рассматриваемого этапа ($t = 0$) напряжение на конденсаторе C_1 равно U_{IN} , а на C_2 – нулю. Иными словами $u_{C1}(0) = U_{IN}$ и $u_{C2}(0) = 0$. Ток через индуктивность L_1 и первичную обмотку трансформатора в начале этапа также равен нулю: $i_L(0) = 0$.

При включенном транзисторе VT_1 происходит резонансный разряд конденсатора C_1 через индуктивность L_1 и первичную обмотку трансформатора. Напряжение на C_1 $u_{C1}(t)$ и ток через индуктивность контура $i_L(t)$ изменяются по закону

$$u_{C1}(t) = U_{IN} \cdot \cos \frac{t}{\sqrt{2LC}}, \tag{1}$$

$$i_L(t) = U_{IN} \sqrt{\frac{2C}{L}} \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{2LC}}. \tag{2}$$

В этих выражениях $L = L_1 + L_\mu$ – суммарная индуктивность контура разряда, C – емкость конденсаторов C_1 и C_2 .

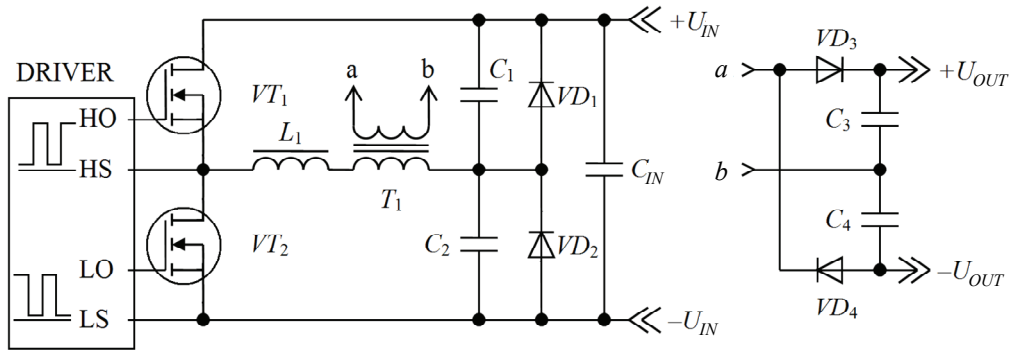


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема

Если при изменении полярности напряжения на C_1 не происходит выключения VT_1 , то диод D_1 смещается в прямом направлении, и ток i_L коммутует из цепи C_1 в цепь VD_1 . В дальнейшем этот ток замыкается в новом контуре вплоть до выключения VT_1 . После выключения VT_1 в момент $t = t_1$ происходит быстрый заряд собственной емкости транзистора VT_1 C_{VT1} до напряжения U_{IN} и разряд емкости транзистора VT_2 C_{VT2} до нуля за время

$$\Delta t = \frac{U_{IN}(C_{VT1} + C_{VT2})}{i_L(t_1)}. \quad (3)$$

В этом выражении $i_L(t_1)$ – ток через индуктивность L в момент выключения VT_1 . Если время выключения транзистора VT_1 в несколько раз меньше величины Δt в (3), то выключение VT_1 происходит при напряжении сток–исток $U_{DS} \ll U_{IN}$ и потери при выключении транзистора незначительны. При необходимости емкость $C_{VT1} + C_{VT2}$ может быть увеличена за счет подключения внешней емкости.

Как только напряжение на VT_1 достигнет величины U_{IN} , ток i_L коммутует в цепь источника питания, замыкаясь через диод VD_1 и внутренний обратный диод транзистора VT_2 . Происходит быстрый спад тока i_L до нуля со скоростью $di_L/dt = U_{IN}/L$. Если включение VT_2 произойдет до того, как i_L спадет до нуля, то этот ток продолжит замыкаться в том же контуре, но не через обратный диод транзистора VT_2 , а по цепи канала этого же транзистора. При этом напряжение на транзисторе VT_2 составит доли вольта, и коммутационные потери при включении транзистора окажутся минимальными. Если же включение VT_2 произойдет с задержкой относительно момента спада тока i_L до нуля, то к моменту включения емкость C_{VT2} успеет зарядиться до напряжения U_{IN} и коммутационные потери при включении резко возрастут.

Если выключение VT_1 происходит раньше разряда конденсатора C_1 до нуля, то первая фаза смещения VD_1 в прямом направлении отсутствует и сразу осуществляется спад тока i_L , замыкающегося через источник. Такая ситуация реализуется при работе схемы в режиме холостого хода с максимальной частотой коммутации. Так как время разряда конденсаторов C_1 и C_2 в режиме холостого хода заведомо больше, чем под нагрузкой, то максимально допустимая частота коммутации схемы ограничена параметрами режима холостого хода. Выберем момент выключения транзистора VT_1 $t = t_1$ таким образом, чтобы после его выключения напряжение на C_1 $u_{C1}(t)$ и ток через суммарную индуктивность $i_L(t)$ снизились до нуля одновременно, иными словами, чтобы одновременно выполнялись два равенства:

$$u_{C1}(t_1 + t_2) = 0, \quad i_L(t_1 + t_2) = 0, \quad (4)$$

где t_2 – интервал с момента t_1 до момента обнуления напряжения и тока. Условие (4) определяет максимально допустимую частоту коммутации схемы.

Запишем выражения $u_{C1}(t)$ и $i_L(t)$ после выключения транзистора VT_1 ($t \geq t_1$):

$$u_{C1}(t) = U_{IN} - \left\{ \sqrt{\frac{L}{2C}} i_L(t_1) \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{2LC}} + [U_{IN} - u_{C1}(t_1)] \cdot \cos \frac{t}{\sqrt{2LC}} \right\}, \quad (5)$$

$$i_L(t) = i_L(t_1) \cdot \cos \frac{t}{\sqrt{2LC}} - [U_{IN} - u_{C1}(t_1)] \sqrt{\frac{2C}{L}} \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{2LC}}. \quad (6)$$

Раскрывая условие (4) с учетом уравнений (1), (2), (5) и (6), найдем значение тока $i_L(t_1)$ и величины временных интервалов t_1 и t_2 , соответствующие максимальной частоте коммутации схемы:

$$i_L(t_1) = U_{IN} \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{C}{L}}, \quad (7)$$

$$t_1 = t_2 = 1,482 \sqrt{LC}. \quad (8)$$

Период коммутации, соответствующий максимальной частоте работы схемы, равен

$$T = 2(t_1 + t_2) = 5,928 \sqrt{LC}. \quad (9)$$

С помощью выражений (7)–(9) можно решить обратную задачу: по известным значениям U_{IN} , T и $i_L(t_1)$ определить параметры контура разряда L и C , соответствующие максимальной частоте коммутации:

$$L = \frac{0,207 \cdot T \cdot U_{IN}}{i_L(t_1)}, \quad (10)$$

$$C = \frac{0,138 \cdot T i_L(t_1)}{U_{IN}}. \quad (11)$$

При проектировании схемы величины U_{IN} и T , как правило, известны, а значение $i_L(t_1)$ должно быть достаточным, чтобы перезарядить емкости обоих транзисторов при выключении, а также дополнительную внешнюю емкость (если она подключена). Приравнивая энергию магнитного поля, запасенную в индуктивности контура L , энергии электрического поля в суммарной емкости транзисторов C_Q , получим:

$$i_L(t_1) \geq \sqrt{\frac{C_{VT}}{L}} \cdot U_{IN}. \quad (12)$$

Значение тока $i_L(t_1)$, даваемое выражением (12), является минимально необходимым при выключении транзисторов. Вместе с тем, при выборе величины этого тока следует учитывать и время заряда (3) суммарной емкости транзисторов C_{VT} , которое должно быть заведомо меньше задержки включения одного транзистора относительно момента выключения другого Δt_D :

$$i_L(t_1) \geq \frac{U_{IN} \cdot C_{VT}}{\Delta t_D}.$$

Очевидно, что при проектировании следует брать большее из этих двух значений.

Процесс разряда конденсатора C_2 через суммарную индуктивность контура L и поведение тока i_L при включении и выключении транзистора VT_2 ничем не отличаются от рассмотренных выше.

Так как в режиме холостого хода цепь вторичной обмотки трансформатора не потребляет тока, то конденсаторы C_3 и C_4 заряжаются до максимального напряжения:

$$U_{C3} = U_{C4} = \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{L_\mu}{L} \cdot U_{IN}.$$

Здесь w_1 и w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора. Выходное напряжение схемы, прикладываемое к электродам лампы, равно их сумме.

Режим работы под нагрузкой

При анализе работы схемы под нагрузкой будем использовать схему замещения трансформатора, приведенную на рис. 2.

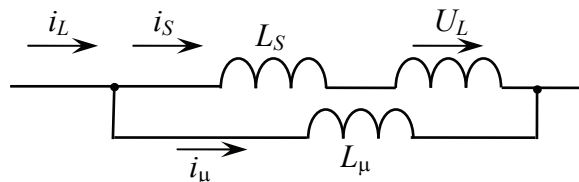


Рис. 2. Схема замещения трансформатора

В этой схеме L_μ и L_S – индуктивности намагничивания и рассеяния; $U_L = \frac{1}{2} \frac{w_1}{w_2} \cdot U_{OUT}$ – приведенное к первичной обмотке значение напряжения на нагрузке. На схеме показаны также токи: через индуктивность L_1 i_L , собственно через обмотку i_S и через индуктивность намагничивания i_μ .

Частота коммутации транзисторов VT_1 и VT_2 , а также последовательность их переключения те же, что и в режиме холостого хода. Параметры контура разряда конденсаторов C_1 и C_2 при работе под нагрузкой существенно изменяются. Во-первых, суммарная индуктивность контура снижается с $L = L_1 + L_\mu$

при холостом ходе до $\bar{L} = L_1 + \frac{L_S \cdot L_\mu}{L_S + L_\mu}$ при работе под нагрузкой. Во-вторых, в контуре разряда появляется напряжение U_L , направленное встречно напряжению на емкости.

Процесс разряда конденсатора C_1 до нуля при работе под нагрузкой осуществляется быстрее, чем в режиме холостого хода по двум причинам: во-первых, за счет отмеченного выше снижения эквивалентной индуктивности контура разряда, во-вторых, за счет уменьшения напряжения в контуре разряда на величину U_L . Другими словами, разряд конденсатора C_1 до нуля ($t = t_1$) осуществляется раньше, чем происходит выключение транзистора VT_1 . Это означает, что при работе под нагрузкой всегда присутствует первая фаза смещения диода VD_1 в прямом направлении.

Как при анализе режима холостого хода, будем считать $u_{C1}(0) = U_{IN}$ и $u_{C2}(0) = 0$. Ток через индуктивность L_1 в начале отсчета также равен нулю $i_L(0) = 0$, а через индуктивность L_μ равен величине $i_\mu(0)$,

причем направление этого тока при $t = 0$ встречно принятому на рис. 2. Так как момент включения VT_1 относительно начала процесса не определен, то и значение $i_\mu(0)$ изначально неизвестно. Оно находится из дополнительного условия $i_\mu(0) = -i_\mu(T/2)$.

Временные зависимости $u_{C1}(t)$ и $i_L(t)$ на первом этапе процесса разряда ($0 \leq t \leq t_1$) имеют вид

$$u_{C1}(t) = \overline{U}_L + (U_{IN} - \overline{U}_L) \cdot \cos \frac{t}{\sqrt{2LC}}, \quad (13)$$

$$i_L(t) = \sqrt{\frac{2C}{L}} \cdot (U_{IN} - \overline{U}_L) \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{2LC}}. \quad (14)$$

В этих выражениях $\overline{L} = L_1 + \frac{L_S \cdot L_\mu}{L_S + L_\mu}$, $\overline{U}_L = \frac{L_\mu}{L_S + L_\mu} \cdot U_L$.

Непосредственно из уравнений (13) и (14) находятся время снижения $u_{C1}(t)$ до нуля t_1 и значение тока $i_L(t_1)$ через индуктивность L_1 в момент $t = t_1$:

$$t_1 = \sqrt{2LC} \cdot \left(\pi - \arccos \frac{\overline{U}_L}{U_{IN} - \overline{U}_L} \right), \quad (15)$$

$$i_L(t_1) = \sqrt{\frac{2C}{L}} \cdot U_{IN} (U_{IN} - 2\overline{U}_L). \quad (16)$$

Для расчета мощности, передаваемой из первичной цепи трансформатора во вторичную, помимо зависимости $i_L(t)$ необходимо знать временные зависимости тока через обмотку $i_S(t)$ и индуктивность намагничивания $i_\mu(t)$ (рис. 2):

$$i_S(t) = i_\mu(0) + \frac{L_\mu}{L_S + L_\mu} \cdot \sqrt{\frac{2C}{L}} \cdot (U_{IN} - \overline{U}_L) \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{2LC}} - \frac{U_L}{L_S + L_\mu} \cdot t, \quad (17)$$

$$i_\mu(t) = -i_\mu(0) + \frac{L_S}{L_S + L_\mu} \sqrt{\frac{2C}{L}} (U_{IN} - \overline{U}_L) \cdot \sin \frac{t}{\sqrt{2LC}} + \frac{U_L}{L_S + L_\mu} \cdot t.$$

На втором этапе процесса разряда $t_1 \leq t \leq t_1 + t_2$ диод VD_1 смещается в прямом направлении, и ток i_L замыкается в контуре разряда через VD_1 в направлении, встречном напряжению U_L на обмотке трансформатора. Как правило, величина U_L не превышает десятков вольт, а индуктивность \overline{L} составляет сотни микрогенри, поэтому темп спада тока на этом этапе сравнительно невелик:

$$i_L(t) = i_L(t_1) - \frac{\overline{U}_L}{L} \cdot t. \quad (18)$$

В этом выражении и во всех других, относящихся к данному этапу, начало отсчета времени производится с момента $t = t_1$.

В отличие от тока $i_L(t)$, ток через индуктивность намагничивания $i_\mu(t)$ на данном этапе растет:

$$i_\mu(t) = i_\mu(t_1) + \frac{L_1}{L} \cdot \frac{U_L}{L_S + L_\mu} \cdot t. \quad (19)$$

Следовательно, ток через обмотку $i_S(t)$, равный разности этих токов, снижается со скоростью, большей, чем $i_L(t)$:

$$i_S(t) = i_S(t_1) - \frac{\overline{U}_L}{L} \left(1 + \frac{L_1}{L_\mu} \right) \cdot t. \quad (20)$$

Значения токов (18)–(20) в конце второго этапа $i_L(t_1 + t_2)$, $i_\mu(t_1 + t_2)$ и $i_S(t_1 + t_2)$ зависят от длительности t_2 этого этапа. Величина t_2 находится из дополнительного условия и приводится ниже.

На последнем (третьем) этапе рассматриваемого процесса $t_1 + t_2 \leq t \leq t_1 + t_2 + t_3$ происходит включение транзистора VT_1 и ток $i_L(t)$ из контура разряда коммутирует в цепь источника питания. Так как в новом контуре тока действует высокое напряжение $U_{IN} + U_L$, направленное встречно току $i_L(t)$, то происходит быстрый спад тока до нуля:

$$i_L(t) = i_L(t_1 + t_2) - \frac{U_{IN} + U_L}{L} \cdot t. \quad (21)$$

В этом и всех последующих выражениях начало отсчета производится с момента $t = t_1 + t_2$. Начальное значение тока $i_L(t_1 + t_2)$ находится из (18) подстановкой $t = t_2$. Длительность спада тока $i_L(t)$ до нуля t_3 может быть получена из (21) и зависит от длительности интервала t_2 :

$$t_3 = \frac{\overline{L}}{U_{IN} + U_L} \left[i_L(t_1) - \frac{\overline{U}_L}{L} \cdot t_2 \right]. \quad (22)$$

Из очевидного равенства $t_1 + t_2 + t_3 = T/2$ с учетом (16) и (22) найдем длительности обоих интервалов:

$$t_2 = \left(\frac{T}{2} - t_1 \right) \frac{U_{IN} + \overline{U}_L}{U_{IN}} - \sqrt{2C\overline{L} \cdot \left(1 - \frac{2\overline{U}_L}{U_{IN}} \right)},$$

$$t_3 = \frac{\overline{L}}{U_{IN}} i_L(t_1) - \frac{\overline{U}_L}{U_{IN}} \left(\frac{T}{2} - t_1 \right).$$

Значение t_1 определено в (15).

Как уже отмечалось, для расчета мощности, передаваемой в нагрузку, нужно найти токи $i_S(t)$ и $i_\mu(t)$:

$$i_S(t) = i_S(t_1 + t_2) - \frac{1}{L_S + L_\mu} \left[U_L + \frac{L_\mu}{L} (U_{IN} + \overline{U}_L) \right] \cdot t, \quad (23)$$

$$i_\mu(t) = i_\mu(t_1 + t_2) + \frac{U_L}{L_S + L_\mu} \left(1 - \frac{L_S}{L} \frac{U_{IN} + \overline{U}_L}{U_L} \right) \cdot t.$$

Значения $i_S(t_1 + t_2)$ и $i_\mu(t_1 + t_2)$ зависят от величины $i_\mu(0)$, которая может быть определена из условия $i_\mu(0) = i_\mu(T/2)$:

$$i_\mu(0) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{U_L}{L_S + L_\mu} \left[t_1 + \frac{L_S}{L} t_2 + \left(1 - \frac{L_S}{L} \frac{U_{IN} + \overline{U}_L}{U_L} \right) \cdot t_3 \right] + \frac{L_S}{L_S + L_\mu} \sqrt{\frac{2C}{L} U_{IN} (U_{IN} - 2\overline{U}_L)} \right\}.$$

Передача энергии в цепь нагрузки осуществляется до тех пор, пока ток $i_S(t)$ не снизится до нуля. Из (23) имеем:

$$\frac{-}{t_3} = \frac{(L_S + L_\mu) \cdot i_S(t_1 + t_2)}{U_L + \frac{L_\mu}{L} (U_{IN} + \overline{U}_L)}.$$

В этот момент диоды VD_3 и VD_4 во вторичной цепи (рис. 1) смещаются в обратном направлении.

Рассчитаем величину мощности P , передаваемой в нагрузку. Энергия, поступающая из первичной цепи во вторичную за полупериод, складывается из трех компонентов:

$$W = U_L \left[\int_0^{t_1} i_S(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i_S(t - t_1) dt + \int_{t_2}^{t_3} i_S(t - t_2) dt \right].$$

Значения i_S в подынтегральных выражениях соответствуют трем рассмотренным этапам и даются выражениями (17), (20) и (23). После выполнения интегрирования получим

$$W = U_L \left[2CU_{IN} \frac{L_\mu}{L_S + L_\mu} - \frac{U_L}{L_S + L_\mu} \cdot \frac{t_1^2}{2} + i_\mu(0)t_1 + \frac{i_S(t_1) + i_S(t_1 + t_2)}{2} \cdot t_2 + \frac{i_S(t_1 + t_2)}{2} \cdot t_3 \right]. \quad (24)$$

Выражение в квадратных скобках, будучи деленным на $T/2$, дает средний за период ток в первичной обмотке трансформатора I_{A1} .

Запишем выражения мощности и тока в нагрузке:

$$P = 2Wf, \quad I_{OUT} = \frac{P}{U_{OUT}}.$$

Множитель 2 в выражении мощности указывает на то, что передача энергии осуществляется в оба полупериода.

При проектировании схемы значения суммарной индуктивности контура L (10) и емкости C (11) конденсаторов C_1 и C_2 определяются при анализе работы схемы в режиме холостого хода. Однако величина индуктивности дросселя L_1 может быть определена только в результате анализа режима работы под нагрузкой. Выходной ток исследуемой схемы мало изменяется в рабочем диапазоне выходных напряжений. Поэтому при нахождении величины L_1 будем считать заданным выходной ток при коротком замыкании нагрузки, который является максимальным, I_{SC} . Этот ток в $2 \cdot w_2 / w_1$ раз меньше среднего тока в первичной обмотке трансформатора I_{A1} , определенного в (24), $I_{A1} = \frac{2w_2}{w_1} I_{SC}$. Раскрывая выражение I_{A1}

с учетом того, что в режиме короткого замыкания $U_L = 0$, получим:

$$\overline{L} = \frac{T^2}{8C} \left(\frac{L_S + L_\mu}{L_\mu} \cdot \frac{I_{SC} T}{CU_{IN}} + \frac{\pi - 1}{2} \right)^{-2}.$$

По результатам анализа может быть построена вольт-амперная характеристика источника и определен на ней рабочий участок, в пределах которого схема ведет себя как источник тока.

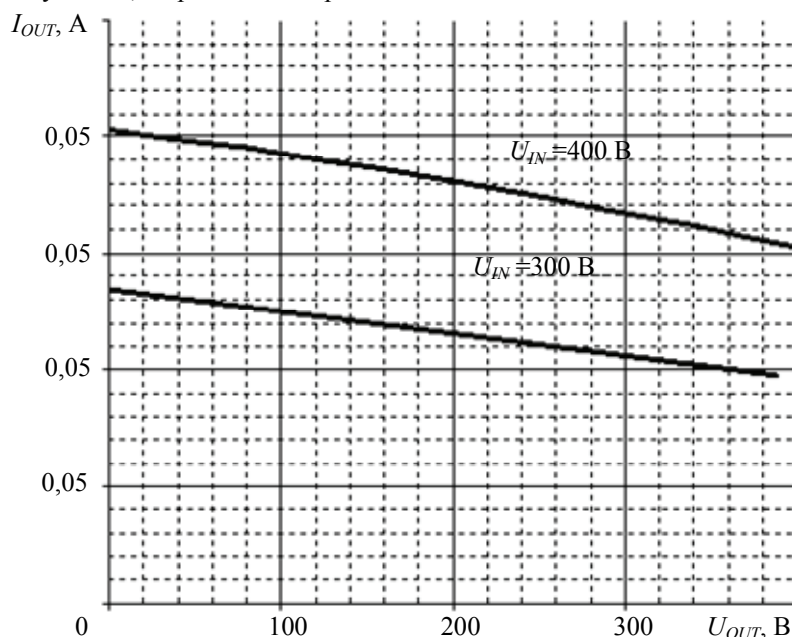


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики источника

На рис. 3 приведены выходные вольт-амперные характеристики источника, рассчитанные в рамках предложенной модели, при двух значениях напряжения источника U_{IN} : 300 В и 400 В. Остальные параметры схемы и режима приняты следующими: $C_1 = C_2 = C = 2,2 \cdot 10^{-9}$ Ф; $L = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Гн; $w_2/w_1 = 2$, $f = 100$ кГц, $L_S = 0,06 \cdot 10^{-3}$ Гн. Индуктивности намагничивания трансформатора L_μ и дросселя L_1 при $U = 300$ В составили $L_\mu = 0,7 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_1 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ Гн, а при $U = 400$ В $L_\mu = 0,9 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_1 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Как следует из рисунка, во всем диапазоне изменения выходного напряжения 0–400 В ток через лампу накачки изменился всего на 25%. Иными словами выходная вольт-амперная характеристика источника близка к характеристике источника тока. Это позволяет использовать предложенную схему практически для всех типов ламп накачки.

Заключение

1. Предложена схема поддержания разряда в лампах накачки твердотельных лазеров, обеспечивающая режим источника тока при работе под нагрузкой и высокое выходное напряжение (более 1000 В) на холостом ходу.
2. Проведен анализ электрических процессов в режимах холостого хода и под нагрузкой. Предложена математическая модель процесса и дана методика расчета параметров схемы.
3. Сформулировано условие получения максимальной частоты коммутации схемы и определены соответствующие этому условию параметры схемы.
4. По результатам моделирования построена вольт-амперная характеристика источника. Показано, что она близка к характеристике источника тока.

Авторы благодарят П.А. Гнатюка за интерес к работе и полезные замечания.

Литература

Л. Тогатов В.В., Гнатюк П.А. Высокочастотный разрядный модуль для питания ламп накачки твердотельных лазеров // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 5. – С. 89–95.

- Тогатов Вячеслав Вячеславович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, v.togatov@mail.ru
- Соложина Елена Михайловна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, elena.solojina@yandex.ru
- Сидоров Ростислав Алексеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, girmpo@yandex.ru

УДК 531.746

**МОБИЛЬНАЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ
ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ПРИВЯЗКИ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ГРУППЫ
ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ****Я.И. Биндер, В.М. Денисов, А.Е. Елисеенков, В.Г. Розенцвейн**

Рассматривается структура мобильной инклинометрической станции, выполняющей непрерывную инклинометрическую съемку взаимного положения траекторий стволов группы скважин подземной выработки, и ее алгоритмическое и программное обеспечение. Приводятся и анализируются новые технические решения, полученные при создании станции. Приводятся результаты испытаний станции в условиях рудных выработок.

Ключевые слова: геодезическая привязка, подземная выработка, инклинометрическая станция, траектория, скважина.

Введение

Разрушение пород с помощью энергии взрыва является универсальным и практически единственным высокоэффективным способом подготовки скальных горных пород к выемке. Процесс дробления горной породы зависит от большого количества факторов, связанных как со свойствами источника разрушающей энергии и самой разрушаемой среды, так и с геометрией расположения зарядов во взрываемом массиве.

Ключевым фактором, определяющим производительность труда горняков и, что еще более важно, его безопасность, является правильный выбор места закладки зарядов. Эта операция требует точного знания взаимного расположения траекторий стволов взрывных скважин для обеспечения равномерного дробления породы до необходимой крупности кусков. В противном случае, в отсутствии информации о положении истинных траекторий этих скважин, приходится проводить дополнительные буровзрывные работы в очень опасных условиях рудных завалов [1].

Следует отметить, что до последнего времени задача прецизионной и высокопроизводительной съемки взаимного положения стволов скважин, имеющих, как правило, длину, не превышающую 100 м и ориентацию, близкую к вертикальной, не находила достойного решения ни в России, ни за рубежом. Актуальность же задачи исчисляется, по крайней мере, уже двумя десятилетиями [2, 3]. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что все инклинометры для непрерывной съемки, внедренные в эксплуатацию за последние пятнадцать лет в мире, принципиально не могут обеспечить необходимую производительность процесса съемки для большой группы близко расположенных скважин (современные требования – съемка не менее 20 скважин за смену). Связано это с тем, что либо необходимы значительные затраты времени на проведение начальной выставки – на каждой скважине 30–100 мин), либо схемно-конструкторское решение инклинометров не позволяет применить непрерывный режим для стволов с такой ориентацией, и возможно лишь проведение малопродуктивного точечного компасирования.

Кроме того, существуют и другие специфические требования при решении поставленной задачи. К ним относятся: обеспечение взаимной геодезической привязки измеренной траектории скважин; существенные массогабаритные ограничения аппаратуры станции, определяемые удаленностью горных выработок от вертикальных штреков до 3000 м, отсутствием возможности транспортной доставки аппаратуры и ограниченным пространством места проведения работ; инвариантность измерительной аппаратуры станции относительно воздействия магнитных полей; автономность станции, вызванная отсутствием стационарного электропитания в большинстве горных выработок.

Известно, что для решения вышеизложенной задачи использовался инклинометр ИЭМ-Ш (шахтный), который предназначался для многоточечных измерений зенитного угла и магнитного азимута буровых скважин диаметром 42 мм и более, бурящихся из подземных горных выработок в условиях немагнитной окружающей среды. Использование такого прибора при разработке полиметаллических руд невозможно.

Имеется на рынке и непрерывный гироинклинометр (ГИ) ИГН-100/80, но его массогабаритные характеристики (вес 30 кг, диаметр 73 мм и длина 2600 мм) затрудняют использование прибора, при этом данный инклинометр – низкопроизводительный при работе на коротких скважинах, учитывая требуемое время. Практически единственные зарубежные разработчики непрерывного ГИ малого диаметра (Sugodata, USA) применяют его только на участках ствола с зенитными углами $\theta \geq 15^\circ$, а на более близких к вертикали участках, куда укладываются практически все горные выработки, используют режим малопродуктивного точечного компасирования [4].

Предлагаемые решения задачи

Накопленный за последние два года опыт при создании и выведении на рынок всезенитного, непрерывного гироинклинометра УГИ-42.03 позволил специалистам ОАО «Электромеханика» совместно с разработчиками ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» успешно решить новую задачу – разработку мобильной инклинометрической станции (МИС) для высокопроизводительной оперативной привязки

группы скважин в подземных выработках при добыче железной руды. В состав МИС вошло следующее оборудование (рис. 1): автономный скважинный прибор (СП) с центраторами, наземный прибор (НП) со встроенным компьютером, спускоподъемное устройство с датчиком глубины, устройство для геодезической привязки устьев скважин.

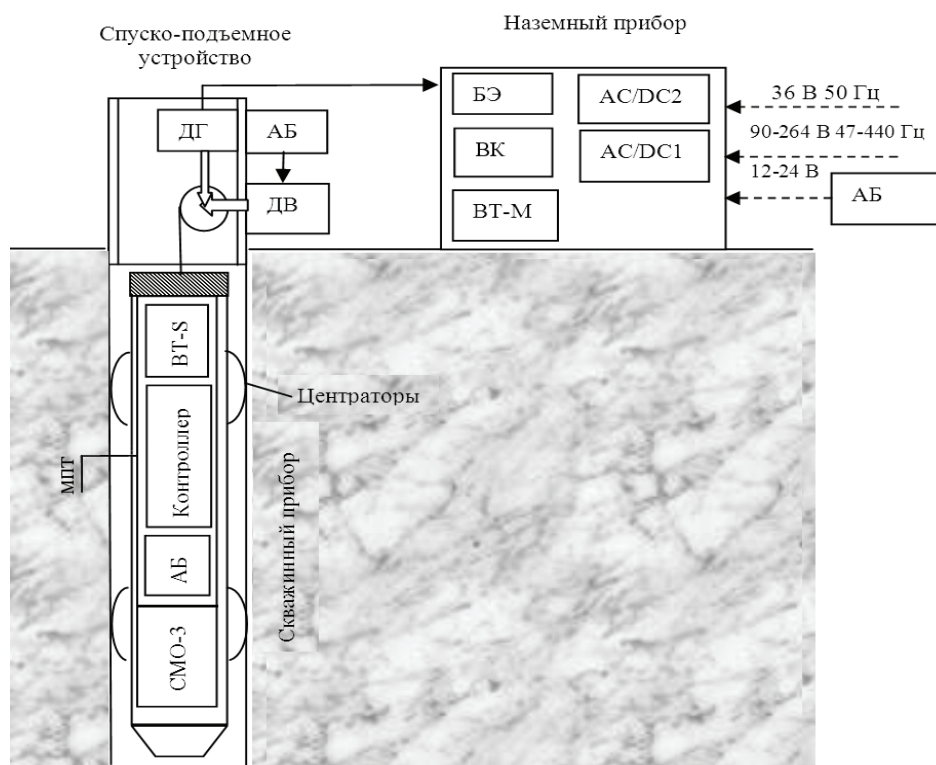


Рис. 1. Мобильная инклинометрическая станция:

АБ – аккумуляторная батарея; BT-M – Bluetooth master; BT-S – Bluetooth slave; БЭ – блок электроники; ДВ – двигатель; ДГ – датчик глубины; МПТ – модуль питания и телеметрии; ВК – встроенный компьютер; AC/DC – конвертор переменного напряжения в постоянное; СМО-3 – скважинный модуль ориентации

В ходе разработки МИС был предложен и успешно реализован целый комплекс новых алгоритмических, программных, схемно-конструктивных решений, среди которых:

- разработка автономного СП;
- использование беспроводного канала связи между СП и НП;
- создание малогабаритного спускоподъемного устройства с функциями каротажной лебедки, базирующейся на устье скважины;
- разработка единого программно-аппаратного комплекса, позволяющего оперативно обрабатывать данные непрерывных инклинометрических измерений и производить взаимную привязку группы скважин;
- разработка программного обеспечения (ПО), позволяющего анализировать проведенные измерения при спуске и подъеме СП, выбирать в зависимости от динамики прохождения ствола и характеристик скважины наиболее приемлемый алгоритм расчета ее траектории.

Конструктивные решения

За основу МИС был взят скважинный модуль ориентации УГИ-42.03 [2]. Уменьшение массогабаритных характеристик СП произведено за счет разработки нового модуля связи – модуля питания и телеметрии, обеспечивающего обмен информацией между СП и НП (длина и вес СП УГИ-42.03 – 1900 мм и 9 кг соответственно, длина и вес СП МИС – 1690 мм и 6 кг). Отличительные особенности модуля питания и телеметрии – автономное питание и беспроводная связь с НП по каналу Bluetooth – позволили:

- исключить из состава МИС грузонесущий кабель, обладающий повышенными весовыми характеристиками, заменив его на фал, совмещающий в себе максимальные разрывные нагрузки, практически нулевое удлинение под нагрузкой и минимальные диаметр и вес;
- повысить технологичность съемки траекторий скважин, операций по их привязке и определению ориентации местной системы координат относительно географической;
- повысить надежность СП и спуско-подъемного устройства.

С целью уменьшения массо-габаритных характеристик МИС было разработано специальное спуско-подъемное устройство с датчиком глубины. Особенности такого устройства – базирование непосредственно на устье скважины, как показано на рис. 1, и автономное аккумуляторное питание с быстрозъемными батареями.

Принципиальной особенностью МИС является обеспечение съемки траекторий групп скважин, для чего в его состав введено устройство геодезической привязки устьев скважин и разработано специальное алгоритмическое и программное обеспечение, состоящее из трех программ, выполняющих различные функции, но идеологически связанных в единое целое. Это программы привязки скважин, работы с инклинометром и постобработки результатов измерений.

Привязка устьев скважин производится методом триангуляции [5]. Для этого выбираются две базовые скважины и производятся замеры расстояний между осями базовых и остальных скважин (рис. 2), физически реализуемых с помощью СП со светоотражающей пластиной и центрирующего устройства с дальномером. Информация о расстояниях между скважинами автоматически заносится по каналу Bluetooth в НП. По полученным измерениям определяются координаты всех скважин в прямоугольной системе координат, одна из осей которой направлена горизонтально между осями базовых скважин, другая вертикально вниз и строится план их расположения (рис. 2). Затем с помощью точечного измерения ГИ осуществляется привязка местной системы координат к географической.

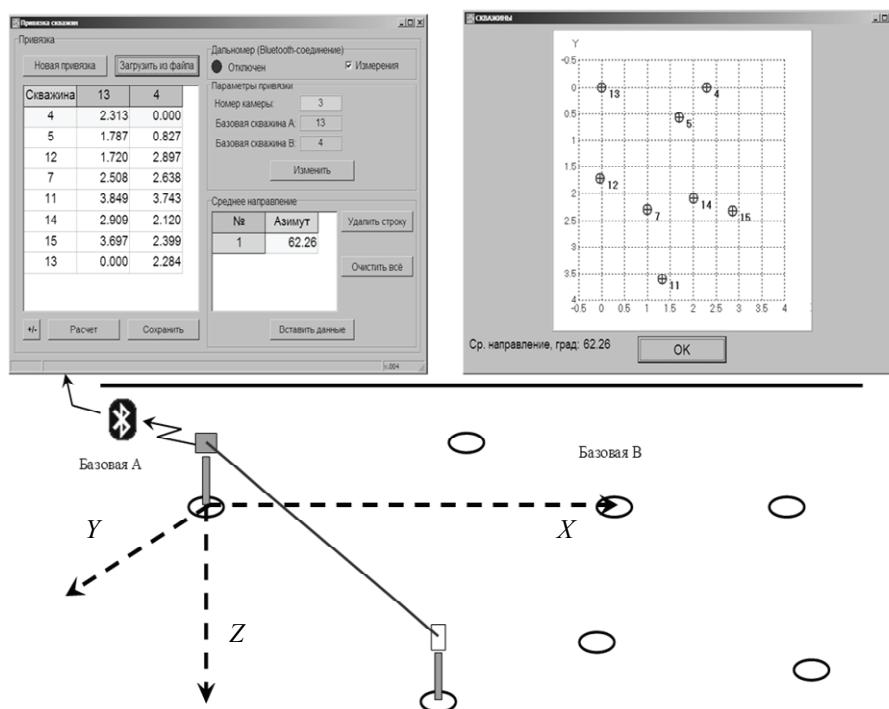


Рис. 2. Привязка устьев скважин

Управление работой ГИ осуществляется программой, позволяющей производить как точечные измерения, так и непрерывную съемку. При непрерывной съемке на устье скважины производится определение начальной ориентации СП по командам, поступающим с НП по каналу Bluetooth. При работе СП в скважине связь с прибором прерывается, и все измерения производятся автономно с записью во флэш-память. После возврата прибора на устье связь восстанавливается, и осуществляется операция завершения измерений и считывания записанных данных.

Алгоритмическое обеспечение станции

Для МИС разработаны алгоритмы и ПО, направленные на повышение точности и достоверности полученных результатов и решающие следующие задачи: контроль динамики движения СП; сведение траекторий при измерениях на спуске и подъеме; выбор алгоритма расчета траектории (рис. 3).

В СП установлены три типа чувствительных элементов (ЧЭ) – динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ), микромеханический гироскоп и триада микромеханических акселерометров, что позволяет с учетом съемок траектории на спуске и подъеме комплексировать полученные измерения [2].

В процессе работы над МИС были проведены экспериментальные исследования по динамике движения СП. Выявлено значительное превышение допустимых динамических диапазонов ЧЭ, что привело к необходимости разработки специальных центраторов и определению оптимальной скорости дви-

жения прибора по стволу рудной скважины. Для дополнительного повышения достоверности и точности результатов измерений, осуществляется анализ динамики при каждом считывании данных, записанных во флэш-память прибора. Данный анализ позволяет отдать предпочтение тем или иным алгоритмам обработки полученных данных.

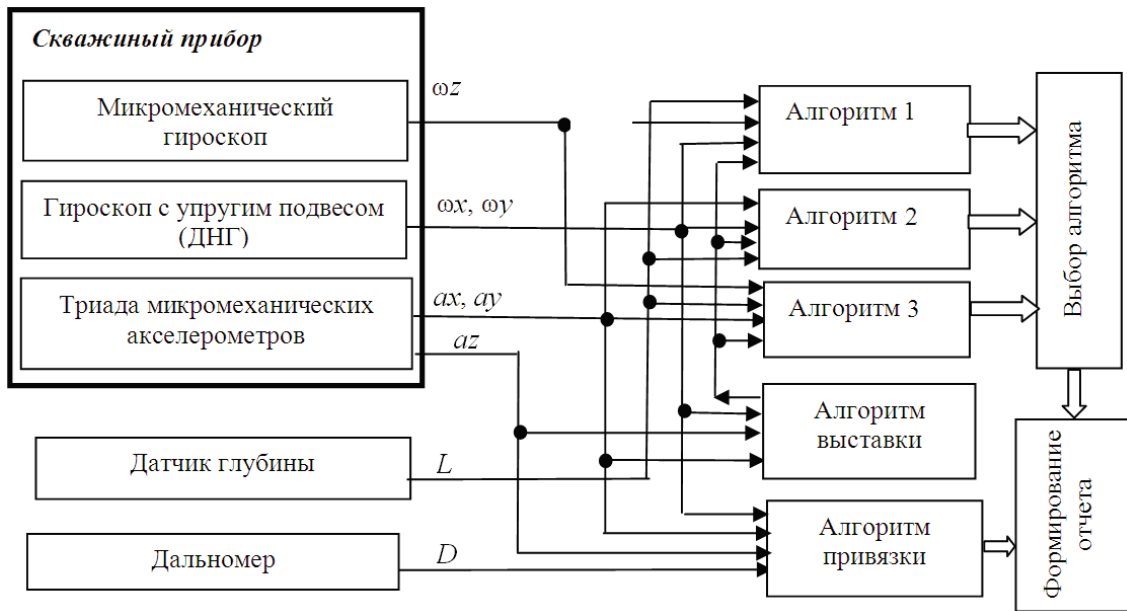


Рис. 3. Алгоритмическое обеспечение МИС

Так как при съемке во флэш-память СП записываются данные спуска и подъема, то при расчете по данным подъема уточняются данные на спуске, при этом учитывается, что ошибка определения координат ствола скважины, а также угла азимута, растет с течением времени.

Расчет траектории и ориентации скважины производится параллельно по трем алгоритмам [7]. В результате выбирается алгоритм, обеспечивающий минимальную невязку по координатам для прямого и обратного ходов. Для определения невязки вычисляется интегральный критерий, характеризующий степень различия траекторий на спуске и подъеме. На рис. 4 приведен пример зависимости одной из координат скважины от глубины на спуске и подъеме скважинного прибора.

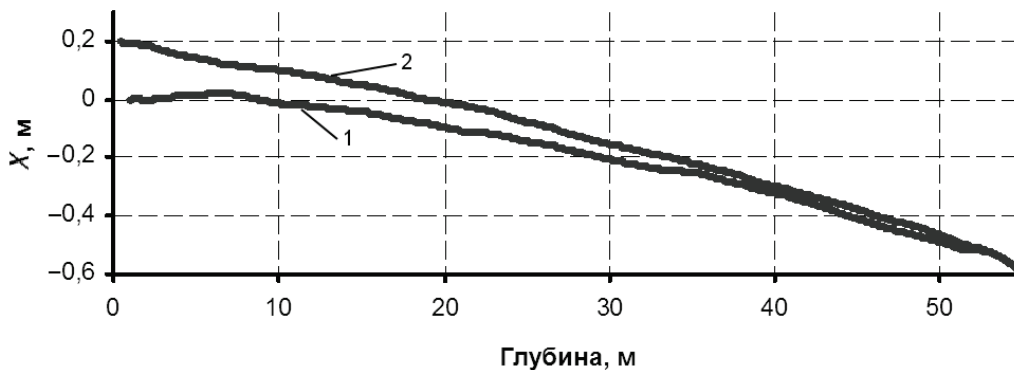


Рис. 4. Зависимость координаты X скважины от глубины на спуске (1) и подъеме (2)

Алгоритм 1. При его применении используются измерения угловых скоростей СП ω_x , ω_y , ω_z (рис. 3), на основании которых составляются уравнения, известные из теоретической механики, как уравнения Пуассона. Для получения углов ориентации производится интегрирование уравнений. Вследствие того, что значение ω_z , получаемое от микромеханического гироскопа, имеет невысокую точность (существенно меньшую, чем точности ω_x и ω_y) на устье и забое скважины проводится коррекция показаний гироскопа на 10 секундных остановках, аналогичная ZUPТ-коррекции. Данный алгоритм используется на зенитных углах меньше $1,2^\circ$.

Алгоритм 2. При его применении используются измерения ω_x и ω_y (для определения азимута). При этом зенитный угол и угол отклонителя вычисляются по показаниям акселерометров a_x и a_y (рис. 3). Данный алгоритм используется на зенитных углах, превышающих $1,2^\circ$. Потенциально данный алгоритм является самым точным, поскольку расчет производится без использования неточного значения ω_z .

Алгоритмы 1 и 2 применяются при условии отсутствия превышений динамического диапазона ωx и ωy .

Алгоритм 3. При его применении используются ωz и ax , ay – ускорения СП, полученные по данным с акселерометров (рис. 3). Применение алгоритма базируется на том, что параметры большинства взрывных скважин таковы, что азимут угла отклонителя вычисляется интегрированием ωz . Тогда искомые параметры ориентации могут быть вычислены простым перепроектированием показаний акселерометров ax и ay на соответствующие плоскости. Принципиальным является то, что в данном алгоритме не используются показания гироскопа с упругим подвесом. Данный алгоритм имеет меньшую точность, чем два предыдущих, и используется в случае превышений динамического диапазона ωx и ωy , тем не менее, возможности третьего алгоритма удовлетворяют требуемой точности.

По результатам проведения съемки траекторий группы скважин и проведенной постобработки полученных данных для потребителя выдается отчет, содержащий информацию о времени и месте проведения съемки, о взаимном расположении устьев скважин, о координатах траекторий срезов скважин с заранее выбранным шагом. Приводятся проекции траекторий скважин на горизонтальную плоскость (рис. 5) и расстояния между забоями скважин. Кроме того, ПО постобработки измеренных данных позволяет построить различные варианты зависимостей тех или иных параметров скважин от времени, глубины и т.д.

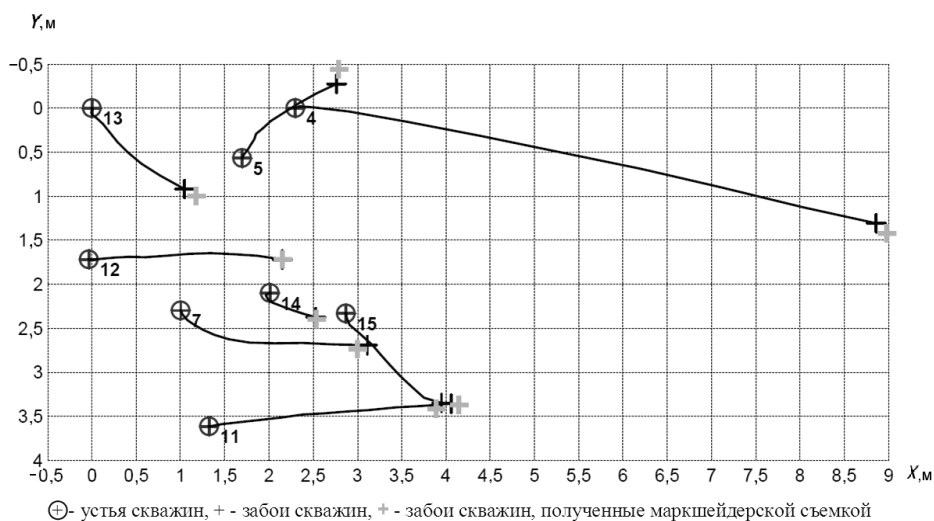


Рис. 5. Проекция траекторий скважин на горизонтальную плоскость

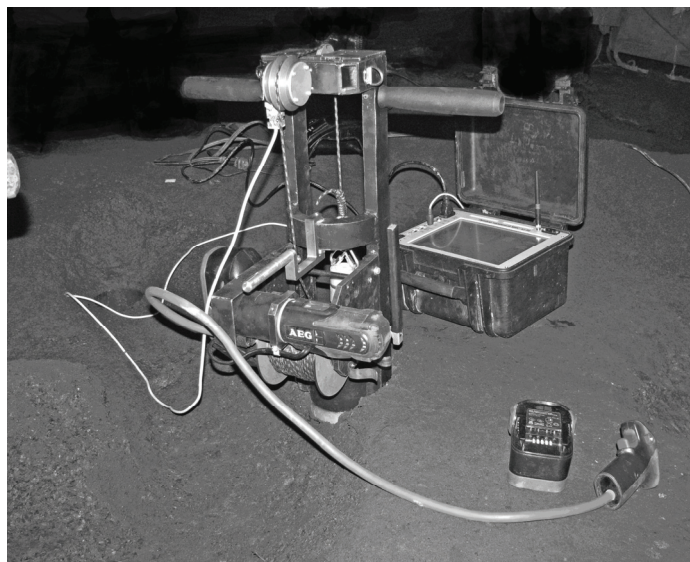


Рис. 6. Мобильная инклинометрическая станция в процессе работы

Мобильная инклинометрическая станция МИС-42.80 прошла многократные испытания в шахте рудника им. Губкина на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии в Белгородской области (рис. 6) и подтвердила не только свою работоспособность, но и заявленные точностные характеристики. Фрагменты результатов испытаний приведены на рис. 5 и в таблице. Измерения проводились на глубине 320 м на подрезанных на горизонте 370 м скважинах. Сравнительный анализ координат сква-

жин, полученных путем измерений и маркшейдерской съемки, показал максимальную невязку 17 см. Заявленная точность измерений 0,7% от глубины скважины (на 50 м – 35 см).

№ скважин	Координаты забоев скважин, м				Погрешности определения координат забоев, м	
	измеренные		контрольные		ΔX	ΔY
	X	Y	X	Y		
4	8,86	1,31	9,00	1,43	-0,14	-0,12
5	2,76	-0,28	2,80	-0,45	-0,04	0,17
7	3,11	2,69	3,00	2,75	0,11	-0,06
11	4,06	3,36	4,15	3,35	-0,09	0,01
12	2,15	1,72	2,14	1,72	0,01	0,00
13	1,04	0,92	1,15	1,00	-0,11	-0,08
14	2,53	2,37	2,53	2,37	0,00	0,00
15	3,95	3,35	3,90	3,40	0,05	-0,05

Таблица. Результаты испытаний

Проведенный анализ результатов испытаний показал, что дальнейшее уменьшение массогабаритных характеристик и энергопотребления станции, повышение ее производительности и надежности возможно за счет упрощенной выставки СП перед измерениями и использования на коротких скважинах, близких к вертикали, информации только от микромеханических ЧЭ.

Заключение

1. Состоялось внедрение в область добычи твердых полезных ископаемых метода непрерывной гироинклинометрической съемки.
2. Разработан программный комплекс, позволяющий рассматривать при измерениях совокупность отдельных скважин как единое целое, комплексировать информацию различных измерителей с целью выбора наилучшего алгоритма обработки, оперативно формировать отчет по результатам измерений.
3. Создана мобильная инклинометрическая станция, позволяющая осуществить высокопроизводительную траекторную съемку группы скважин, при этом особые условия работы во взрывных скважинах подземной выработки позволили достичь минимальных абсолютных значений погрешностей и времени замера.
4. Накопленный опыт работы с мобильной инклинометрической станцией в условиях подземной выработки позволил наметить дальнейшие пути ее модернизации, направленные на повышение производительности и технологичности при проведении траекторной съемки группы скважин.

Литература

1. Таранов П.Я., Гудзь А.Г. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Недра, 2003. – 254 с.
2. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Розенцвейн В.Г. Высокопроизводительная прецизионная инклинометрическая съемка скважин малого диаметра. Результаты практического внедрения // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 1. – С. 52–62.
3. Фрейман Э.В., Кривошеев С.В., Лосев В.В. Особенности построения алгоритмов ориентации гироскопических инклинометров на базе одноосного гиросtabilизатора // Гироскопия и навигация. 2001. – № 1. – С. 36–47.
4. Биндер Я.И. Инклинометр непрерывного действия на основе бесплатформенного гироскопа направления. Ч. I // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 12. – С. 49–53.
5. Киселев М.И., Михелев Д.Ш. Геодезия. – М.: Академия, 2009. – 384 с.
6. Лочехин А.В., Емельянцеv Г.И. Начальная выставка и калибровка бескарданного гирогоризонткомпаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 62–69.
7. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Лысенко А.С., Федорович А.Н. Об использовании различных схем гироинклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 4. – С. 53–72.

Биндер Яков Исаакович

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

Денисов Виктор Маевич

– ОАО «Электромеханика», доктор технических наук, доцент, зам. генерального директора, denvm@elmech.ru

Елисеенков Александр Евгеньевич

– ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, доцент, sasha0103@mail.ru

Розенцвейн Владимир Георгиевич

– ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, нач. группы, vrozensvein@eprib.ru

УДК 531

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

С.Е. Иванов

Рассматривается математическая модель динамической системы с тремя степенями свободы, с нелинейными правыми частями в виде многочленов до четвертой степени от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. Методом многочленных преобразований уравнения движения системы приводятся к автономному виду. Определяются существенные константы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы колебаний. Приводится алгоритм метода многочленных преобразований и алгоритмические формулы программной реализации метода.

Ключевые слова: нелинейная система с тремя степенями свободы, методы исследования нелинейных систем, установившийся режим колебаний.

Введение

Рассматриваются нелинейные колебательные динамические системы с периодическими коэффициентами [1, 2]. Динамические системы описываются системой дифференциальных уравнений шестого порядка с нелинейной частью в виде многочлена до четвертой степени относительно фазовых координат с постоянными и периодическими коэффициентами [3]. Метод многочленных преобразований, предложенный Г.И. Мельниковым, является общим методом исследования нелинейных систем с конечным числом степеней свободы [4]. В результате применения метода система преобразуется к автономному виду. Метод многочленных преобразований обеспечивает минимизацию количества параметров нелинейной динамической системы. Выделяются существенные константы, определяющие свойства динамической системы. Преобразованная система содержит на порядок меньше ненулевых коэффициентов, чем исходная. Сокращение количества ненулевых коэффициентов существенно упрощает исследование сложных нелинейных динамических систем, переходных и установившихся процессов исследуемых систем [5]. Для исследования установившихся и переходных режимов колебаний нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы приведены алгоритмические формулы для программной реализации метода и составлен пакет программ.

Метод исследования динамической системы

Рассмотрим математическую модель нелинейной динамической системы с тремя степенями свободы, с правыми частями в виде многочленов до четвертой степени относительно фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. Дифференциальные уравнения движения представлены в общем виде:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = \sum_{|\mu|=1}^4 g_{\mu} \cos(\omega t)^{\mu_1} \sin(\omega t)^{\mu_2} + \sum_{|v|=1}^4 h_v \cos(\omega t)^{v_1} \sin(\omega t)^{v_2} q_1^{v_3} q_2^{v_4} q_3^{v_5} \dot{q}_1^{v_6} \dot{q}_2^{v_7} \dot{q}_3^{v_8}, \quad (1)$$

где $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ – вектор обобщенных координат; A, B, C – матрицы третьего порядка; $\mu = (\mu_1, \mu_2)$, $v = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8)$ – векторные индексы, $|\mu| = \mu_1 + \mu_2$, $|v| = v_1 + v_2 + \dots + v_8$.

Применяется предположение, что характеристическое уравнение $\det[A\lambda^2 + B\lambda + C] = 0$ имеет три пары комплексно-сопряженных корней $\lambda_s, \bar{\lambda}_s$ с малыми отрицательными вещественными частями и компонентами вектора нелинейных частей $|g_{\mu}^s| < \varepsilon, |h_{\mu}^s| < \varepsilon$.

Приведем алгоритмические формулы метода многочленных преобразований, применимые для программной реализации метода.

Вводятся комплексно-сопряженные переменные:

$$q_0 = \exp(i\omega t), \bar{q}_0 = \exp(-i\omega t), \lambda = i\omega. \quad (2)$$

В новых переменных (2) запишем $\cos(\omega t) = \frac{1}{2}(q_0 + \bar{q}_0)$, $\sin(\omega t) = \frac{1}{2i}(q_0 - \bar{q}_0)$.

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

$$\dot{X} = PX + R, \quad (3)$$

где постоянная квадратная блочная матрица восьмого порядка имеет вид

$$P \equiv \begin{bmatrix} W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ A^{-1}H & -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A^{-1}G \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} i\omega & 0 \\ 0 & -i\omega \end{bmatrix}.$$

Линейным преобразованием

$$Y = DX \tag{4}$$

линейная часть системы (3) приводится к диагональному виду:

$$\dot{Y} = \Lambda Y + R \Big|_{X \rightarrow D^{-1}Y},$$

где

$$\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \bar{\lambda}_1, \dots, \lambda_4, \bar{\lambda}_4]. \tag{5}$$

Выполняется преобразование, содержащее многочлены четвертой степени:

$$y_s = z_s + \sum_{|v|=2}^4 a_v^s Z^v, (s = 3, \dots, 8), Z^v = z_1^{v_1} z_2^{v_2} \dots z_8^{v_8}, \tag{6}$$

где a_v^s – неизвестные коэффициенты преобразования.

Введенные комплексно-сопряженные переменные не преобразовываются $y_s = z_s$ ($s = 1, 2$).

Результатом многочленного преобразования является автономная система

$$\dot{z}_s = \lambda_s z_s + \sum_{|v|=2}^4 q_v^s Z^v, (s = 3, \dots, 8), \tag{7}$$

где q_v^s – искомые коэффициенты преобразованной системы.

Особые значения векторного индекса при фиксированном s , находятся как целочисленные неотрицательные решения двух уравнений [6]:

$$\sum_{k=1}^8 \lambda_k v_k - \lambda_s \approx 0, \sum_{k=1}^8 v_k = 2, 3, 4. \tag{8}$$

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 (8) находим следующие особые индексы:

при q_v^3 $v = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1), v = (0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0), v = (0, 0, 2, 1, 0, 0, 0, 0), v = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$,

при q_v^5 $v = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1), v = (0, 0, 0, 0, 2, 1, 0, 0), v = (0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0), v = (1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)$,

при q_v^7 $v = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 1), v = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0), v = (0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0), v = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0)$.

В преобразованной системе (7) сделаем замену переменных:

$$z_s = \rho_s \exp(i(t \text{Im} \lambda_s + \theta_s)), \bar{z}_{s+1} = \rho_s \exp(i(t \text{Im} \lambda_{s+1} - \theta_s)), s = 3, 5, 7; z_{1,2} \equiv \exp(\pm i t \omega). \tag{9}$$

В результате получаем дифференциальное уравнение

$$\dot{\rho}_s = \text{Re}(\lambda_s) \rho_s + \text{Re}(\psi_s), \dot{\theta}_s = \rho_s^{-1} \text{Im}(\psi_s), s = 3, 5, 7. \tag{10}$$

В нерезонансном случае [7] экспонента не входит в систему (10), так как ее степень равна нулю. Стационарные решения можно найти, приравняв к нулю правые части системы (10).

Получив решение преобразованной системы и подставив его в формулы замены переменных (9), найдем вектор Z . Вектор Y (5) выражается через вектор Z по формулам многочленной замены (6). Решение системы (1), вектор X , выражается через вектор Y по формулам замены, обратной линейной (4): $X = D^{-1}Y$.

Получены алгоритмические формулы для расчета коэффициентов преобразования и преобразованной системы:

$$\sum_{|v|=2}^4 q_v^s Z^v + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^s Z^v (\sum_{k=1}^8 \lambda_k v_k - \lambda_s)) + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^s Z^v \sum_{k=3}^8 v_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^4 q_\mu^k Z^\mu) = R(Z), (s = 3, \dots, 8). \tag{11}$$

Приравнявая в (11) коэффициенты при одинаковых степенях Z , получаем систему алгебраических уравнений для определения неизвестных коэффициентов преобразования и преобразованной системы.

В форме символьных преобразований многочленов разработана программа для исследования методом многочленных преобразований нелинейных систем с тремя степенями свободы.

Заключение

Приводится схема метода многочленных преобразований для исследования нелинейных динамических систем с тремя степенями свободы. Получены алгоритмические формулы метода, удобные для составления программ с использованием символьных вычислений. Разработан пакет программ для исследования методом нелинейных задач. Методом многочленных преобразований нелинейная периодическая система приводится к автономному виду. Метод позволяет получить качественные и количественные характеристики динамических систем, исследовать установившиеся и переходные режимы динамических систем, находящихся в условиях периодического внешнего воздействия. Определены существенные динамические константы динамической системы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы движения системы.

Работа выполнена при финансовой 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. О реализации численно-аналитического метода многочленных преобразований на компьютере // Современные технологии: Труды молодых ученых ИТМО. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. – С. 138–141.
5. Кузнецов А.П. Нелинейные колебания: Учебное пособие. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. – 292 с.
6. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. – Л: Машиностроение, 1975. – 198 с.
7. 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 государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, SIVanov@mail.ifmo.ru

УДК 621.7:589.011.46

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ С.С. Прокшин, Е.В. Шалобаев

Предложена конструкция редуктора с волновой передачей с гибкими подшипниками, которая позволяет дополнительно уменьшить массогабаритные параметры электропривода запорной трубопроводной арматуры.

Ключевые слова: электропривод, редуктор, волновые передачи, гибкие подшипники, крестовина.

Введение

В настоящее время развернулись широкие работы по модернизации действующих и строительству новых трубопроводов (большой частью нефте- и газопроводов, а также систем паропроводов и охлаждения на АЭС) [1–7]. Одна из задач, которую при этом необходимо решить – создать современную инфраструктуру, которая включает в себя разнообразные запорные устройства. Одним из основных элементов последних являются электроприводы трубопроводной арматуры (ТПА).

Ведущие производители многооборотных электроприводов ТРА применяют в своих конструкциях различные схемы расположения осей исполнительного двигателя и выходного звена электропривода, которые во многом обусловлены типом применяемого редуктора и исполнительного двигателя, а также требованиями экономики и эргономики [2].

Схема с пространственным расположением осей исполнительного двигателя и выходного звена электропривода широко применяется в конструкциях электроприводов таких фирм как ГЗ «Электропривод», «Тулаэлектропривод» (Россия), AUMA (Германия), «ЗРА Реску» (Чешская республика). Применение данной схемы обеспечивает минимальный размер по высоте, однако длина и ширина электропривода оказываются значительными [3–7].

Тулским государственным университетом совместно с ОАО «Мичуринский завод «Прогресс» разработана конструкторская документация на многооборотный интеллектуальный электропривод запорной ТПА с соосным (аксиальным) расположением осей [8] исполнительного двигателя и выходного звена электропривода 7МРЭП-110-00/280. Электропривод построен на базе многопоточного планетарного редуктора [9] и малогабаритного вентильного электродвигателя с постоянными магнитами.

Ведутся работы по модернизации и оптимизации конструкции не только собственно зубчатых передач, но и опор [10–11].

Целью данной работы является выработка мер по повышению эффективности применения ряда конструктивных приемов, позволяющих уменьшить массогабаритные характеристики редуктора и привода в целом за счет опор.

Гибкие подшипники – конструктивный прием, снижающий массогабаритные характеристики

Одним из дальнейших путей оптимизации конструкций редукторов с волновыми зубчатыми передачами (ВЗП) электропривода запорной ТПА по критериям минимальной массы и габаритов в диапазоне вращающих моментов 7000–15000 Н·м является использование гибких подшипников.

При использовании кулачкового генератора, который имеет форму эллипса, возможна ситуация, когда применение подшипников [12], производимых в соответствии с техническими требованиями по [13], приводит к неоправданному увеличению габаритов передачи: интервал диаметров наружных колец стандартных подшипников неприемлемо велик – подшипники № 824 и № 830 отличаются по внешнему диаметру на 40 мм, а подшипники № 848 и № 860 – на 80 мм. Устранение такого ограничения привело к следующему результату.

На рис. 1, 2, показана конструкция гибкого подшипника генератора с телами качения цилиндрической формы (например, роликами из шарикоподшипниковой стали ШХ 15, поставляемыми в виде свободных деталей или игольчатыми роликами по [14]) в двух видах – вдоль и перпендикулярно оси вращения.

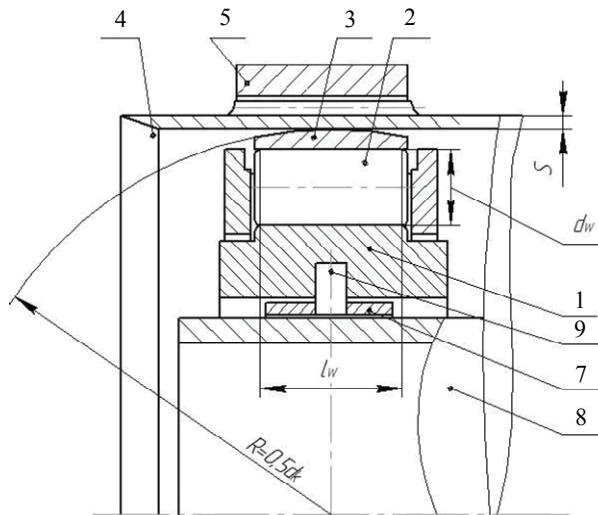


Рис. 1. Вид волнового редуктора вдоль оси вращения

Кулачок 1 взаимодействует с телами качения – роликами 2, образуя с ними линейный контакт. Ролики 2 перекатываются по цилиндрической поверхности кольца 3, имеющего внешнюю сферическую форму с радиусом $R = 0,5d_k$, сопряженную с внутренней поверхностью гибкого колеса 4 (d_k – диаметр внутреннего цилиндра колеса 4 в недеформированном состоянии). Ролики (рис. 2) размещены в гнездах сепаратора, разъемного в осевом направлении и состоящего из обоймы 6 и кольца 7, охватывающих кулачок 1 с обеих сторон.

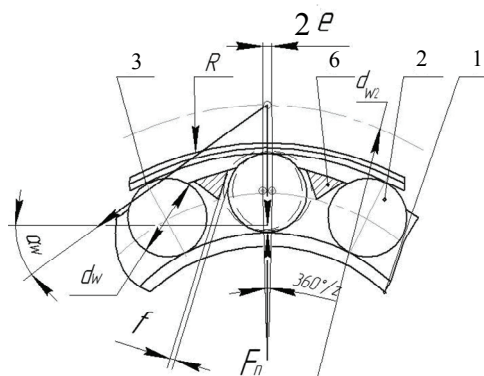


Рис. 2. Вид волнового редуктора в плоскости, перпендикулярной оси вращения

Для двухволнового генератора нагрузка F_n , приходящаяся на один внешний контакт ролика с поверхностью кулачка 1, определяется по формуле

$$F_n = 4,37 F_\tau \operatorname{tg}(\alpha_w) / 2z = 4,37 \cdot 2000 T_q \operatorname{tg}(\alpha_w) / d_{w2} z, \quad (1)$$

где d_{w2} – начальный диаметр эпицикла 5 м; z – число роликов в гибком подшипнике; α_w – угол зацепления в ВЗП; T_q – момент на гибком колесе 4 Н·м; F_τ – допустимая сила, направленная по касательной (Н).

Используем формулу Герца для линейного контакта, представленную в следующем виде:

$$\sigma_n = 0,148 (E_{\text{пр}} F_n / l_w \rho_{\text{пр}})^{0,5}. \quad (2)$$

Определяем относительную длину Ψ_l и относительный диаметр Ψ_d ролика, средний диаметр кулачка генератора D_m , приведенный радиус кривизны в точке контакта ролика с поверхностью кулачка генератора $\rho_{\text{пр}}$ по формулам (3–6):

$$\Psi_l = l_w / d_w \quad (3)$$

$$D_m = d_k - 2(S + d_w), \quad (4)$$

$$\rho_{\text{пр}} = \rho_w \rho_k (\rho_w + \rho_k). \quad (5)$$

Подставляя в формулу (2) выражения (1), (3)–(5), получаем формулу для диаметра тела качения – ролика в виде

$$d_w = 3300 (T_q \operatorname{tg}(\alpha_w) / \Psi_l)^{0,5} / d_{w2} \sigma_{\text{нр}}, \quad (6)$$

где $E_{\text{пр}}$ – приведенный модуль упругости (принимая $E_{\text{пр}} = 0,215 \cdot 10^6$ МПа); S – толщина гибкого колеса (указана на рис. 1); $\rho_w = 0,5d_w$ – радиус тела качения; $\rho_k = 0,5d_k$ – радиус кольца; $k = 3300 (\text{Н} \cdot \text{мм})^{0,5}$ – размерный коэффициент. Допускаемое контактное напряжение $\sigma_{\text{нр}}$ определяется так же, как для обычных подшипников качения [15].

Важным элементом конструкции подшипника является сепаратор, определяющий упорядоченное движение роликов по эллиптической поверхности кулачка генератора 1. Каждый ролик при прохождении по кулачку движется с переменной скоростью и совершает колебательное движение относительно выбранного «нулевого» положения в гнезде сепаратора на величину $\pm e$. Это явление может быть компенсировано зазорами f (рис. 2).

В реализованной конструкции зазор f соответствует величине деформирования гибкого колеса, сепаратор выполнен из углеродистой стали. При радиусе $R_m \approx 120$ мм подшипник со стандартными роликами ($d_w = 25$ мм; $L = 40$ мм) показывает достаточную нагрузочную способность при $T_q = 15000$ Н·м с генератором, содержащим 24 ролика.

Заключение

Сравнение предлагаемой конструкции с аналогами показывают ее высокую эффективность. В частности, приводы с червячной передачей фирмы ROTORK и приводы типа ЭВИМТА допускают удельный момент 9,4–19 Н·м/кг, тогда как предлагаемый привод – 100–120 Н·м/кг, т.е. имеет десятикратное преимущество.

Объемные параметры предлагаемого волнового редуктора относительно классических схем, изложенных в трудах проф. Е.Г. Гинзбурга, уменьшены на 15–25% в основном за счет изменения конструкции гибкого колеса – перехода от асимметричной относительно плоскости, перпендикулярной оси вращения, конструкции типа «стакан» к симметричной типа «труба». При этом уменьшается длина гибкого колеса по оси. Передача движения от колеса к валу происходит за счет четырех пальцев (своеобразных направляющих типа «крестовина»).

Объемные характеристики привода определяются в основном размерами механизма ручного дублера.

Литература

1. Йонатис Р.Р. Перспективные требования к модернизации трубопроводной арматуры для АЭС // Арматуростроение. – 2004. – № 1. – С. 13–15.
2. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры: промышленная трубопроводная. Конструирование трубопроводной арматуры. 5-е изд. – М.: ЛКИ, 2008. – 416 с.
3. Гольдфарб В.И., Трубочев Е.С. Что делать и чего не делать при выборе и проектировании редукторов ТПА // Арматуростроение. – 2010. – №1. – С. 30–35.
4. Каталог продукции. Приводы трубопроводной арматуры. – Ижевск: НПП «Механик», 2008. – 23 с.
5. Мозжечков В.А. Третье поколение тульских электроприводов для атомных станций – серия ЭП 4 // Арматуростроение. – 2010. – № 2. – С. 82–85.
6. Гольдфарб В.И., Главатских Д.В., Трубочев Е.С., Кузнецов А.С., Иванов Д.Е., Лукин Е.В., Пузанов В.Ю. Спиroidные редукторы трубопроводной арматуры. – М.: Вече, 2011. – 222 с.
7. Итбаев В.К., Прокшин С.С., Громаковский Д.Г., Васильев А.В. Волновая зубчатая передача в электроприводах трубопроводной арматуры // Вестник СГАУ им. С.П. Королева. – 2009. – № 4. – С. 123–127.

8. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С. Оптимизация габаритов соосных схем редукторов // XXXII неделя науки СПбГУ. 24–29 ноября 2003 г. Материалы межвузовской конференции. – СПб: СПбГУ, 2004. – С. 113–115.
9. Сидоров П.Г., Пашин А.А., Плясов А.В. Многопоточные зубчатые передачи: структура, образование, кинематические и силовые связи, классификация и перспективы применения // Приводная техника. – 2010. – № 4. – С. 25–30.
10. Шалобаев Е.В. Модернизированные редукторы отечественного производства // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел, 2010. – № 6/2. – С. 105–115.
11. Прокопенко В.А., Чернов И.А. Динамика шпиндельных гидростатических подшипников при использовании диафрагменных регуляторов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3. – С. 57–61.
12. ГОСТ 23179-78. Подшипники гибкие шариковые радиальные. – Введ. 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 118 с.
13. ГОСТ 520-2002. Подшипники качения. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2003. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 70 с.
14. ГОСТ 6870-81. Подшипники качения. Ролики игольчатые. Технические условия. – Введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.
15. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2 кн. Кн. 2 / В.В. Алисин, Б.М. Асташкевич, Э.Д. Браун и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.

Прокин Сергей Сергеевич

– Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), кандидат технических наук, доцент, okmim@ugatu.ac.ru

Шалобаев Евгений Васильевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, профессор, директор Академии методов и техники управления, shalobaev47@mail.ru

УДК 531.383-11:531.714.7

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ О ЗАЗОРЕ

Р.Г. Люкшонков, Н.В. Моисеев

Рассмотрена структурная схема дифференциального емкостного датчика перемещений подвижной массы микромеханического гироскопа. Отличительной особенностью датчика является наличие в схеме дополнительного сигнала для компенсации изменений зазора между измерительными электродами и инерционным телом, связанных с влиянием внешних воздействий. Представлены экспериментальные результаты работы датчика перемещений.

Ключевые слова: дифференциальные емкостные датчики, микромеханические инерциальные датчики, компенсация внешних воздействий, межэлектродный зазор.

Введение

Дифференциальные емкостные датчики перемещений предназначены для преобразования одной физической величины, емкости, в другую, например, в напряжение. Они являются входной частью различных микромеханических устройств: гироскопов, акселерометров, датчиков давления, различных сенсоров, емкостных микрофонов, т.е. устройств, в которых используется емкостной съем информации.

Рассмотрим одно из вышеперечисленных устройств – микромеханический гироскоп (ММГ), у которого инерционное тело (ИТ) закреплено на упругом подвесе. Конструкция ММГ наиболее чувствительна к таким механическим воздействиям, как линейные вибрации, удары и ускорения вдоль оси первичных колебаний, и к изменению температуры. Перечисленные внешние воздействия приводят к изменению зазора между измерительными электродами, расположенными по оси вторичных колебаний, и ИТ. При этом изменяются характеристики датчиков угла и датчиков момента, в частности, их коэффициенты передачи. Это приводит к изменению масштабного коэффициента и смещению нуля, а также влияет на величину отрицательной жесткости и квадратурную помеху, что, в свою очередь, приводит к появлению ошибок измерения в выходном сигнале ММГ.

Проведенный анализ рынка показал, что в настоящее время емкостные датчики перемещений выпускают такие фирмы производители, как, например, «Analog Devices, Inc», «MicroSensors, Inc» и «Хе-тис». Но выполняются они по схеме, в которой отсутствует алгоритм измерения зазора.

Известны различные способы уменьшения влияния изменений межэлектродного зазора. В [1] предложено решение для гироскопов прямого типа преобразования, заключающееся в измерении суммы токов, протекающих через электроды дифференциального емкостного датчика для выделения информации о зазоре, и в использовании полученного сигнала для поддержания постоянной амплитуды колебаний по первичной оси. Однако такой схемы компенсации изменения зазора в ММГ замкнутого типа не-

достаточно, так как от величины зазора зависят моменты, приложенные к силовым электродам по оси вторичных колебаний, следовательно, и коэффициенты передачи этих электродов.

Цель настоящей работы заключается в разработке структуры дифференциального емкостного датчика перемещений, особенностью которого является наличие дополнительного выходного сигнала, пропорционального зазору между измерительными электродами и ИТ и анализе возможности использования этого дополнительного сигнала для повышения точности микромеханических датчиков.

Оценка влияния внешних воздействий на параметры микромеханического гироскопа

Теоретическое обоснование. Для оценки влияния внешних воздействий на различные параметры ММГ в качестве объекта исследования был выбран гироскоп RR-типа разработки ЦНИИ «Электроприбор» [2]. Конструктивная схема и принцип действия поясняются рис. 1.

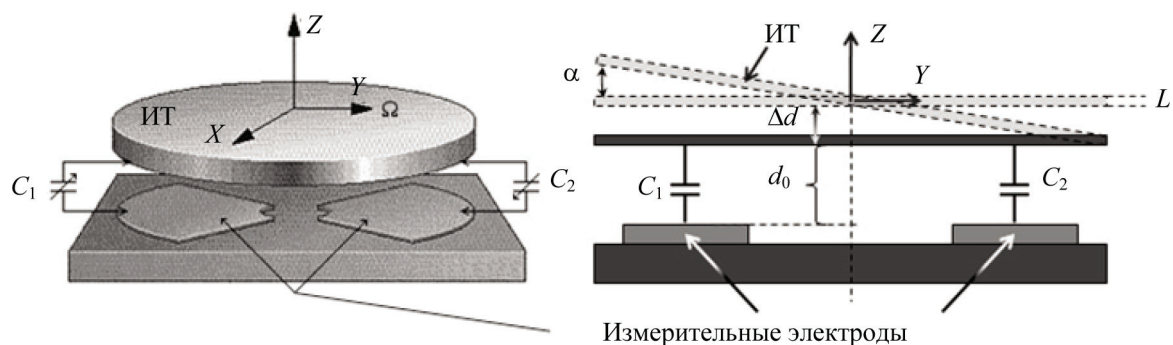


Рис. 1. Конструктивная схема ММГ

Инерционное тело на упругом подвесе под управлением системы разгона совершает колебательные движения вокруг оси первичных колебаний Z. При появлении угловой скорости основания Ω относительно оси чувствительности Y возникают моменты сил Кориолиса, что вызывает вторичные угловые колебания ИТ вокруг оси X. При отклонении ротора на угол α , пропорциональный действующей угловой скорости, будут изменяться расстояния между измерительными электродами и ИТ. Воздействие таких внешних факторов, как температуры, вибрации, линейных ускорений и давления, будет приводить к изменению первоначального зазора d_0 на величину Δd .

Другими словами, при изменении величины зазора один и тот же наклон ротора будет вызывать различные изменения емкостей, что приведет к изменению масштабного коэффициента датчиков угла и момента. Для этого необходимо компенсировать это изменение, чтобы масштабный коэффициент датчиков оставался постоянным.

Для электродов, имеющих форму ограниченного сектора (рис. 2), емкости C_1 и C_2 могут быть определены по формулам

$$C_1(\alpha, \Delta d) = \varepsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) + r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr,$$

$$C_2(\alpha, \Delta d) = \varepsilon_0 \cos(\alpha) \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\Psi_{\min}}^{\Psi_{\max}} \frac{r}{(d_0 + \Delta d) - r \cos(\Theta) \sin(\alpha)} d\Theta dr,$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ [Ф/м] – электрическая постоянная; α – угол поворота ИТ вокруг вторичной оси, [рад]; d_0 – зазор между ИТ и измерительными электродами в нейтральном положении, [м]; Δd – изменение зазора, [м]; R_{\max} и R_{\min} – соответственно внутренний и наружный радиусы рассматриваемого электрода, [м]; Ψ – угол сектора электрода, [град].

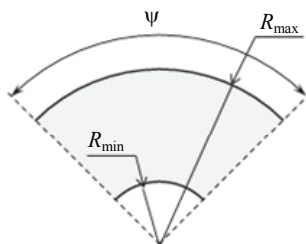


Рис. 2. Форма измерительных электродов

Для того чтобы оценить влияние линейных ускорений на изменение зазора, можно воспользоваться вторым законом Ньютона и законом Гука:

$$(K_{\text{мех}0z} - K_{\text{эл}})\Delta d = ma_{0z},$$

где m – масса ИТ, [кг]; a_{0z} – действующее ускорение вдоль оси Z , [$\text{м}/\text{с}^2$]; $K_{\text{мех}0z}$ – линейная механическая жесткость вдоль оси Z , [Н/м]; $K_{\text{эл}}$ – электростатическая жесткость, [Н/м].

В табл. 1 приведена зависимость изменения зазора от действующего ускорения. Например, для зазора $d_0 = 2$ мкм при воздействии ускорения, равного $300g$, зазор изменится на $0,6$ мкм, что приведет к изменению масштабного коэффициента датчика угла и масштабного коэффициента гироскопа на 30% .

Линейное ускорение вдоль оси Z , $\text{м}/\text{с}^2$	Изменение зазора, мкм
10g	0,023
50g	0,115
300g	0,69

Таблица 1. Зависимость изменения зазора от действующего ускорения

На величину зазора влияет и температура, так как ее изменение приводит к изменению размеров ИТ. Используя коэффициент расширения кремния ($\alpha_L = 2,33 \times 10^{-6} \text{ 1}/^\circ\text{C}$) и толщину ИТ ($L = 60$ мкм), можно определить линейное расширение материала при изменении температуры ΔT (табл. 2):

$$\Delta L = \alpha_L L \Delta T.$$

Изменение температуры, $^\circ\text{C}$	Расширение ИТ, нм
5	0,7
20	2,8
30	4,2

Таблица 2. Зависимость расширения ИТ при изменении температуры

Экспериментальные исследования. Для подтверждения теоретических обоснований были проведены экспериментальные исследования гироскопа ММГ-ЭПТРОН. Выходной сигнал записывался при неподвижном основании. При обработке полученной информации с помощью метода вариации Аллана была получена нестабильность смещения нуля $5 \text{ }^\circ/\text{ч}$ (рис. 3, а). При испытании на вибростенде (при действии вибрации с увеличивающейся частотой в диапазоне $10\text{--}3000\text{Гц}$ и амплитудой $2g$) на некоторых образцах наблюдались изменения выходного сигнала гироскопа (рис. 3, б). Можно предположить, что это изменение связано с изменением зазора под действием вибраций.

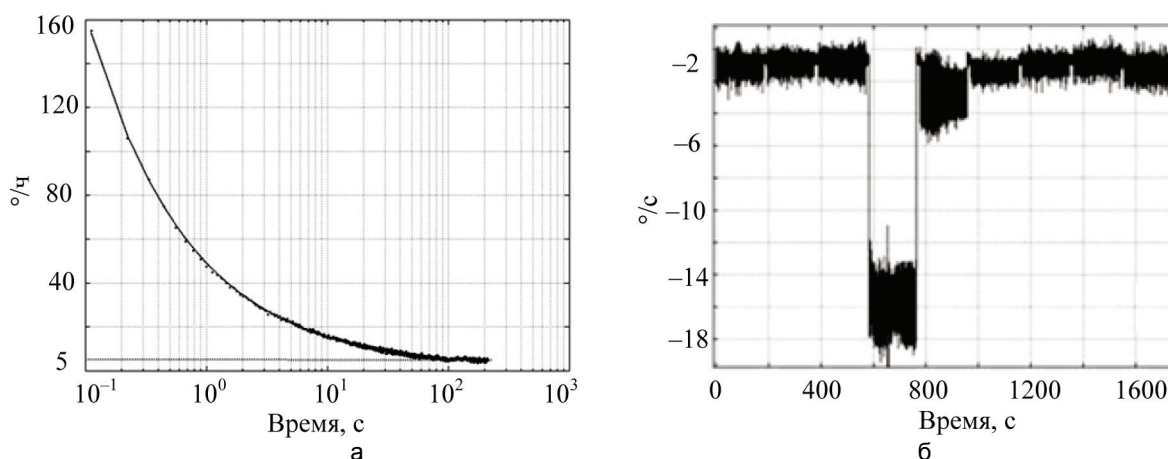


Рис. 3. Результаты испытаний: при неподвижном основании (а); при воздействии вибраций вдоль оси первичных колебаний (б)

Структурная схема дифференциального емкостного датчика перемещений с дополнительным выходом об изменении зазора

В микромеханических датчиках прямого преобразования для решения задачи компенсации предлагается алгоритмический подход. Для этого необходимо измерять не только дифференциальное изменение емкости, но и синфазное. При этом предлагается изменить существующую структурную схему

преобразователя (см. рис. 4). На измерительные емкости C_1 и C_2 , которые представляют собой емкостной мост, с генератора сигнала (ГС) подается напряжение, изменяющееся по гармоническому закону. При этом через емкости будут протекать токи I_1 и I_2 , которые состоят из двух компонент:

$$I_1 = I(C_0) + I(\Delta C),$$

$$I_2 = I(C_0) - I(\Delta C),$$

где $I(C_0)$ – ток, пропорциональный величине зазора; $I(\Delta C)$ – ток, определяемый полезным изменением емкости. Эти токи с помощью трансрезистивных усилителей К1 и К2 преобразуются в напряжения U_1 и U_2 соответственно, которые также состоят из двух компонент $U(C_0)$ и $U(\Delta C)$.

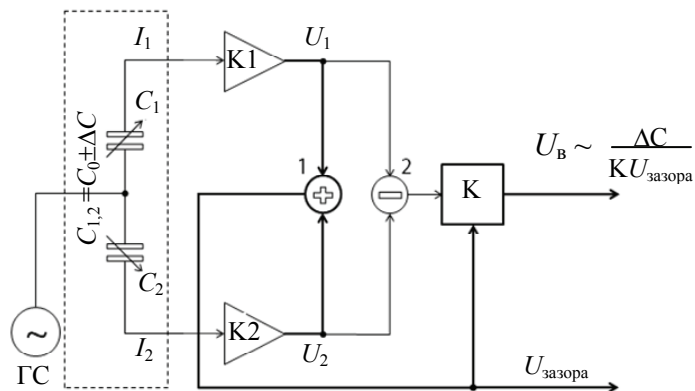


Рис. 4. Структурная схема дифференциального емкостного датчика

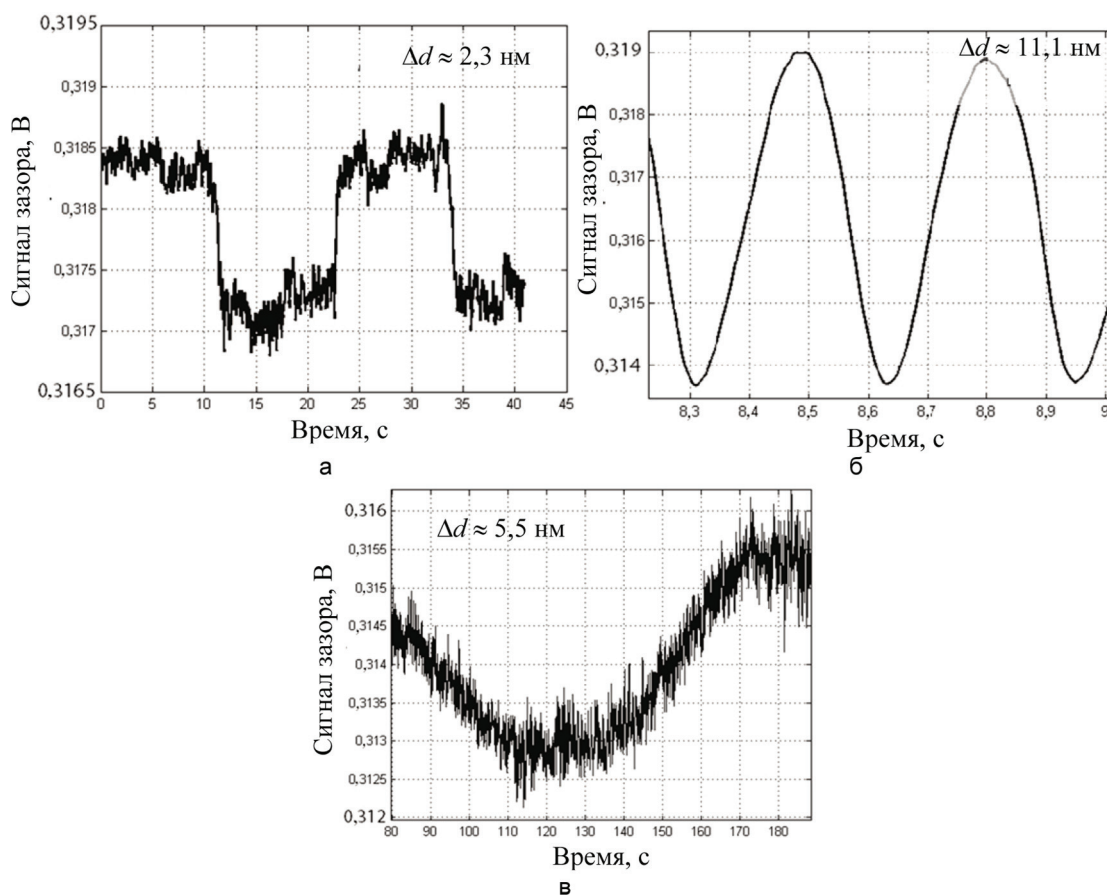


Рис. 5. Зависимость сигнала об изменении зазора при влиянии: ускорения $\pm g$ (а); вибрации $\pm 2,5 g$ с частотой 3 Гц (б); изменения температуры на 30°C (в)

После вычитания в точке 2 напряжение будет равно

$$U_1 - U_2 = (U(C_0) + U(\Delta C)) - (U(C_0) - U(\Delta C)) = 2U(\Delta C).$$

Но, так как при изменении зазора изменяется коэффициент преобразования датчика угла, то разность напряжений будет зависеть и от величины зазора, которую можно определить, если сложить напряжения U_1 и U_2 в точке 1:

$$U_1 + U_2 = 2U(C_0).$$

Полученное напряжение зависит только от компоненты, пропорциональной величине зазора. Выходной сигнал дифференциального емкостного датчика определяется отношением сигнала в точке 2 к сигналу на выходе сумматора 1 (блок компенсации К). При этом полученный выходной сигнал не зависит от зазора.

Экспериментальные исследования емкостного датчика подтвердили эффективность предложенного решения. На рис. 5 показаны сигналы, пропорциональные изменению зазора при воздействии вибраций и температуры. При изменении действующего ускорения вдоль оси Z с $+g$ на $-g$ зазор изменился примерно на 2,3 нм; при действии вибрации с частотой 3 Гц и амплитудной 2,5 g изменение составило 11,1 нм; при непосредственном нагреве чувствительного элемента на 30°C изменение составило 5,5 нм.

Использование информации об изменении зазора в устройствах компенсационного типа

В случае, когда микромеханические датчики работают по принципу компенсации входного воздействия, необходимо предпринимать дополнительные меры, так как при изменении зазора изменяются коэффициенты передачи силовых электродов.

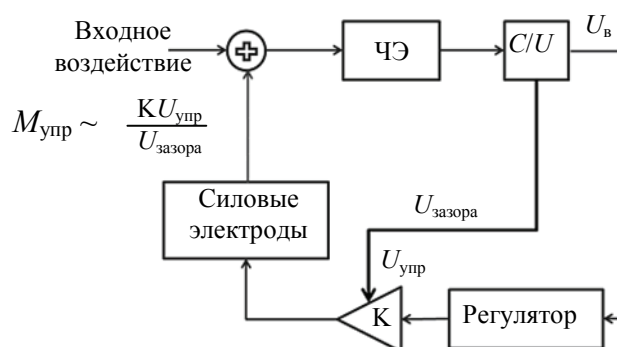


Рис. 6. Использование сигнала в датчиках компенсационного типа

На рис. 6 приведена структурная схема датчика с обратной связью [3], включающая: чувствительный элемент ЧЭ, датчик перемещений с дополнительным выходом об изменении зазора, регулятор и силовые электроды, на которых создается момент управления $M_{упр}$.

Изменение коэффициентов передачи силовых электродов при постоянном входном воздействии приводит к изменению сигнала управления $U_{упр}$, который является информационным, и появлению ошибки измерения.

С помощью дополнительного сигнала, пропорционального изменению зазора, и блока компенсации К в обратной связи датчика поддерживается постоянный коэффициент передачи силовых электродов. В этом случае масштабный коэффициент датчика не зависит от зазора.

Заключение

В работе экспериментально была получена численная оценка влияния линейных ускорений, вибраций и температуры на изменение величины зазора и масштабного коэффициента гироскопа. Предложенная структурная схема дифференциального емкостного датчика перемещений позволяет выделить информацию об изменении зазора и использовать ее для коррекции масштабного коэффициента датчиков разомкнутого типа и датчиков компенсационного типа.

Литература

1. Патент РФ № 2289789, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Устройство измерения перемещения подвижной массы микромеханического гироскопа по оси первичных колебаний / Некрасов Я.А.; заявитель ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2005130466/28; заявл. 23.09.05; опубл. 20.12.06, Бюл. № 35. – 8 с.

2. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
3. Естифеев М.И., Розенцвейн Д.В. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4(68). – С. 46–50.
4. Патент РФ № 2393428, МПК G 01 C 19/56, G 01 P 9/04. Микромеханический гироскоп компенсационного типа / Некрасов Я.А., Моисеев Н.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2008143288/28; заявл. 28.10.08; опубл. 27.06.10, Бюл. № 18. – 8 с.

Люкшионков Роман Геннадьевич – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер, lukroma@yandex.ru
Моисеев Николай Владимирович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ведущий инженер, elmon@nwgsm.ru

УДК 531.383-11:531.714.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

М.И. Евстифеев, Д.П. Елисеев, А.С. Ковалев, Д.В. Розенцвейн

Приведены результаты исследования динамики чувствительного элемента микромеханического гироскопа. Показано изменение характеристик прибора в зависимости от инерционных воздействий и от величины инструментальных погрешностей, таких как статический и динамический дисбаланс и неравножесткость. Выполнены экспериментальные исследования поведения микромеханического гироскопа на центрифуге и вибрирующем основании, подтвердившие полученные аналитические зависимости.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, упругий подвес, дисбаланс, неравножесткость, вибрация.

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) представляют собой миниатюрные датчики угловой скорости, которые обычно используются на высокоманевренных объектах и устанавливаются без специализированных амортизирующих средств, например, в автомобильной промышленности [1].

Принцип работы большинства ММГ аналогичен осцилляторным вибрационным гироскопам [2]. Схема чувствительного элемента (ЧЭ) и общий вид ММГ разработки ЦНИИ «Электроприбор» показаны на рис. 1. Упругие элементы и ротор в виде диска диаметром 3 мм и толщиной 60 мкм выполнены из монокристаллического кремния, а сам ММГ имеет размеры 50×50×18 мм [3]. При наличии относительных первичных угловых колебаниях ротора γ по оси OZ , возбуждаемых электростатическим двигателем, и переносной угловой скорости Ω основания по оси OY силы Кориолиса обуславливают возникновение вторичных угловых колебаний α по оси OX , измеряемых емкостными датчиками угла, расположенными под диском (рис. 1, а).

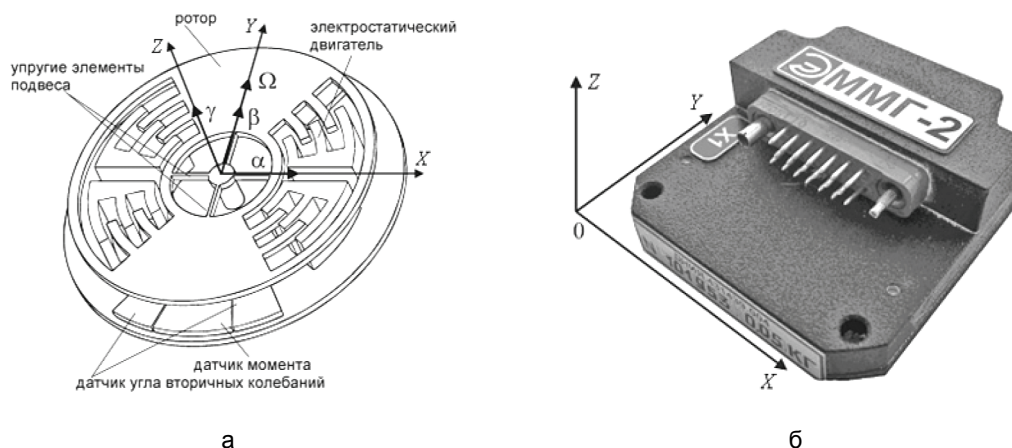


Рис. 1. Схема (а) и общий вид датчика ММГ (б)

При установке ММГ на подвижное основание поступательные и угловые вибрации, а также постоянное ускорение оказывают влияние на изменение характеристик прибора вследствие наличия в конструкции статических и динамических дисбалансов, неравножесткости упругого подвеса, перекосов и прочих технологических погрешностей, а также вследствие конечной жесткости элементов конструкции, включая упругий подвес. Таким образом, исследование динамики ММГ и экспериментальная проверка теоретических положений представляется актуальной задачей.

Уравнение динамики ММГ

В настоящее время составлено большое количество математических моделей ЧЭ ММГ как с поступательными, так и вращательными движениями ротора [2, 4]. На основании и в развитие существующих моделей обобщенное уравнение динамики вращательного движения ротора с точностью до величин второго порядка малости в тензорной форме может быть записано в виде

$$\mathbf{J}\ddot{\vec{\theta}} + \mathbf{D}\dot{\vec{\theta}} + \mathbf{C}\vec{\theta} = \vec{M} + \vec{M}_d - \dot{\vec{\theta}} \times (2\mathbf{J} - \mathbf{EI})\vec{\Omega} - \mathbf{J}\dot{\vec{\Omega}} - \vec{\Omega} \times \mathbf{J}\vec{\Omega} - \dot{\vec{\theta}} \times \mathbf{J}\dot{\vec{\theta}} - m(\vec{\rho} \times \vec{W}), \quad (1)$$

где \mathbf{J} – тензор инерции ротора; $\vec{\theta} = [\alpha, \beta, \gamma]^T$ – вектор угла поворота ротора; \mathbf{D} – матрица демпфирования по осям вращательного движения; \mathbf{C} – матрица жесткости упругого подвеса; $\vec{\Omega}$ – вектор угловой скорости основания; \mathbf{E} – единичная матрица размерностью 3×3 ; $\mathbf{I} = J_x + J_y + J_z$ – первый инвариант тензора \mathbf{J} ; \vec{M} – момент внешних сил; \vec{M}_d – момент электростатического двигателя; m – масса ротора; $\vec{\rho}$ – положение центра масс ротора в системе координат $OXYZ$; \vec{W} – вектор ускорения основания.

В уравнении (1) представлены основные члены, влияющие на динамику и возникновение погрешностей ММГ:

- первый член в правой части уравнения описывает моменты внешних сил, в частности, зависящие от ускорения W ;
- второй член представляет собой воздействие электростатического двигателя. При наличии перекосов ротора относительно основания момент имеет проекцию на выходную ось вторичных колебаний;
- третий член описывает измеряемое воздействие от сил Кориолиса;
- четвертый член указывает на влияние угловых ускорений (угловой вибрации) на показания ММГ с вращательным движением ротора;
- пятый и шестые члены описывают так называемый гантельный эффект, обусловленный неравенством диагональных компонент тензора инерции \mathbf{J} [5] и проявляющийся на частоте, равной разности частот вторичных и первичных колебаний;
- последний член указывает на влияние статического дисбаланса, обусловленного смещением центра масс ротора $\vec{\rho}$ относительно центра упругого подвеса.

Отметим, что динамический дисбаланс связан с недиагональными компонентами тензора инерции \mathbf{J} , что приводит к появлению перекрестных связей между вращательными движениями. Неравножесткость определяется неравенством в матрице \mathbf{C} жесткостей (собственных частот) поступательного движения ротора и его смещением не в направлении действия силы, что создает моменты по выходной оси OX .

Кроме указанных членов, в уравнении динамики ММГ необходимо принимать во внимание особенность построения конструктивной схемы емкостного датчика угла для съема сигнала. Вследствие конечной жесткости упругого подвеса действие ускорения W вызывает упругие перемещения ротора и изменяет величину зазора между электродами датчика угла вторичных колебаний. Это приводит к соответствующему изменению масштабного коэффициента прибора.

Наибольшее относительное изменение масштабного коэффициента происходит при действии ускорения W по оси OZ в направлении, перпендикулярном плоскости ротора, и его можно оценить по формуле [6]

$$\delta M_k \approx 2 W_z (\omega_z^2 d_0)^{-1}, \quad (2)$$

где ω_z – частота собственных поступательных колебаний ротора на упругом подвесе по оси OZ ; d_0 – величина номинального зазора в датчике угла вторичных колебаний.

Для более точной оценки изменения масштабного коэффициента следует учитывать искривление плоской формы ротора при воздействии нагрузки в направлении, перпендикулярном плоскости ротора [7]. Теоретическая оценка изменения масштабного коэффициента датчика по (2) составляет 0,26 %/g.

При исследовании динамики ММГ основной интерес вызывает рассмотрение влияния инструментальных погрешностей на вторичные колебания ЧЭ, поскольку они непосредственно воздействуют на выходные характеристики ММГ. При этом следует учитывать, что поступательные вибрации основания проявляются в выходном сигнале только при наличии смещения центра масс и неравножесткости, а угловые вибрации могут вызывать погрешности вне зависимости от наличия дисбалансов.

Основные инструментальные погрешности

К основным источникам погрешностей ММГ могут быть отнесены статический и динамический дисбалансы, неравножесткость упругого подвеса, влияние угловых ускорений вследствие особенности конструктивной схемы.

Основными причинами дисбалансов конструкции ММГ является неравномерная толщина диска и неточность выполнения планарного рисунка относительно центра подвеса в процессе литографии и травления. При изменении толщины 60 мкм в пределах 0,5 мкм (0,8%) из-за непараллельности плоскостей диска диаметром 3 мм статический дисбаланс составит $\rho_y = 1$ мкм в плоскости диска и $\rho_z = 0,12$ мкм

по его оси, а динамический – около 0,27 угл.мин. Смещение центра масс, обусловленное неточностью литографии, составляет $\rho_y \approx 0,2-0,5$ мкм, а смещение ρ_z может вызываться изгибными деформациями диска вследствие воздействия остаточных напряжений.

На основании уравнения (1) можно вычислить амплитуду выходных колебаний ротора при воздействии поступательной вибрации по оси чувствительности

$$\alpha \approx m\rho_z W_y J_x^{-1} \omega_\alpha^{-2}, \tag{3}$$

где $\omega_\alpha = (C_\alpha/J_x)^{1/2}$ – собственная частота вторичных колебаний; C_α – жесткость упругого подвеса вокруг оси вторичных колебаний.

Колебания возбуждаются на частоте вибрации и при отсутствии резонансов в конструкции могут быть исключены при фильтрации выходного сигнала. Ограничения на смещения центра масс обуславливаются тем, что амплитуда колебаний от статического дисбаланса, согласно формуле (3), не должна превышать амплитуду колебаний от максимальной угловой скорости во избежание превышения динамического диапазона и исключения контакта подвижного ротора с неподвижными частями корпуса.

Динамический дисбаланс обусловлен несовпадением главных осей инерции диска с осями симметрии упругого подвеса. В этом случае тензор инерции \mathbf{J} является недиагональным, а изменение тензора инерции можно описать с использованием вектора малого поворота $\vec{\delta} = [\delta_x, \delta_y, \delta_z]^T$. Матрица направляющих косинусов поворота главных осей тензора \mathbf{J} имеет вид $A_{ij} = E_{ij} + e_{ijk}\delta_k$, где e_{ijk} – символ Леви-Чевита. Значение компонент тензора инерции с учетом матрицы \mathbf{A} можно определить как $\mathbf{J}_{\text{дин}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} \cdot \mathbf{A}^T$.

Учитывая значения компонент тензора инерции $\mathbf{J}_{\text{дин}}$, получим составляющие моментов из-за динамического дисбаланса (приведены наиболее значимые составляющие модулированного сигнала):

$$M_{\text{дин}} = 2(J_z - J_y)\dot{\gamma}\Omega_z\delta_x - (J_x - J_z)\ddot{\gamma}\delta_y + 2(J_y - J_x)\dot{\gamma}\Omega_x\delta_z. \tag{4}$$

Второй член в правой части выражения (4) описывает влияние углового ускорения первичных колебаний и аналогичен влиянию проекции момента двигателя M_d из-за перекосов ротора. Отметим, что этот член характеризует воздействие при отсутствии измеряемой угловой скорости и представляет собой квадратурную погрешность ММГ. Величина этой составляющей момента может быть эффективно подавлена при настройке прибора [8].

С учетом первого члена выражения (4) можно записать следующую формулу для оценки дрейфа ММГ вследствие динамического дисбаланса:

$$\delta\Omega_{\text{дин}} = 1/2\Omega_{\text{max}}\delta_x \tag{5}$$

Принимая во внимание, что $K_\Omega = \Omega_{\text{max}}/\Omega_{\text{min}}$ представляет собой динамический диапазон прибора, требование к допустимому динамическому дисбалансу в соответствии с выражением (5) будет $\delta_x < 2/K_\Omega$ и составит для $K_\Omega = 10^4$ менее 0,6 угл. мин. Это требование ограничивает изменение толщины диска в пределах 2% или наклон диска относительно осей подвеса в пределах 0,3 мкм на радиусе 1,5 мм.

Момент от неравножесткости упругого подвеса определяется выражением [9]

$$M_{\text{нж}} = -mW_y W_z (\omega_y^{-2} - \omega_z^{-2}), \tag{6}$$

где $\omega_{y,z} = (C_{y,z}/m)^{1/2}$ – собственная частота поступательных колебаний ротора; $C_{y,z}$ – поступательная жесткость упругого подвеса по соответствующим осям.

Момент согласно формуле (6) при кривой вибрации возникает на частоте, равной половине частоты вторичных колебаний. Для снижения погрешности от неравножесткости необходимо увеличивать поступательную жесткость подвеса, использовать равножесткие конструкции подвесов для обеспечения $\Delta\omega = \omega_y - \omega_z = 0$ [10] и повышать собственные частоты первичных и вторичных угловых колебаний, чтобы минимальная частота более чем в два раза превышала частотный диапазон вибраций.

На основе анализа уравнения динамики (1) и инструментальных погрешностей ММГ с вращательным движением ротора можно сформулировать основные требования к точности выполнения конструктивных параметров прибора (таблица). Численные оценки приведены для ММГ класса точности 0,01 град/с (ротор диаметром 3 мм и толщиной 60 мкм, собственная частота первичных колебаний 3,5 кГц, амплитуда первичных колебаний $\gamma = 1^\circ$).

Погрешность	Дрейф	Требование к конструкции
Статический дисбаланс	$\frac{m\rho_y W_z}{2J_x \omega_z \gamma K_\Omega D_x}$	$\rho_y < 165$ мкм
Динамический дисбаланс	$1/2\Omega_{\text{max}}\delta_x$	$\delta_x < 0,6$ угл.мин.
Неравножесткость упругого подвеса	$\frac{mW^2}{2J_x \omega_z \gamma} \cdot \frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{min}}^3}$	$\Delta\omega < 1,4$ Гц

Таблица. Требования к параметрам ММГ

Согласно таблице, наиболее критичными параметрами ММГ являются динамический дисбаланс и неравножесткость упругого подвеса.

Экспериментальные исследования

Для определения изменений масштабного коэффициента при воздействии постоянных ускорений были проведены испытания на центрифуге. Для исключения погрешности, вызванной неточностью выставки, проводились испытания при противоположных направлениях вращения стола без переустановки прибора, а результаты усреднялись. Величина изменения масштабного коэффициента определялась согласно формуле $M_k(W_C) = \frac{1}{2} \omega_C^{-1} [U_1(W_C) - U_2(W_C)]$, где $U_1(W_C)$ – сигнал прибора при положительном направлении вращения центрифуги; $U_2(W_C)$ – сигнал прибора при отрицательном направлении вращения центрифуги; ω_C – величина угловой скорости вращения центрифуги; W_C – ускорение, воспроизводимое центрифугой.

В результате испытаний получены следующие значения зависимости масштабного коэффициента от ускорений: по оси Ox – 0,002%/g, по оси Oy – 0,004%/g, по оси Oz – 0,27%/g (рис. 2, а). Последнее значение совпадает с оценкой по формуле (2).

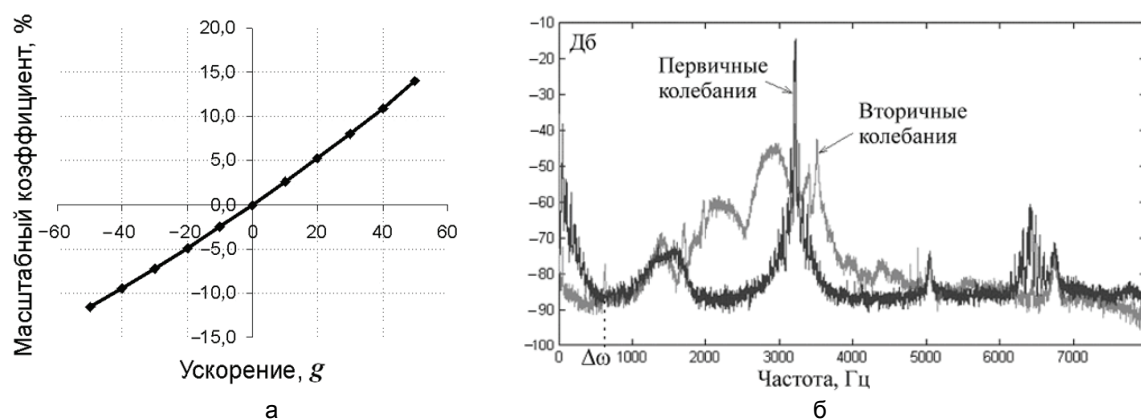


Рис. 2. Зависимость масштабного коэффициента (а) и спектрограммы первичных и вторичных колебаний (б) при поступательных ускорениях основания

Для определения изменения характеристик ММГ и выявления резонансных частот в испытательном центре ЦНИИ «Электроприбор» были проведены испытания стойкости приборов к вибрационным воздействиям. Гироскопы устанавливались последовательно на стенд TiraVib 5222, создающий вертикальную вибрацию основания. На рис. 2, б, виден резонансный пик на частоте, равной разности частот вторичных и первичных колебаний и обусловленный гантельным эффектом. Повышение амплитуды вторичных колебаний обусловлено динамическим дисбалансом и наличием не только поступательной, но и угловой вибрации стенда.

Результаты вибрационных испытаний ММГ с использованием метода непрерывно изменяющейся частоты показаны на рис. 3. Полученные результаты свидетельствуют о наличии резонансных явлений на частотах выше 1 кГц. Особенно значительный рост сигнала ММГ наблюдается при воздействии вибрации по оси Oz , при этом уровень сигнала ММГ доходит до 300–500 %/с.

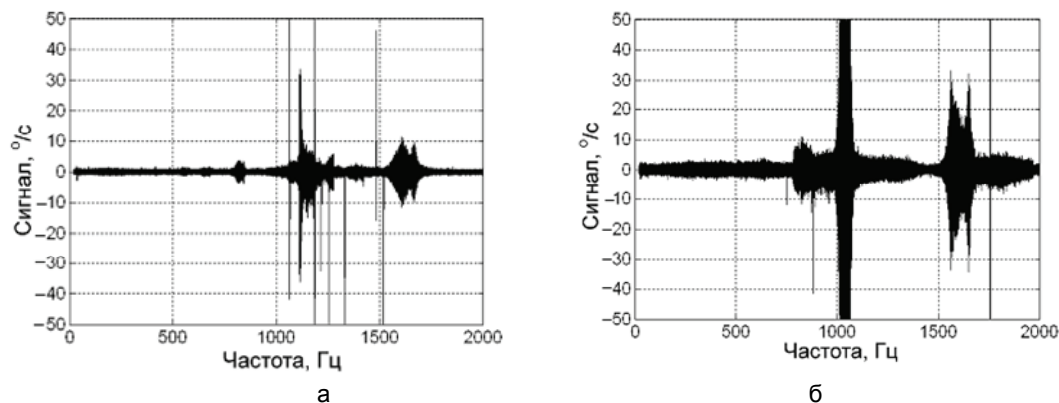


Рис. 3. Сигнал ММГ при вибрации основания по осям Ox (а) и Oz (б)

Резонансные пики объясняются следующими причинами:

- первый резонансный пик обусловлен низкой жесткостью печатной платы, на которой установлен ЧЭ, и недостаточной жесткостью ее крепления;
- второй резонансный пик частотной характеристики обусловлен неравножесткостью упругого подвеса. Это подтверждает теоретические положения о том, что вибрации могут вызывать сигнал ММГ на частоте, равной половине значения частоты вторичных колебаний.

Полученные результаты испытаний подтверждают основные теоретические выводы по исследованию модели динамики: наиболее значимые погрешности ММГ вызваны неравножесткостью подвеса и динамическим дисбалансом.

Заключение

Рассмотрена динамика ММГ на основе обобщенных уравнений. Исследовано влияние поступательной и угловой вибрации на поведение ММГ. Приведены аналитические выражения и результаты экспериментальных исследований изменения выходного сигнала ММГ под действием вибрации. Показано, что наиболее критичными параметрами являются динамический дисбаланс и неравножесткость упругого подвеса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-00153а.

Литература

1. Krueger S. et al. Microsystems for Automotive Industry // MST News. – March 2005. – P. 8–10.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
3. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
4. Северов Л.А., Овчинникова Н.А. Обобщенная модель динамики микромеханических гироскопов роторного типа // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 4. – С. 68–76.
5. Вольфсон Г.Б., Евстифеев М.И. Особенности динамики прецизионных приборов с анизотропией инерционных свойств ввешенного тела с вращательными степенями свободы // Труды IX Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление движением», посвященной 105-летию Н.Г. Четаева. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2007. – Т. 4. – С. 47–61.
6. Евстифеев М.И. Результаты экспериментального исследования влияния линейных перегрузок на характеристики ММГ RR-типа // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 2. – С. 100.
7. Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4. – С. 46–50.
8. Андреева Т.А., Некрасов Я.А. Система подавления квадратурной помехи в выходном сигнале микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением: материалы VII конференции молодых ученых. – СПб: ЦНИИ «Электроприбор». – 2006. – С. 175–181.
9. Евстифеев М.И. Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. – 2002. – № 2. – С. 19–25.
10. Патент 2296302 РФ, МПК G01 C 19/56. Микромеханический вибрационный гироскоп // Евстифеев М.И., Несенюк Л.П., Пешехонов В.Г., Унтилов А.А.; заявл.15.11.2005; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9. – 8 с.

- | | | |
|--|---|---|
| <i>Евстифеев Михаил Илларионович</i> | – | ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, доцент, начальник отдела, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru, mevstifeev@eprib.ru |
| <i>Елисеев Даниил Павлович</i> | – | ОАО «Электромеханика», инженер, eliseev.dp@gmail.com |
| <i>Ковалев Андрей Сергеевич</i> | – | ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, askovalev@gmail.com |
| <i>Розенцвейн Дмитрий Владимирович</i> | – | ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», научный сотрудник, Rosenzwein@mail.ru |

УДК 517.968, 539.261

**АНАЛИЗ И УЧЕТ КОЛЛИМАЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ
ПРИ МАЛОУГЛОВОМ РЕНТГЕНОВСКОМ РАССЕЙАНИИ
НА ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРАХ.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ
НА КАЧЕСТВО КОЛЛИМАЦИОННОГО ПЕРЕСЧЕТА**

А.В. Смирнов, Д.Д. Захаров, Б.А. Федоров

Для ориентированных однородных цилиндров получены интенсивности малоуглового рентгеновского рассеяния, в них внесены коллимационные искажения. На основе развитых ранее методов коллимационного пересчета рассчитаны восстановленные интенсивности рассеяния, которые сравнивались с неискаженными интенсивностями. Показано, что возникающая при этом относительная погрешность составляет несколько процентов, что свидетельствует о высоком качестве коллимационного пересчета. Показано также, что внесение в искаженные интенсивности рассеяния статистического шума в 1% и 4% – что соответствует реальным условиям рентгеновского эксперимента – лишь незначительно ухудшает совпадение исходных и восстановленных интенсивностей рассеяния.

Ключевые слова: малоугловое рентгеновское рассеяние, ориентированные однородные цилиндры, метод базисных функций, итерационный метод Фридмана.

Введение

Использование коллимационных щелей при рентгеновском малоугловом рассеянии приводит к искажению экспериментальных индикатрис, что существенно затрудняет их интерпретацию с точки зрения структуры рассеивающего объекта [1]. Для устранения этого недостатка необходимо ввести коллимационные поправки, позволяющие перейти от «искаженной» интенсивности рассеяния J при коллимационной системе «щель–щель» к «точечной» интенсивности рассеяния I при коллимационной системе «точка–точка». В случае изотропных объектов, для которых интенсивность зависит только от угла рассеяния θ , такие поправки вносятся сравнительно легко [2–5]. Для анизотропных объектов интенсивности $J(\theta, \varphi)$ и $I(\theta, \varphi)$ являются двухпараметрическими функциями, зависящими как от угла рассеяния θ , так и от угла поворота φ рассеивающего образца относительно коллимационной щели. При этом задача внесения коллимационных поправок становится несравненно более сложной [6].

В недавней работе [7] для решения этой задачи были развиты два метода. Первый из них – метод базисных функций (МБФ) [8] – состоит в том, что экспериментальная интенсивность рассеяния представляется в виде линейной комбинацией двумерных базисных функций и с помощью модифицированного метода наименьших квадратов достигается наилучшее согласие между исходной экспериментальной интенсивностью рассеяния и интенсивностью, полученной с помощью разложения по базисным функциям. Второй метод – модифицированный метод Фридмана (ММФ), основанный на итерационном методе Фридмана [9], существенно дополнен в соответствии с особенностями настоящей задачи. Показано, что оба метода дают достаточно высокую точность коллимационного пересчета как в случае рассеяния на ряде анизотропных модельных объектов, так и в случае экспериментальных индикатрис рассеяния при анизотропном рассеянии на отожженных пленках из высокоориентированного полиэтилена.

В настоящей работе с помощью указанных методов рассмотрен еще один модельный объект – ориентированные цилиндры разной вытянутости, и на его основе проведена оценка влияния экспериментальных погрешностей на относительную ошибку, возникающую при внесении коллимационных поправок.

Основы метода базисных функций и модифицированного метода Фридмана [7]

$$J(\theta, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} I\left(\sqrt{\theta^2 + \chi^2}, |\arctg(\chi/\theta) + \varphi|\right) W(\chi) d\chi, \quad (1)$$

где $W(\chi)$ – «весовая функция», зависящая только от параметров рентгеновской установки; $I(\theta, \varphi)$ – точечная интенсивность рассеяния, рассчитанная для выбранной анизотропной модели в условиях точечного источника и точечного приемника рентгеновского излучения; $J(\theta, \varphi)$ – искаженная интенсивность рассеяния, рассчитанная по формуле (1) с учетом параметров используемой коллимационной системы; $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ – зашумленная («псевдоэкспериментальная») интенсивность рассеяния; $\tilde{I}(\theta, \varphi)$ – восстановлен-

ная точечная интенсивность рассеяния, рассчитанная на основе развитых методов (МБФ и ММФ); $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$ – восстановленная искаженная интенсивность рассеяния, рассчитанная по формуле (1) с использованием $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$ как новой точечной интенсивности.

МБФ. Введем $\|f\|$ – норму в пространстве квадратично интегрируемых функций двух переменных θ и φ : $\|f\| = \sqrt{\int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} f^2(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}$. С использованием данной нормы относительное отклонение

функции f_1 от функции f_2 можно определить как $\delta(f_1, f_2) = \frac{\|f_1 - f_2\|}{\|f_2\|}$.

Выбираются базисные функции f_i ($i = 1, 2, \dots, n$) так, чтобы их линейная комбинация $I' = \sum_{i=1}^n c_i f_i$ могла хорошо описывать I . Для этих функций должны существовать такие коэффициенты c_1, c_2, \dots, c_n , для которых относительное отклонение $\delta(I, I')$ является достаточно малой величиной.

Рассмотрим уравнение $J' = A(I')$. Исходя из линейности оператора A , $J' = \sum_{i=1}^n c_i F_i$, где $F_i = A(f_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). В поставленной задаче I является искомой функцией, и представить ее разложение по базисным функциям в явном виде нельзя. Однако можно найти для экспериментальной интенсивности J ее приближение как разложение J' по функциям F_i . При корректном выборе функций f_i можно определить коэффициенты, для которых $\delta(J, J')$ будет достаточно малым. Эти коэффициенты будут использованы для построения восстановленной точечной интенсивности

$$I' = \sum_{i=1}^n c_i f_i. \tag{2}$$

Так как исходная задача некорректна, то, очевидно, одной экспериментальной функции J соответствует множество решений I , для которых выполняется уравнение $J = A(I)$. Для того чтобы сузить класс решений, следует: а) выбрать базисные функции, наилучшим образом соответствующие данной задаче; б) ввести дополнительные ограничения на решение, используя его известные свойства. Двухмерные базисные функции f_i были построены как прямое произведение одномерных кубических В-сплайнов [10].

Для получения коэффициентов разложения по базисным функциям использовался метод наименьших квадратов (МНК), который был модифицирован исходя из двух положений. Первое состоит в том, что при применении МНК к быстро спадающим функциям возникают коэффициенты c_i , имеющие большие значения и противоположные знаки. При этом в решении появляются нежелательные осцилляции, которых не должно быть в искомой функции. Второе положение связано с тем, что для нулевого угла рассеяния ($\theta = 0$) точечная интенсивность должна оставаться постоянной при изменении угла φ , т.е. $I(0, \varphi) = \text{const}$.

Математический формализм, развитый с учетом указанных положений, приводит к системе линейных уравнений относительно коэффициентов c_i :

$$\sum_{j=1}^n c_j \left[\sum_{k=1}^M F_i(\theta_k, \varphi_k) F_j(\theta_k, \varphi_k) + \lambda_2 \sum_{k \in K} \delta f_i(\theta_k, \varphi_k) \delta f_j(\theta_k, \varphi_k) \right] + \lambda_1 c_i = \sum_{k=1}^M J(\theta_k, \varphi_k) F_i(\theta_k, \varphi_k), \quad i = 1, 2, \dots, n, \tag{3}$$

где $\delta f_j(\theta_k, \varphi_k) = \left\langle f_j(\theta_k, \varphi_k) \right\rangle_K - f_j(\theta_k, \varphi_k) = \frac{1}{N_K} \sum_{k \in K} f_j(\theta_k, \varphi_k) - f_j(\theta_k, \varphi_k)$.

Здесь θ_k, φ_k – значения угла рассеяния и угла поворота образца, для которых получена экспериментальная интенсивность; M – общее число экспериментальных точек; K – множество точек, соответствующих $\theta = \theta_{\min}$; N_K – количество точек в множестве K ; а λ_1 и λ_2 – параметры, выбор которых детально рассмотрен в [4].

ММФ. Согласно классическому итерационному методу Фридмана выбирается начальное приближение I_0 (например, $I_0(\theta, \varphi) = 0$), и каждое последующее приближение в каждой точке (q, φ) получается на основе рекуррентного соотношения

$$I_{n+1}(\theta, \varphi) = I_n(\theta, \varphi) + \nu [J(\theta, \varphi) - J_n(\theta, \varphi)], \quad (4)$$

где $J_n = A(I_n)$, $A(I)$ – интегральный оператор, а ν – числовой параметр, регулирующий скорость сходимости решения.

Согласно (4), для приближения к точному решению нужно изменить значение I_n в каждой точке (θ, φ) так, чтобы разность $[J(\theta, \varphi) - J_n(\theta, \varphi)]$ уменьшилась. Однако проблема заключается в том, что изменение значения I_n в точке (θ, φ) может привести к изменению значения J_n не в точке (θ, φ) , а во множестве других точек. В этом случае изменение I_n в точке (θ, φ) на основе разности $[J(\theta, \varphi) - J_n(\theta, \varphi)]$ теряет смысл. Для исправления этого недостатка необходимо учесть влияние значения $I_n(\theta, \varphi)$ на значения J_n в различных точках. Вводится и обосновывается «функция влияния» $\omega(\xi, \eta, \theta, \varphi)$, которая учитывает влияние аргумента оператора A (функции I_n) в точке (ξ, η) на значение функции J_n в другой точке (θ, φ) .

Итерационная процедура (4) с учетом «функции влияния» может быть представлена в виде

$$I_{n+1}(\xi, \eta) = I_n(\xi, \eta) + \nu \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \omega(\xi, \eta, \theta, \varphi) \cdot (J(\theta, \varphi) - J_n(\theta, \varphi)) d\theta d\varphi \right]. \quad (5)$$

Выбор оптимального количества итераций $n_{\text{опт}}$, а также регулировочного параметра ν описан в работе [7].

Оценка эффективности методов коллимационного пересчета на примере однородных ориентированных цилиндров

Из общей теории дифракции [11] следует, что если в реальном пространстве (x, y, z) цилиндр ориентирован по оси z , то в обратном пространстве (X, Y, Z) , его интенсивность рассеяния имеет вид

$$I(X, Y, Z) = \left(\frac{d \sin(\pi b Z) J_1(\pi d \sqrt{X^2 + Y^2})}{2\pi Z \sqrt{X^2 + Y^2}} \right)^2, \quad (6)$$

где d – диаметр цилиндра, b – его высота. При переходе в координаты θ и φ в формуле (6) следует выбрать $X = 0$, $Y = \frac{\theta \sin \varphi}{\lambda}$ и $Z = \frac{\theta \cos \varphi}{\lambda}$.

В работе рассмотрены два цилиндра с одинаковым радиусом, но разной высотой. Интенсивность рассчитывалась в интервале углов $0,5 \text{ мрад} \leq \theta \leq 10,5 \text{ мрад}$ и $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ при длине волны $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0,1542 \text{ нм}$.

Для оценки влияния экспериментальной погрешности на качество коллимационного пересчета в искаженную (экспериментальную) интенсивность J рассеяния в каждой точке θ_k, φ_k вносился статистический «шум», распределенный по нормальному закону со средним квадратичным отклонением

$$\sigma(\theta_k, \varphi_k) = \sqrt{J(\theta_k, \varphi_k)} + 10^{-4} J(0,0),$$

причем в качестве общей относительной погрешности интенсивности (в %) выбиралось $\delta(J, \tilde{J})$, где \tilde{J} – зашумленная интенсивность. Уровень шума можно менять, умножая интенсивность J во всех точках на один и тот же коэффициент. Для зашумленных («псевдоэкспериментальных») интенсивностей, полученных с разным уровнем шума $\delta(J, \tilde{J})$, рассчитывались обоими методами восстановленные точечные $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ интенсивности, и на их основе с использованием формул (2) или (5) рассчитывались соответствующие восстановленные искаженные интенсивности рассеяния $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$.

Параметры цилиндра: $d = 20 \text{ нм}$, $b = 40 \text{ нм}$. Исходя из выражения (6), была рассчитана точечная интенсивность рассеяния цилиндра $I(\theta, \varphi)$ (рис. 1, а), а по формуле (1) – искаженная интенсивность $J(\theta, \varphi)$, в которую был внесен «шум» в 1% и 4%, и получены зашумленные («псевдоэкспериментальные») интенсивности $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ (рис. 2, а). На приводимых ниже рисунках представлены интенсивности, относящиеся только к шуму в 4%.

МБФ. По формулам (2) и (3) для $J(\theta, \varphi)$ были рассчитаны восстановленная точечная $I'(\theta, \varphi)$ и на ее основе – восстановленная искаженная $J'(\theta, \varphi)$ интенсивности рассеяния. Для зашумленных интенсивностей $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ рассчитывались соответствующие восстановленные точечные интенсивности $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ (рис. 1, б). Далее на основе полученных функций $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ по формуле (1) вновь рассчитывались восстановленные искаженные интенсивности рассеяния $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$ как для шума в 1%, так и для шума в 4% (рис. 2, б).

ММФ. По формуле (5) для $J(\theta, \varphi)$ были рассчитаны восстановленная точечная $I'(\theta, \varphi)$ и на ее основе – восстановленная искаженная $J'(\theta, \varphi)$ интенсивности рассеяния. Для зашумленных интенсивностей $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ (рис. 2, а) по формуле (5) рассчитывались соответствующие восстановленные точечные интенсивности $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ (рис. 1, с). Далее на основе полученных функций $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ по формуле (5) вновь рассчитывались восстановленные искаженные интенсивности рассеяния $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$ для шума в 1% и 4% (рис. 2, с).

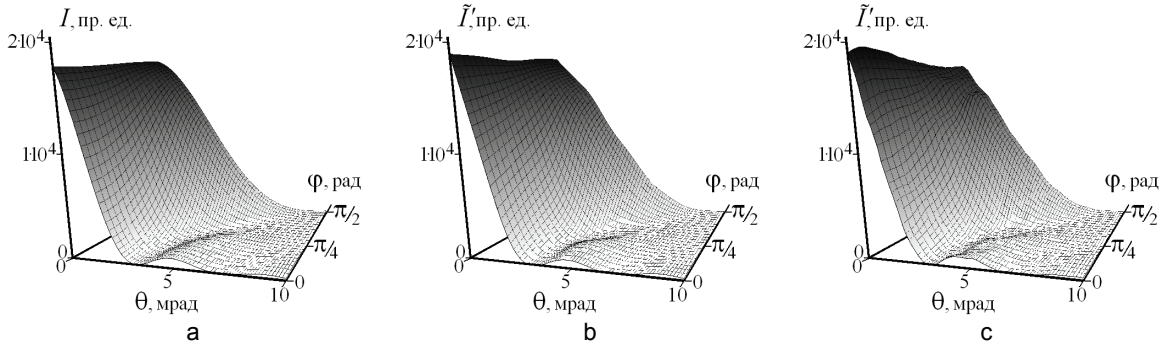


Рис. 1. Интенсивности рассеяния однородным ориентированным цилиндром с параметрами $d = 20$ нм, $b = 40$ нм: (а) – точечная интенсивность $I(\theta, \varphi)$; (б) – восстановленная точечная интенсивность $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$,

МБФ, «шум» в 4%; (с) – восстановленная точечная интенсивность $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$, ММФ, «шум» в 4%

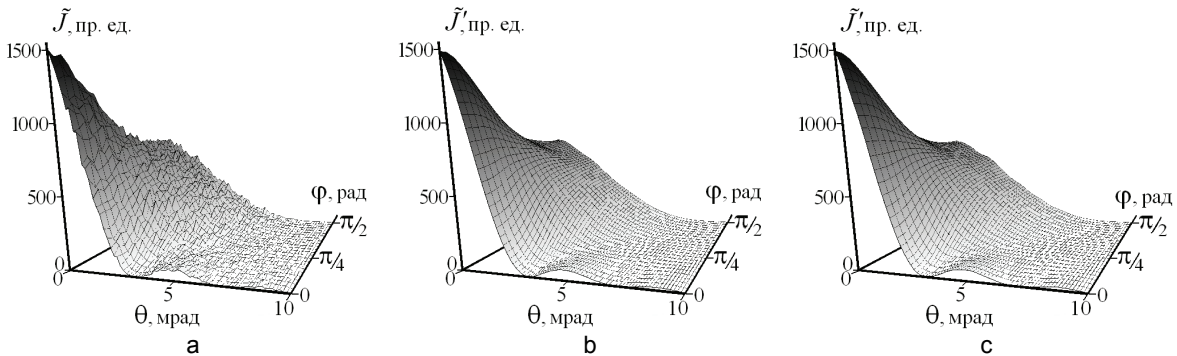


Рис. 2. Интенсивности рассеяния однородным ориентированным цилиндром с параметрами $d = 20$ нм, $b = 40$ нм: (а) – зашумленная («псевдоэкспериментальная») интенсивность $\tilde{J}(\theta, \varphi)$;

(б) – восстановленная искаженная интенсивность $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$, МБФ, «шум» в 4%;

(с) – восстановленная искаженная интенсивность $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$, ММФ, «шум» в 4%

Параметры цилиндра: $d = 20$ нм, $b = 80$ нм. Исходя из выражения (6), была рассчитана точечная интенсивность рассеяния цилиндра $I(\theta, \varphi)$ (рис. 3, а), а по формуле (1) – искаженная интенсивность $J(\theta, \varphi)$, в которую был внесен «шум» в 1% и 4%, и получены зашумленные («псевдоэкспериментальные») интенсивности $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ (рис. 4, а). На приводимых ниже рисунках представлены интенсивности, относящиеся только к шуму в 4%.

МБФ. По формулам (2) и (3) для $J(\theta, \varphi)$ были рассчитаны восстановленная точечная $I'(\theta, \varphi)$ и на ее основе – восстановленная искаженная $J'(\theta, \varphi)$ интенсивности рассеяния. Для зашумленных интенсивностей $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ рассчитывались соответствующие восстановленные точечные интенсивности $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ (рис. 3, б). Далее на основе полученных функций $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ по формуле (1) вновь рассчитывались восстановленные искаженные интенсивности рассеяния $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$ как для шума в 1%, так и для шума в 4% (рис. 4, б).

ММФ. По формуле (5) для $J(\theta, \varphi)$ были рассчитаны восстановленная точечная $I'(\theta, \varphi)$ и на ее основе – восстановленная искаженная $J'(\theta, \varphi)$ интенсивности рассеяния. Для зашумленных интенсивностей $\tilde{J}(\theta, \varphi)$ по формуле (5) рассчитывались соответствующие восстановленные точечные интенсивности $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ (рис. 3, с). Далее на основе полученных функций $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$ по формуле (5) вновь рассчитывались восстановленные искаженные интенсивности рассеяния $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$ для шума в 1% и 4% (рис. 4, с).

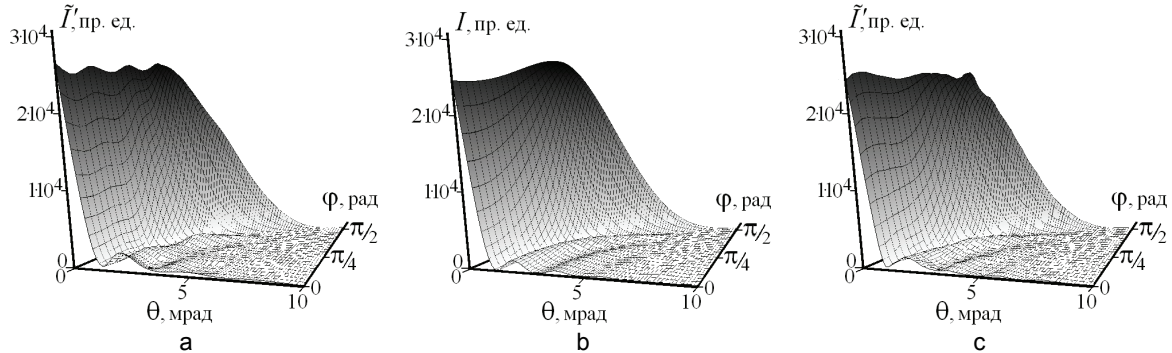


Рис. 3. Интенсивности рассеяния однородным ориентированным цилиндром с параметрами $d = 20$ нм, $b = 80$ нм: (а) – точечная интенсивность $I(\theta, \varphi)$; (б) – восстановленная точечная интенсивность $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$, МБФ, «шум» в 4%; (с) – восстановленная точечная интенсивность $\tilde{I}'(\theta, \varphi)$, ММФ, «шум» в 4%

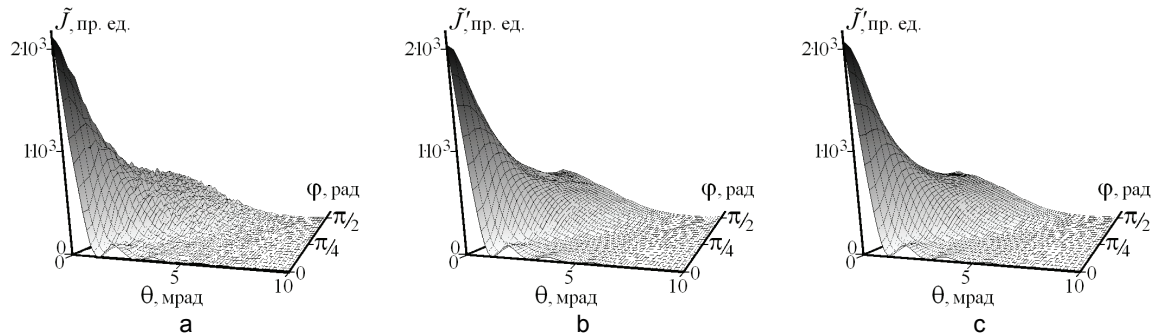


Рис. 4. Интенсивности рассеяния однородным ориентированным цилиндром с параметрами $d = 20$ нм, $b = 80$ нм: (а) – зашумленная («псевдоэкспериментальная») интенсивность $\tilde{J}(\theta, \varphi)$; (б) – восстановленная искаженная интенсивность $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$, МБФ, «шум» в 4%; (с) – восстановленная искаженная интенсивность $\tilde{J}'(\theta, \varphi)$, ММФ, «шум» в 4%

Заключение

Результаты, отражающие качество коллимационного пересчета, представлены в таблице.

Уровень шума	Метод базисных функций			Модифицированный метод Фридмана			Расхождение результатов
	2	3	4	5	6	7	
$\delta(J, \tilde{J}), \%$	$\delta(I, \tilde{I}), \%$	$\delta(\tilde{J}, \tilde{J}'), \%$	$\delta(J, \tilde{J}'), \%$	$\delta(I, \tilde{I}'), \%$	$\delta(\tilde{J}, \tilde{J}'), \%$	$\delta(J, \tilde{J}'), \%$	$\delta(\tilde{I}'_{\text{МБФ}}, \tilde{I}'_{\text{ММФ}}), \%$
Однородный ориентированный цилиндр с параметрами $d = 20$ нм, $b = 40$ нм							
0	1,0	0,6	0,6	3,3	0,8	0,08	2,6
1,0	1,4	1,1	0,6	3,1	0,9	0,3	2,9
4,0	2,5	4,0	1,0	3,4	3,8	0,9	2,8
Однородный ориентированный цилиндр с параметрами $d = 20$ нм, $b = 80$ нм							
0	2,7	0,8	0,8	3,8	0,3	0,3	2,6
1,0	3,4	1,4	1,1	3,9	0,9	0,4	5,3
4,0	5,6	4,1	1,5	4,8	3,8	1,1	5,2

Таблица. Относительное расхождение между интенсивностями: точечной и точечной восстановленной; искаженной и искаженной восстановленной для рассеяния на однородном ориентированном цилиндре при различном уровне вносимого «шума»

Из анализа этой таблицы можно сделать следующие заключения.

1. Погрешность восстановления как точечных, так и искаженных интенсивностей рассеяния нигде не превышает нескольких процентов даже с учетом «псевдоэкспериментальной» зашумленности.
2. Оба метода дают приблизительно одинаковый результат внесения коллимационных поправок, хотя, как можно видеть из сравнения столбцов 2 и 5, МБФ «работает» несколько лучше, если «шум» не слишком большой и цилиндры не слишком вытянутые. Из сравнения точечных интенсивностей рассеяния, восстановленных методами МБФ и ММФ (столбец 8), следует, что результаты применения обоих методов согласуются с точностью в несколько процентов.
3. Зашумление искаженной интенсивности, т.е. переход от J к \tilde{J} , естественно, приводит к появлению расхождения между этими функциями (столбец 1). Интересно, однако, отметить, что если эту зашумленную искаженную интенсивность \tilde{J} «пропустить» через двойной коллимационный пересчет $\tilde{J} \rightarrow \tilde{J}' \rightarrow \tilde{J}''$, то полученная восстановленная искаженная интенсивность \tilde{J}'' оказывается заметно ближе к незашумленной искаженной интенсивности J , чем просто зашумленная искаженная интенсивность \tilde{J} : ср. столбцы 1 и 4 (МБФ) и 1 и 7 (ММФ). Эту закономерность можно также проследить при сравнении рис. 2, а–с, (цилиндр 20×40) и рис. 4, а–с, (цилиндр 20×80). Как видно, поверхности \tilde{J} на рис. 2, а, и рис. 4, а, оказываются существенно более шероховатыми по сравнению с поверхностями \tilde{J}'' на рис. 2, б, с, и рис. 4, б, с, соответственно.

Литература

1. Симаков А.П., Федоров Б.А., Смирнов А.В. Исследование поверхности тонкодисперсных фракций ряда минералов с помощью рентгеновского малоуглового рассеяния // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 2(60). – С. 59–66.
2. Kratky O. Instrumentation, Experimental Technique, Slit Collimation, in Small-angle X-ray scattering. – London: Academic Press, 1983. – P. 53–84.
3. Федоров Б.А. Учет коллимационных искажений при малоугловом рассеянии рентгеновых лучей. Поправка на высоту щелей // Кристаллография. – 1968. – Т. 13. – № 5. – С. 763–769.
4. Schelten J., Hossfeld F. Application of spline functions to the correction of resolution errors in small angle scattering // J. Appl. Cryst. – 1971. – V. 4. – P. 210–223.
5. Фомичева Е.Е., Темнов Д.Э., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Влияние дисперсионного наполнителя на основе алюминия на структуру и свойства полипропилена // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 6(64). – С. 59–65.
6. Захаров Д.Д., Сизиков В.С., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Решение двумерной коллимационной задачи рассеяния рентгеновских лучей с использованием нестандартных интегральных уравнений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – № 32. – С. 144–153.
7. Захаров Д.Д., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Решение коллимационной задачи при малоугловом рентгеновском рассеянии на анизотропных объектах // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2011. – Т. 2. – № 3. – С. 26–44.
8. Glatter O. Data Evaluation in Small Angle Scattering: Calculation Electron Density Distribution by Means of Indirect Fourier Transformation // Acta Physica Austriaca. – 1977. – V. 47. – P. 83–102.
9. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев: Наукова думка, 1986. – 543 с.
10. Greville T.N.E. Introduction to spline functions. In Theory and Applications of Spline Functions. – New York: Academic Press, 1969. – P. 1–35.
11. Вайнштейн Б.К. Дифракция рентгеновских лучей на цепных молекулах. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 372 с.

- Смирнов Александр Витальевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, smirnav@phd.ifmo.ru
- Захаров Денис Дмитриевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, denzakharov@gmail.com
- Федоров Борис Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, borfedorov@rambler.ru

БЛИЖНЕПОЛЬНЫЕ ТЕРАГЕРЦОВЫЕ ЗОНДЫ НА ОСНОВЕ ЗАОСТРЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ С ДИФРАКЦИОННЫМИ РЕШЕТКАМИ

М.А. Тинская, А.И. Денисюк

Предложена новая конструкция ближнепольных терагерцовых зондов на основе заостренных металлических стержней с дифракционными решетками. Применение дифракционной решетки позволяет повысить эффективность ближнепольного зонда. Эффект основан на конструктивной интерференции волны, дифрагированной на решетке, и волны, падающей на острие зонда. Представлены аналитические расчеты параметров конструкции терагерцового зонда с дифракционной решеткой, а также результаты численного моделирования электродинамики методом конечных разностей во временной области. Также экспериментально рассмотрена возможность создания подобных зондов с помощью метода электрохимического травления.

Ключевые слова: ближнепольная терагерцовая микроскопия, ближнепольные терагерцовые зонды, поверхностные электромагнитные волны.

Введение

Терагерцовая (ТГц) спектроскопия активно применяется для исследования полупроводниковых структур и биологических объектов. Примечательно, что, благодаря малой энергии фотонов, ТГц излучение не повреждает объекты, что особенно важно при исследовании биологических тканей *in vivo* [1–4]. Существенной проблемой ТГц технологий является большая длина волны излучения и, следовательно, ограничение разрешения получаемых изображений вследствие дифракционного предела. Из-за этого на ТГц частотах невозможно прямое исследование полупроводниковых наноструктур или малых биологических объектов.

Проблема преодоления дифракционного предела в ТГц области может быть решена с помощью ближнепольной микроскопии. При этом важной задачей является разработка зондов, способных концентрировать ТГц излучение в область с размерами много меньше длины волны. При создании данных зондов может использоваться явление прохождения электромагнитного (ЭМ) излучения через субволновую диафрагму [5] или явление усиления поля вблизи металлического острия, освещаемого ЭМ излучением [6–10]. Хотя, используя такие методы, можно достичь субволновой фокусировки ТГц излучения в ближней зоне, эффективность таких зондов мала. Это представляет некоторые трудности, учитывая, что современные ТГц источники обладают малой мощностью. В связи с этим в настоящее время проводится поиск альтернативных конструкций зондов, способных эффективно концентрировать ТГц излучение в субволновую область. Примерами таких конструкций являются гофрированные металлические стержни и сужающиеся коаксиальные структуры, описанные в теоретических работах [11, 12]. Однако подобные конструкции сложны в изготовлении, кроме того, они поддерживают распространение только ЭМ волн с радиальной симметрией. Эти особенности затрудняют практическое применение зондов данных конструкций.

Постановка задачи

В ближнепольных ТГц зондах на основе заостренных металлических стержней падающее ТГц излучение освещает не только острие зонда, но и достаточно большую область ($> \lambda$) вокруг. При этом с образцом взаимодействует и формирует полезный рассеянный сигнал лишь излучение, освещающее острие стержня, а остальное излучение формирует паразитное рассеяние. Таким образом, сложно выделить информацию о ближнепольных свойствах образца на фоне общего ТГц излучения, рассеянного зондом и образцом.

В работе рассмотрена возможность увеличения эффективности ТГц зонда при условии конструктивной интерференции волн, направленных на острие зонда и область вдали от него. Для достижения этого эффекта предлагается использовать дифракционную решетку, нанесенную на некотором расстоянии от острия. При определенных геометрических параметрах решетки падающая ТГц волна будет преобразовываться в поверхностную электромагнитную волну (ПЭВ), которая распространяется дальше по сужающемуся стержню и интерферирует с волной, падающей на острие. В работе проведен расчет и численное моделирование электродинамики ТГц ближнепольного зонда с дифракционной решеткой. Показано преимущество использования дифракционных решеток. Для упрощения расчеты и моделирование проведены для двумерного случая. Также предложен относительно простой метод создания ТГц зондов с решетками.

Расчеты

Рассмотрим падение плоской электромагнитной волны с р-поляризацией на металлический клин с дифракционной решеткой (рис. 1). При определенных углах падения дифрагированная волна будет направлена вдоль поверхности и будет представлять собой ПЭВ [13, 14].

Рассмотрим условие генерации ПЭВ ТГц диапазона. Волновой вектор ПЭВ определяется следующим соотношением:

$$\mathbf{k}_S = \mathbf{k}_T + m\mathbf{k}_G. \quad (1)$$

Первое слагаемое k_T – проекция волнового вектора падающей волны k_0 на поверхность:

$$k_T = k_0 \sin \theta, \quad k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения.

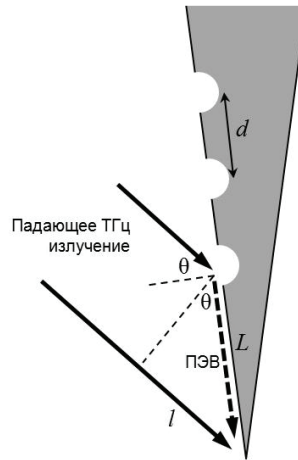


Рис. 1. Схематическая иллюстрация генерации и распространения ПЭВ по поверхности металлического клина с дифракционной решеткой

Во втором слагаемом m – порядок дифракции, а k_G – волновой вектор решетки:

$$k_G = \frac{2\pi}{d}, \quad (3)$$

где d – период решетки. Волновое число ПЭВ связано с волновым числом падающего излучения следующим соотношением:

$$k_S = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 – относительные диэлектрические проницаемости материала клина (металл) и окружающего пространства (вакуум или воздух). Учитывая, что в ТГц диапазоне диэлектрическая проницаемость металлов является большой величиной, получаем:

$$k_S \approx k_0. \quad (4)$$

Таким образом, подставляя выражения (2) и (3) в (1) и учитывая условие (4), получаем, что для генерации ПЭВ ТГц диапазона период решетки и угол падения излучения должны быть связаны соотношением

$$d = \frac{m\lambda}{1 - \sin \theta}. \quad (5)$$

Теперь рассмотрим условие конструктивной интерференции ПЭВ, сгенерированной на решетке, и падающего ЭМ излучения, направленного на острие стержня. Условие конструктивной интерференции выполняется, когда оптическая разность хода волн составляет $n\lambda$, где n – целое число. Кроме того необходимо учитывать изменение фазы волны на $\lambda/2$ при генерации ПЭВ. Таким образом, оптическая разность хода составляет:

$$L - l = n\lambda + \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Кроме того, должно выполняться условие

$$\sin \theta = \frac{l}{L}. \quad (7)$$

Тогда из (6) и (7) получаем выражение для оптической длины хода волны по поверхности клина. Это же выражение определяет расстояние между острием клина дифракционной решеткой, которое должно сохраняться для обеспечения условия конструктивной интерференции:

$$L = \frac{n\lambda + \lambda/2}{1 - \sin \theta}.$$

Рассчитаем параметры решетки, если длина волны излучения составляет $\lambda = 300$ мкм, а угол падения 30° . Тогда из условия генерации ПЭВ (5) при $m = 1$ получаем, что период решетки $d = 600$ мкм, а учитывая условие усиливающей интерференции (7) при $n = 0$, получаем, что решетка должна отстоять от острия клина на расстояние $L = 300$ мкм.

Численное моделирование

Для подтверждения проведенных расчетов было выполнено численное моделирование электродинамики металлического клина с дифракционной решеткой при падении плоской ЭМ волны с р-поляризацией. Моделирование выполнено с помощью метода конечных разностей во временной области в программе EM Explorer. Геометрические параметры структуры и параметры падающей волны взяты из предыдущего раздела. Радиус скругления острия клина составил 15 мкм. Дифракционная решетка состояла из трех штрихов, профиль которых представлял собой окружность с радиусом 50 мкм. Диэлектрическая проницаемость металла клина принята как среднее значение для металлов в ТГц диапазоне: $\epsilon = -10^5 + i10^6$. С тем, чтобы показать преимущество использования дифракционных решеток, моделирование выполнено для клина с решеткой и без решетки (рис. 2). Как следует из рис. 2, амплитуда напряженности поля на острие клина с решеткой примерно в два раза больше напряженности поля на острие клина без решетки.

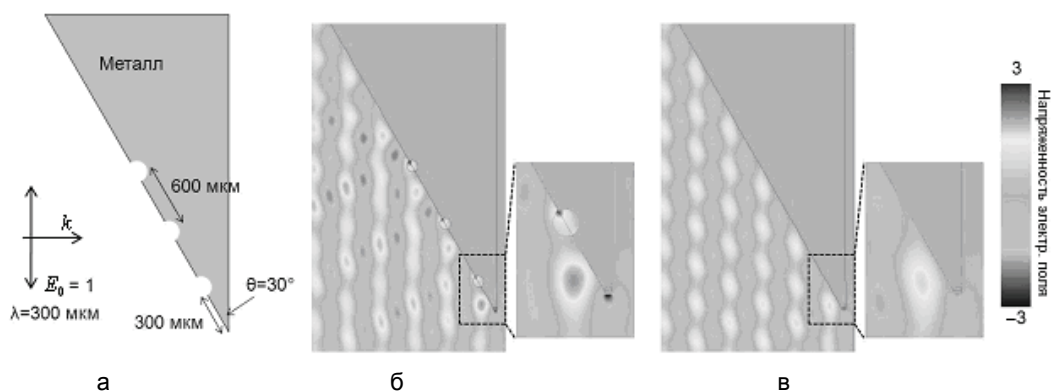


Рис. 2. Геометрические параметры клина с дифракционной решеткой и параметры падающей ЭМ волны (а); мгновенные значения напряженности электрического поля (E) при падении ТГц волны на клин с дифракционной решеткой (б) и клин без решетки (в)

Экспериментальная установка и методика

Классические ближнепольные зонды на основе заостренных металлических стержней могут быть созданы с помощью метода электрохимической заточки. Этот метод реализуется в специальных устройствах заточки зондов. Принцип метода основан на электрохимическом травлении проволоки в растворе щелочи при протекании электрического тока. Для придания проволоке формы конуса может быть использовано ее перемещение по вертикали.

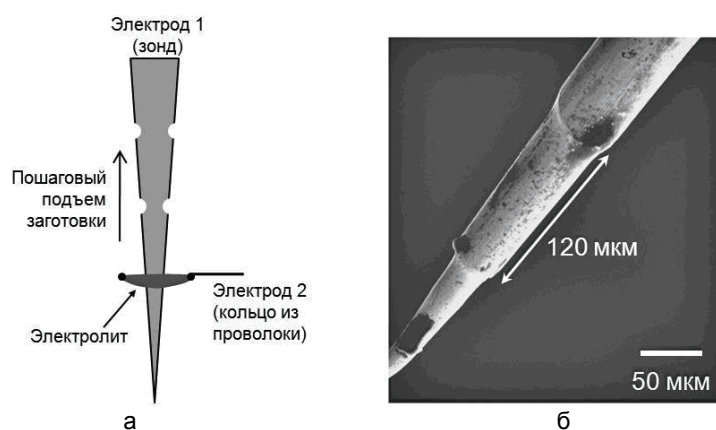


Рис. 3. Схематическая иллюстрация процесса травления периодической структуры колец на заостренном стержне (а). Электронное изображение заостренного стержня с протравленной периодической структурой (б)

Ближнепольные ТГц зонды с дифракционными решетками, рассмотренные далее, также могут быть созданы с помощью электрохимической заточки. Для этого сначала с помощью обычной процедуры заточки создавался заостренный стержень (концентрация раствора КОН 5%; шаг между травлениями – 2 мкм; время травления на каждом шаге – 2 с). Затем на стержне травилась борозды (штрихи дифракционной решетки) с помощью специальной процедуры заточки, в которой программными методами задавались шаги перемещения стержня по вертикали, соответствующие периоду решетки, а травление осуществлялось между перемещениями (концентрация раствора КОН 5%; шаг между травлениями > 100 мкм; время травления на каждом шаге – 3 с). С помощью такой методики удавалось получать периодическую структуру колец на заостренном стержне (рис. 3).

Обсуждение результатов

В работе предложена новая конструкция ближнепольных ТГц зондов увеличенной эффективности на основе дифракционных решеток. Необходимо отметить, что данная конструкция ближнепольных ТГц зондов имеет преимущество перед другими типами конструкций [11, 12]: в ней не изменяется схема освещения и сбора ТГц излучения. Кроме того, как показано в данной работе, зонды с дифракционными решетками относительно просты в изготовлении.

Тем не менее, до проведения экспериментальных испытаний подобных зондов необходимо провести более точные расчеты и моделирование электродинамики, а также усовершенствовать методы создания таких зондов. Так, например, численное моделирование зондов необходимо проводить для трехмерного, а не двумерного случая. Кроме того, нужно учитывать, что штрихи дифракционной решетки на реально изготовленном зонде представляют собой кольца. Также необходимо совершенствовать технологию создания зондов с тем, чтобы получать зонды с требуемыми геометрическими параметрами.

Заключение

В работе рассмотрена возможность применения дифракционных решеток для увеличения эффективности ближнепольных ТГц зондов. Эффект основан на конструктивной интерференции волны, дифрагированной на решетке, и волны, направленной на острие зонда. При этом напряженность электрического поля на острие зонда с решеткой увеличивается в два раза по сравнению с зондом без решетки. Численное моделирование электродинамики ТГц зондов с дифракционными решетками, выполненное с помощью метода конечных разностей во временной области, подтверждает проведенные расчеты. В работе экспериментально рассмотрена возможность создания подобных зондов с помощью метода электрохимического травления.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П1285).

Литература

1. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – New-York: Springer, 2009. – 347 p.
2. Dexheimer S.L. Terahertz Spectroscopy: Principles and applications. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 331 p.
3. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nat. Photon. – 2007. – V. 1. – P. 97–105.
4. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В., Козлов С.А., Новоселов Е.В. Импульсный терагерцовый рефлектометр // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – Т. 71. – № 1. – С. 19–23.
5. Mitrofanov O., Lee M., Hsu J.W.P., Brener I., Harel R., Federici J.F., Wynn J.D., Pfeiffer L.N., West K.W. Collection-mode near-field imaging with 0,5-THz pulses // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2001. – V. 7. – № 4. – P. 600–607.
6. Cho G.C., Chen H.-T., Kraatz S., Karpowicz N., Kersting R. Apertureless terahertz near-field microscopy // Semicond. Sci. Technol. – 2005. – V. 20. – P. S286–S292.
7. Wang K., Mittleman D.M., van der Valk N.C.J., Planken P.C.M. Antenna effects in terahertz apertureless near-field optical microscopy // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 85. – № 14. – P. 2715–2717.
8. Buergens F., Acuna G., Lang C.H., Potrebic S.I., Manus S., Kersting R. Shear force control for a terahertz near field microscope // Rev. Sci. Instrum. – 2007. – V. 78. – P. 113701.
9. Planken P.C.M., van der Valk N.C.J. Spot-size reduction in terahertz apertureless near-field imaging // Optics Lett. – 2004. – V. 29. – № 19. – P. 2306–2308.
10. Трухин В.Н., Андрианов А.В., Быков В.А., Голубок А.О., Зиновьев Н.Н., Самойлов Л.Л., Сапожников И.Д., Трухин А.В., Фельштын М.Л. Взаимодействие терагерцового электромагнитного излучения с системой зонд–объект в терагерцовом безапертурном ближнепольном микроскопе // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 93. – № 3. – С. 134–138.
11. Maier S.A., Andrews S.R., Martín-Moreno L., García-Vidal F.J. Terahertz Surface Plasmon-Polariton Propagation and Focusing on Periodically Corrugated Metal Wires // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 97. – P. 176805.
12. Rusina A., Durach M., Nelson K.A., Stockman M.I. Nanoconcentration of terahertz radiation in plasmonic waveguides // Optics Express. – 2008. – V. 16. – P. 18576.
13. Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. – New-York: Springer-Verlag, 1986. – 134 p.
14. Либенсон М.Н. Поверхностные электромагнитные волны оптического диапазона // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 10. – С. 92–98.

Тинская Мария Александровна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mashulik1@gmail.com

Денисюк Андрей Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, aidenisyuk@gmail.com

ОПТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ-ЗОНДЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНООБОЛОЧЕК

А.А. Караев, А.И. Денисюк

Исследуется возможность применения комплексных металлических наноструктур на основе сферических нанооболочек в качестве ближнепольных оптических зондов. Благодаря явлению плазмонного резонанса данные структуры способны эффективно концентрировать энергию падающего оптического излучения в субволновую область. Представлены результаты численного моделирования электродинамики оптических антенн методом конечных разностей во временной области. Также экспериментально исследуются методы создания подобных наноструктур.

Ключевые слова: ближнепольная оптическая микроскопия, оптические антенны, металлические наночастицы.

Введение

Ближнепольные оптические зонды на основе металлических наноструктур являются новыми элементами нанооптики [1]. Оптические свойства подобных зондов (также известных как оптические антенны) определяются явлением плазмонного резонанса, характерного для металлических наноструктур на оптических частотах. В частности, оптические антенны способны создавать усиленное электромагнитное поле в субволновой области при облучении структуры падающим светом. Основным направлением применения оптических антенн может стать исследование биологических объектов, в частности, одиночных биомолекул (ДНК, белки и др.), используя такие методы, как локально усиленная рамановская и флуоресцентная спектроскопия (TERS/TEFS, Tip-enhanced Raman/fluorescence spectroscopy).

Оптические антенны-зонды могут быть созданы на основе сферических металлических наночастиц. Причем могут использоваться как одиночные сферические частицы [2], так и комплексные структуры, состоящие из нескольких частиц [3]. Однако частота плазмонного резонанса сферической металлической наночастицы слабо зависит от ее диаметра, поэтому практически отсутствует возможность сдвига резонансной частоты в требуемую область спектра. Эта возможность реализуется при использовании таких частиц, как сферические металлические нанооболочки (диэлектрическая сфера, покрытая слоем металла). В случае металлических нанооболочек можно не только изменять их резонансную частоту (которая сильно зависит от диаметра диэлектрической сферы и толщины слоя металла), но и создавать более сильные электромагнитные поля вблизи поверхности частицы [4].

В настоящей работе исследуется возможность применения комплексных структур на основе сферических металлических нанооболочек в качестве оптических антенн. В работе проведено численное моделирование электродинамики таких оптических антенн, подтверждающее возможность эффективной локализации энергии падающего излучения на заданной длине волны. Также рассматриваются методы создания этих новых структур.

Численное моделирование

Численное моделирование электродинамики наночастиц выполнено с помощью метода конечных разностей во временной области в программе EM Explorer. В частности, рассчитывались сечения поглощения частиц (по положению максимума на спектре определялась длина волны плазмонного резонанса) и интенсивность электромагнитного поля вблизи частицы при падении на нее плоской электромагнитной волны (рис. 1).

Рассмотрим структуру, состоящую из сферической металлической нанооболочки и малой металлической наночастицы на поверхности нанооболочки. В начале рассмотрим золотую нанооболочку со сферической кварцевой сердцевинной диаметром 40 нм. Численное моделирование показало, что при увеличении внешнего диаметра оболочки с 52 нм до 64 нм длина волны плазмонного резонанса частицы уменьшается с 630 нм до 530 нм (рис. 1, а).

Теперь рассмотрим те же нанооболочки, но с добавлением малой золотой наночастицы (диаметром 12 нм) на поверхность нанооболочки. Как показали результаты моделирования, длина волны плазмонного резонанса всей структуры при добавлении малой золотой наночастицы практически не изменилась (рис. 1, а). Однако существенно изменилась картина ближнего поля при облучении структуры на резонансной длине волны линейно-поляризованным светом: в случае нанооболочек с малой золотой наночастицей электромагнитное поле локализуется и усиливается вблизи наночастицы, интенсивность электрического поля в этом месте возрастает на порядок (рис. 1, б).

Таким образом, оказывается, что комплексная структура на основе металлической нанооболочки и малой металлической наночастицы ведет себя как оптическая антенна, т.е. обеспечивает эффективную концентрацию энергии падающего оптического излучения определенной длины волны в субволновую область. Причем, изменяя толщину нанооболочки, можно сдвигать резонансную длину волны в требуемую область спектра.

С учетом экспериментальных возможностей создания таких оптических антенн рассмотрим несколько другую структуру, состоящую из золотой нанооболочки с сердцевинной из полистирола (диаметр сердцевинной/оболочки 140/160 нм) и малой наночастицы платины диаметром 40 нм. Численное модели-

рование электродинамики показало, что данная структура обладает плазмонным резонансом на длине волны 630 нм, при этом энергия падающего излучения также локализуется и усиливается вблизи малой наночастицы (рис. 2).

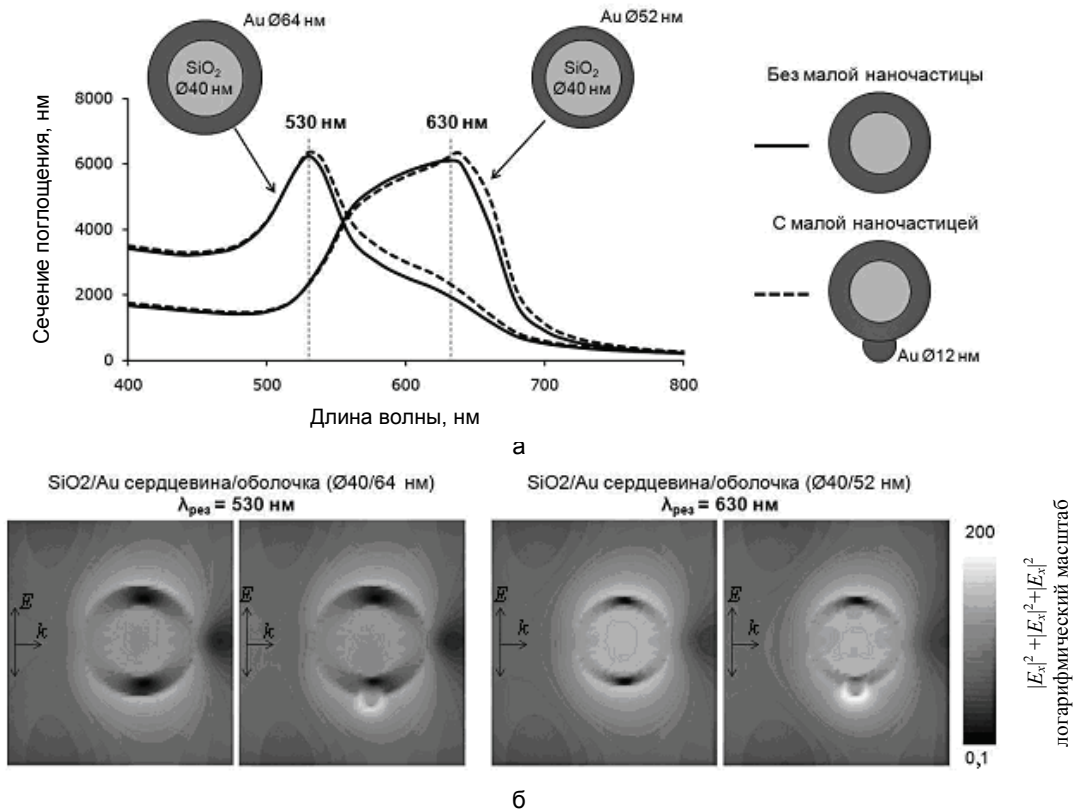


Рис. 1. Результаты численного моделирования сечения поглощения комплексных структур на основе золотых наноболочек с кварцевой сердцевиной (а) и распределения интенсивности электрического поля при падении на эти же структуры линейно-поляризованной световой волны (б)

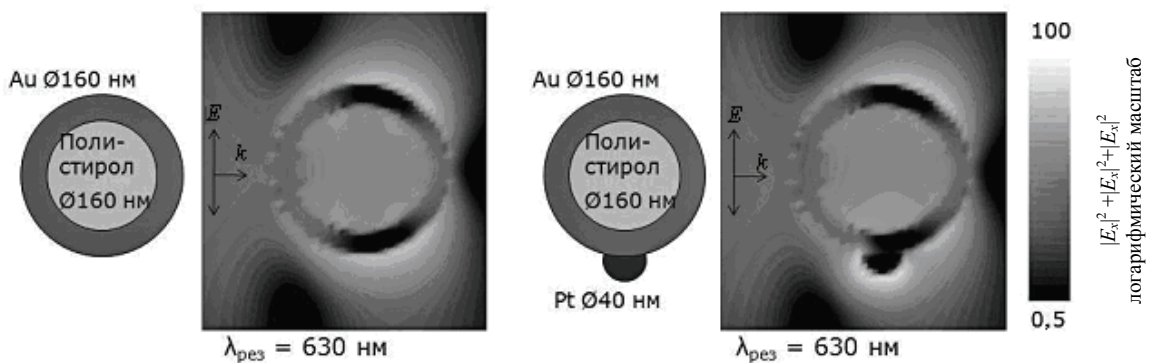


Рис. 2. Распределения интенсивности электрического поля при падении структуры линейно-поляризованной световой волны

Экспериментальная установка и методика

Экспериментальные образцы оптических антенн на основе металлических наноболочек были созданы с помощью электронного микроскопа Neon 40 EsB (фирмы Carl Zeiss). Данный микроскоп оборудован микроманипулятором для прецизионного перемещения нанообъектов и системой напуска газов для локального осаждения материала под электронным пучком [5].

Рассмотрим возможность экспериментального создания структуры, представленной на рис. 2. Основной образцов оптических антенн были сферические частицы полистирола диаметром 120 нм, диспергированные на кремниевой подложке. При создании антенны частицы фиксировались на острие вольфрамовой иглы. Для этого к подвижной части микроманипулятора было приклеена заостренная вольфрамовая игла, полученная с помощью электрохимической заточки вольфрамовой проволоки до радиуса скругления острия порядка 100 нм (электрохимическая заточка вольфрамовых стрижней описана в [6]). Важно, что вольфрамовая игла не была заземлена. Движение вольфрамовой иглы над подложкой с час-

тицами полистирола можно было непосредственно отслеживать на электронном изображении (ускоряющее напряжение электронного пучка 5 кВ, ток 60 пА). Оказалось, что при подведении вольфрамовой иглы к наночастицам на подложке на расстояние порядка нескольких сотен нанометров одна или несколько частиц притягивались к игле и фиксировались вблизи острия (рис. 3, а).

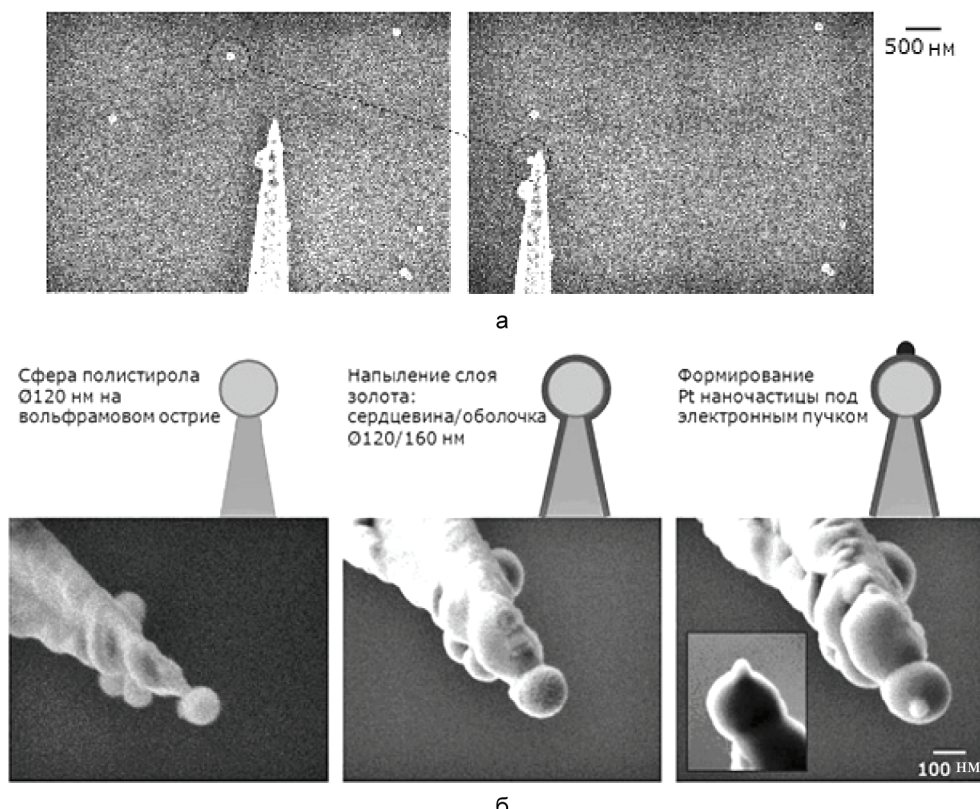


Рис. 3. Электронные изображения, иллюстрирующие этапы создания оптической антенны на основе нанооболочки: фиксация сферической наночастицы полистирола на вольфрамовом острие (а); напыление на вольфрамовое острие с наночастицей полистирола на конце слоя золота и осаждение малой наночастицы платины (б)

В случае фиксации одиночной частицы на острие иглы следующим шагом было осаждение на структуру слоя золота толщиной 20 нм. Данная задача была выполнена в установке магнетронного распыления SPI 12151EQ-AX. В результате этой операции частица полистирола покрывалась золотом, таким образом, формировалась структура диэлектрическая сердцевина/металлическая оболочка диаметром 140/160 нм.

Наконец, завершающим шагом было формирование малой металлической наночастицы на поверхности нанооболочки. Эта операция также выполнялась в электронном микроскопе Neon 40 EsB. При подаче в вакуумную камеру микроскопа газа $C_5H_4CH_3Pt(CH_3)_3$ его молекулы распадаются под воздействием электронов, что приводит к осаждению на платины на образце в месте взаимодействия электронного пучка с образцом. С помощью этого метода на золотой нанооболочке была осаждена малая частица платины размером порядка 40 нм (рис. 3, б).

Обсуждение результатов

Исследование электродинамики комплексной структуры, состоящей из металлической нанооболочки и малой металлической наночастицы, показало, что такая структура способна функционировать как оптическая антенна, т.е. эффективно концентрировать энергию падающего оптического излучения в субволновую область. Использование сферических наночастиц и комплексных структур на их основе в качестве ближнепольных зондов имеет то преимущество, что современные методы синтеза частиц позволяют получать сферические частицы калиброванного диаметра. Таким образом, для создания ближнепольных зондов с воспроизводимыми характеристиками необходимо разработать эффективный метод сборки сферических частиц, тогда как ближнепольные зонды на основе других металлических наноструктур (наностержни [7], нанотреугольники [8] и др.), являются штучной, лабораторной продукцией.

Обнаруженный эффект фиксации диэлектрической наночастицы на острие металлической иглы, по-видимому, объясняется электростатическим взаимодействием иглы и частицы под электронным пучком. Диэлектрические наночастицы на подложке удерживаются силами Ван-дер-Ваальса. Незаземленная металлическая игла заряжается отрицательно под электронным пучком. Таким образом, вблизи острия

иглы формируется сильное градиентное электростатическое поле. Это поле поляризует диэлектрическую частицу и притягивает ее (движение диэлектрических частиц в градиентных электрических полях известно как «диэлектрофорез» [9]).

Однако нельзя не учесть тот факт, что диэлектрическая частица сама заряжается под электронным пучком отрицательно. Тогда будет иметь место отталкивание частицы от иглы при взаимодействии двух отрицательных зарядов. Наконец, еще один механизм связан с тем, что отрицательный заряд частицы создает свое изображение в металлической игле. Таким образом, имеет место притяжение заряженной частицы к своему изображению.

Необходимо отметить, что метод манипулирования диэлектрическими наночастицами под электронным пучком использовался впервые. Так, в настоящее время прецизионное манипулирование и фиксация наночастиц в основном выполняются в сканирующих зондовых микроскопах и основываются на механическом, химическом или электростатическом взаимодействии между зондом и частицей [10–12]. Существенным недостатком этих методов является отсутствие возможности визуализации результата (и процесса) фиксации наночастицы на острие иглы. Напротив, в предложенном методе на электронном изображении можно непосредственно отслеживать перемещение наночастицы.

Заключение

В работе впервые исследована электродинамика оптической антенны, состоящей из металлической наноболочки и малой металлической наночастицы. Результаты расчета электродинамики, проведенные с помощью метода конечных разностей во временной области, показали, что частота плазмонного резонанса всей структуры определяется геометрическими параметрами наноболочки, а электромагнитное поле падающей световой волны локализуется и усиливается вблизи металлической наночастицы. Изменяя толщину наноболочки, можно сдвигать резонансную частоту в требуемую область спектра.

Получены экспериментальные образцы таких оптических антенн. При создании антенны использовался оригинальный метод фиксации диэлектрической частицы на острие металлической иглы. Механизм эффекта основан на электростатическом взаимодействии иглы и частицы под электронным пучком.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. (ГК № П1210).

Литература

1. Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical Antennas // *Adv. Opt. Photon.* – 2009. – V. 1. – P. 438–483.
2. Höppler C., Novotny L. Imaging of membrane proteins using antenna-based optical microscopy // *Nanotechnology.* – 2008. – V. 19. – P. 384012.
3. Kappeler R., Erni D., Xudong C., Novotny L. Field Computations of Optical Antennas // *J. Comput. Theor. Nanosci.* – 2007. – V. 4. – № 3. – P. 686–691.
4. Kalele S., Gosavi S.W., Urban J., Kulkarni S.K. Nanoshell particles: synthesis, properties and applications // *Current Science.* – 2006. – V. 91. – № 8. – P. 1038–1054.
5. Van Dorp W.F., Hagen C.W. A critical literature review of focused electron beam induced deposition // *J. Appl. Phys.* – 2008. – V. 104. – № 8. – P. 081301.
6. Стовяга А.В., Лобова И.Н. Исследование влияния параметров зондов сканирующего зондового микроскопа на визуализацию рельефа поверхности биологических объектов // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.* – 2010. – Т. 70. – № 6. – С. 94–97.
7. Taminiau T.H., Stefani F.D., Segerink F.B., Van Hulst N.F. Optical antennas direct single-molecule emission // *Nature Photon.* – 2008. – V. 2. – № 4. – P. 234–237.
8. Farahani J.N., Eisler H.-J., Pohl D.W., Pavius M., Fluckiger P., Gasser P., Hecht B. Bow-tie optical antenna probes for single-emitter scanning near-field optical microscopy // *Nanotechnology.* – 2007. – V. 18. – № 12. – P. 125506.
9. Kadaksham A.T.J., Singh P., Aubry N. Dielectrophoresis of nanoparticles // *Electrophoresis.* – 2004. – V. 25. – P. 3625–3632.
10. Ducker W.A., Senden T.J., Pashley R.M. Direct measurement of colloidal forces using an atomic force microscope // *Nature.* – 1991. – V. 353. – P. 239–241.
11. Decossas S., Mazen F., Baron T., Bremond G., Souifi A. Atomic force microscopy nanomanipulation of silicon nanocrystals for nanodevice fabrication // *Nanotechnology.* – 2003. – V. 14. – P. 1272–1278.
12. Grobelyny J., Tsai D.-H., Kim D.-I., Pradeep N., Cook R.F., Zachariah M.R. Mechanism of nanoparticle manipulation by scanning tunnelling microscopy // *Nanotechnology.* – 2006. – V. 17. – P. 5519–5524.

Каравев Александр Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, golden_sand@mail.ru
Денисюк Андрей Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, aidenisyuk@gmail.com

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЛЬФРАМОВЫХ ЗОНДОВ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА В РЕЖИМАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ ЛИТОГРАФИИ И НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

А.О. Голубок, А.Л. Пинаев, А.А. Феклистов, С.А. Чивилихин

Проведено исследование устойчивости вольфрамового зонда под действием продольного механического напряжения, возникающего при работе сканирующего зондового микроскопа в режимах динамической силовой литографии и наноиндентирования. В рамках предложенной теоретической модели получено выражение для критической силы продольного сжатия, превышение которой приводит к потере устойчивости и изгибу зонда. Представлены экспериментальные данные, полученные в сканирующем зондовом микроскопе с пьезорезонансным датчиком силового взаимодействия, демонстрирующие устойчивое и неустойчивое поведение вольфрамового зонда при наноиндентировании и динамической силовой литографии поверхности образца из поликарбоната.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, динамическая силовая литография, наноиндентирование, пьезорезонансный зондовый датчик.

Введение

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) отличается многообразием возможных режимов работы, среди которых – режимы наноиндентирования (НИ) и динамической силовой литографии (ДСЛ). В этих режимах [1] вершина зонда СЗМ определенное время находится в механическом контакте с поверхностью образца и испытывает достаточно сильное продольное сжатие. Традиционный датчик силового взаимодействия представляет собой микробалку (кантилевер) с нанозондом у вершины в виде кремниевой пирамидки, высота которой соизмерима с характерным размером основания (рис. 1, а).

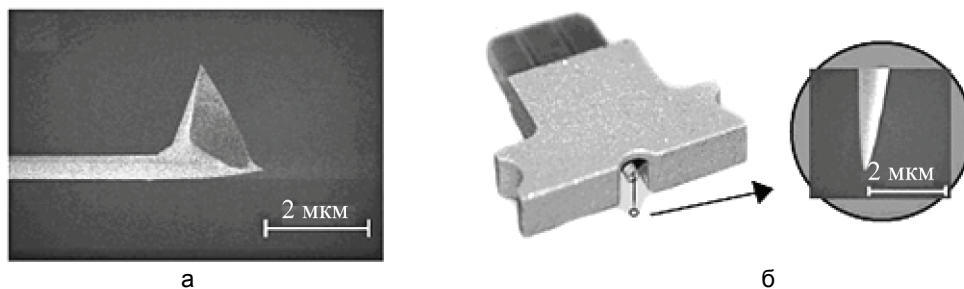


Рис. 1. Зондовые датчики СЗМ: стандартный кремниевый кантилевер (а); пьезорезонансный датчик с вольфрамовым зондом (б) (на вставке справа дано увеличенное РЭМ изображение вершины зонда)

Если давление в области механического контакта не превосходит предела пластической деформации кремния, то такие зонды остаются устойчивыми к продольному сжатию, т.е. в процессе НИ и ДСЛ они не теряют форму, изгибаясь относительно продольной оси, и на их вершинах не образуется наклеп. Альтернативой кремниевому кантилеверу является пьезорезонансный датчик силового взаимодействия, представляющий собой, например, пьезокерамическую трубку, к торцу которой прикреплен зонд из заостренной вольфрамовой проволоки [2] (рис. 1, б). В этом случае тонкая и длинная вершина зонда подвержена неустойчивости при продольном сжатии, что может привести к ее изгибу в процессе НИ и ДСЛ. Целью работы было создание математической модели для определения критической силы потери устойчивости в зависимости от угла заточки зонда и экспериментальная демонстрация результатов применения вольфрамового зонда (W зонда) с оптимальным углом заточки в режимах ДСЛ и НИ.

Устойчивость зонда при продольном сжатии

Заостренный методом электрохимического травления W зонд представляет собой симметричный относительно оси вращения стержень переменного сечения. Уравнение, описывающее изгиб стержня переменного сечения, согласно [3] имеет вид

$$E \frac{d^2}{dx^2} \left(I(x) \frac{d^2 \xi}{dx^2} \right) + F \frac{d^2 \xi}{dx^2} = 0, \quad (1)$$

где ξ – поперечное смещение оси стержня; x – продольная координата; E – модуль Юнга вещества стержня; F – продольная сила, сжимающая стержень; $I(x)$ – момент инерции поперечного сечения стержня. Для стержня, опертого по концам, граничные условия к уравнению (1) имеют вид

$$\xi|_{x=0,L} = 0, \quad \left. \frac{d^2 \xi}{dx^2} \right|_{x=0,L} = 0, \quad (2)$$

где L – длина стержня.

Существование точного решения задачи устойчивости конического стержня кругового сечения было отмечено в [3]. Найдем это решение. В случае конического стержня кругового сечения имеем

$$I(x) = \frac{\pi R^4(x)}{4}, \quad R(x) = R_0 + (R_1 - R_0) \frac{x}{L},$$

где $R(x)$ – радиус стержня в зависимости от продольной координаты; R_0 и R_1 – радиус стержня при $X=0$ и L соответственно (рис. 2, б).

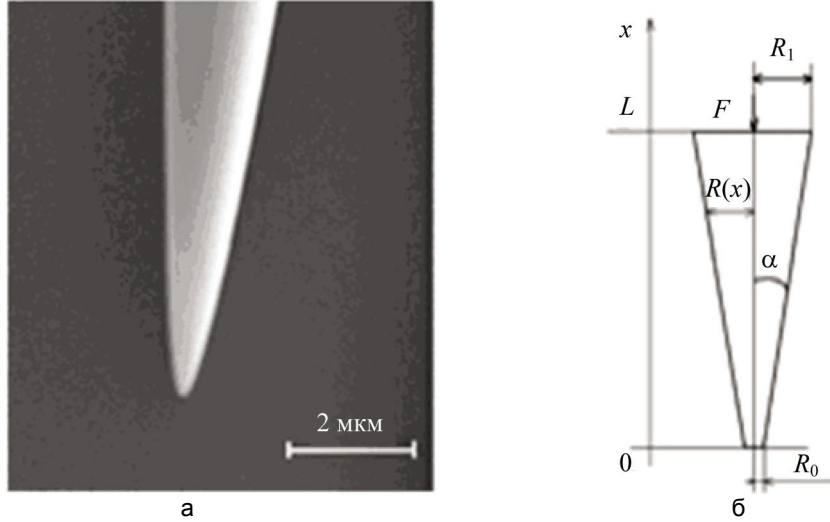


Рис. 2. РЭМ изображение зонда (а); используемая при расчете критической силы сжатия модель зонда (б)

Вводя новую переменную $W(x) = I(x) \frac{d^2 \xi}{dx^2}$, приводим краевую задачу (1), (2) к виду

$$EI(x) \frac{d^2 W}{dx^2} + FW = 0, \tag{3}$$

$$W|_{x=0} = W|_{x=L} = 0. \tag{4}$$

В качестве независимой переменной удобно использовать радиус стержня

$$r = \frac{R(x)}{R_0}.$$

Тогда задача (3), (4) приобретает окончательный вид

$$r^4 \frac{d^2 W}{dr^2} + \lambda^2 W = 0, \tag{5}$$

$$W|_{r=0} = W|_{r=r_1} = 0, \tag{6}$$

где

$$r_1 = \frac{R_1}{R_0}, \quad \lambda^2 = \frac{4FL_2}{\pi ER_0^2 (R_1 - R_0)^2}. \tag{7}$$

Решение уравнения (5) имеет вид

$$W = r \left(A \cos\left(\frac{\lambda}{r}\right) + B \sin\left(\frac{\lambda}{r}\right) \right). \tag{8}$$

Используя граничные условия (6), получаем систему однородных алгебраических уравнений для неопределенных коэффициентов A, B :

$$\begin{aligned} A \sin(\lambda) + B \cos(\lambda) &= 0, \\ A \sin\left(\frac{\lambda}{r_1}\right) + B \cos\left(\frac{\lambda}{r_2}\right) &= 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Условием существования нетривиального решения системы (9) и соответственно дифференциального уравнения (5) с граничными условиями (6) является равенство нулю определителя системы (9)

$$\begin{vmatrix} \sin(\lambda) & \cos(\lambda) \\ \sin\left(\frac{\lambda}{r_1}\right) & \cos\left(\frac{\lambda}{r_2}\right) \end{vmatrix} = \sin\left(\lambda - \frac{\lambda}{r_1}\right) = 0, \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет определить спектр значений параметра λ соответствующих ветвлению решений уравнения изгиба стержня. Минимальный отличный от нуля корень уравнения (10) равен $\lambda_{\min} = \frac{\pi r_1}{r_1 - 1}$. Подставляя в (7) найденное минимальное значение параметра λ , получаем критическое значение сжимающей силы

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^3 E R_0^2 R_1^2}{4L^2}. \quad (11)$$

В случае кругового стержня постоянного сечения это условие сводится к классическому результату [4]. Если сжимающая сила F превышает это критическое значение, то стержень теряет устойчивость и изгибается, переходя к новому устойчивому состоянию.

Тангенс угла α наклона образующей конического стержня по отношению к его оси можно записать в виде

$$\text{tg}\alpha = \frac{R_1 - R_0}{L}.$$

Для длинного стержня при $R_1 \gg R_0$ $\text{tg}\alpha \approx \frac{R_1}{L}$, и критическую силу (11) можно представить в виде

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^3 E R_0^2}{4} \text{tg}^2\alpha. \quad (12)$$

Таким образом, при острых (малых) углах заточки $F_{\text{кр}}$ квадратично убывает с уменьшением радиуса зонда и угла между осью и образующей конуса.

Очевидно, что для модификации поверхности образца и исключения наклепа на поверхности зонда [5] механическое давление в области контакта P должно превосходить предел пластической деформации образца P_S , но быть меньше, чем предел пластической деформации зонда P_P :

$$P_S < P < P_P.$$

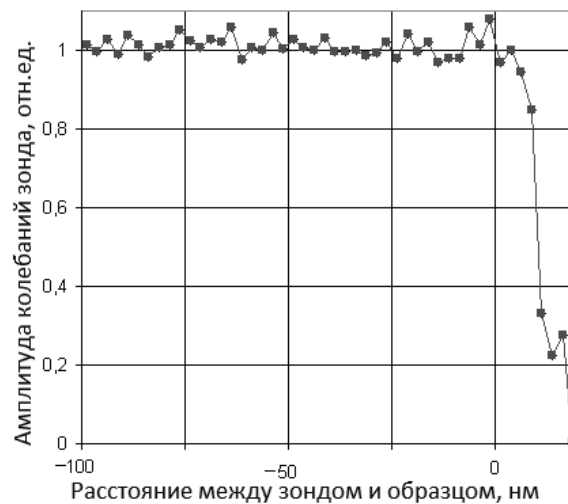


Рис. 3. Экспериментальная кривая подвода образца к зонду

Полезно сделать грубую оценку силы F_{SP} , действующей со стороны образца на зонд в момент их механического контакта. Будем считать, что ось симметрии зонда перпендикулярна поверхности образца, а контакт между зондом и образцом возникает в результате ускоренного движения образца с массой m_S по направлению к зонду под действием резкого скачка управляющего напряжения $V = l/\beta$, где β — чувствительность сканера по вертикали z . Пусть l — длина пути, пройденного образцом ускоренно за время, определяемое быстроедействием сканера. Учтем, что быстроедействие сканера определяется его периодом колебаний T на резонансной частоте f . Оценим быстроедействие сканера как $\tau \sim T/4 = 1/4 f$. Тогда силу, возникающую в момент контакта между зондом и образцом, можно оценить как

$$F_{SP} \sim 2 m_S l / \tau^2 = 32 m_S l f^2. \quad (13)$$

Для пути l , проходимого образцом до соударения с зондом, возьмем экспериментальное значение $l = l_0$, где l_0 – равновесное расстояние между зондом и образцом, определяемое из экспериментальной кривой подвода (рис. 3). Для устойчивой работы зонда необходимо удовлетворить условие

$$F_{SP} < F_{кр}.$$

Тогда, согласно выражениям (12) и (13), для устойчивости зонда в процессе ДСЛ и НИ получим условие

$$R^2_0 \operatorname{tg}^2 \alpha > 128 m_s l_0 f^2 / \pi^3 E \approx 4 m_s l_0 f^2 / E. \quad (14)$$

Методика эксперимента

В экспериментах по ДСЛ и НИ использовался СЗМ «NANOEDUCATOR» [6] с пьезорезонансным датчиком (рис. 1, б) силового взаимодействия [2]. Как и в работе [7], образцы для НИ и ДСЛ изготавливались из поликарбоната, на поверхность которого методом распыления Au мишени в Ag плазме напылялся тонкий слой Au. Давление газа составляло 2 мбар, ток разряда имел величину 30 мА. Расстояние от мишени до подложки составляло около 4 см. Толщина пленки контролировалась с помощью кварцевых весов и лежала в диапазоне 20–25 нм.

Визуализация поверхности проводилась в полуконтактном силовом режиме. В режимах ДСЛ и НИ, в определенных и заранее заданных точках (X_i, Y_i) , на вход высоковольтного усилителя, обеспечивающего перемещение образца по координате Z , подавался импульс напряжения, складывающийся в сумматоре с сигналом обратной связи следящей системы (СС) СЗМ. Для осуществления динамического контакта поверхности образца с зондом коэффициент усиления в разорванной петле обратной связи СС, амплитуда и длительность управляющего импульса подбирались таким образом, чтобы постоянная времени СС была больше времени сближения зонда с образцом. В противном случае СС скомпенсирует механический удар.

На обратном ходе развертки сканирования управляющий импульс на сумматор не подавался, а производилось считывание нанорельефа, образованного в результате динамического контакта. Таким образом, модификация и визуализация поверхности образца осуществлялись одним и тем же зондом.

Зонды для ДСЛ изготавливались из вольфрамовой проволоки с исходным диаметром 150 мкм с помощью электрохимического травления на переменном токе в слабом щелочном электролите (5% раствор КОН).

В отличие от режима ДСЛ, при реализации режима НИ использовался зондовый датчик в виде камертона, плечами которого являлись две пьезокерамические трубки. К одному из плеч камертона присоединялся зонд из вольфрамовой иглы (как на рис. 1, б). Такой зондовый датчик имел повышенную добротность по сравнению с датчиком на основе одиночной трубки и демонстрировал лучшую стабильность, что позволяло получать стабильный пьезоотклик датчика при индентировании поверхности образца.

Для работы в режиме НИ на вершине W острия закреплялся алмазный наконечник. Для этого поверхность W иглы покрывалась тонким слоем полимерного клея, затвердевающего под действием ультрафиолетового излучения. Затем осуществлялся контакт зонда с алмазным порошком (рис. 4, а), в результате которого к вершине острия прикреплялись случайно расположенные алмазные кристаллы. Окончательная фиксация микроалмазов на вершине W зонда осуществлялась под действием ультрафиолетового излучения. Контроль размеров и формы вершины W острия проводился с использованием растрового электронного микроскопа (рис. 4, б).

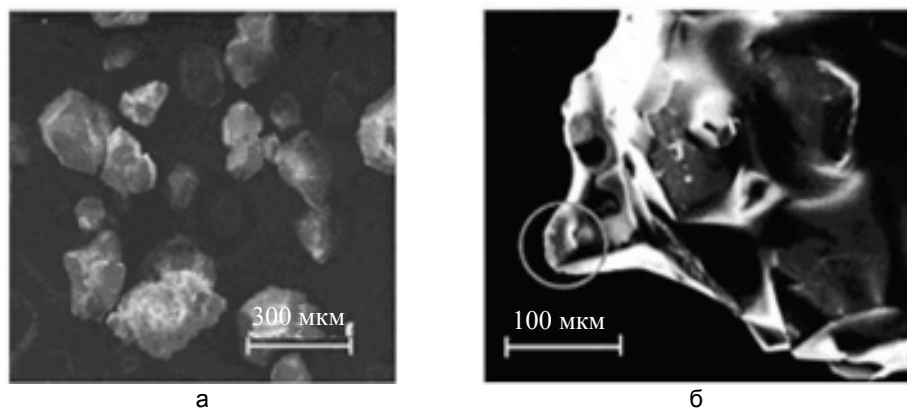


Рис. 4. РЭМ изображение исходного алмазного порошка: используемого при изготовлении зонда-индентера (а); вершина W зонда, модифицированного алмазными кристаллами (б)

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 5, а, представлено РЭМ изображение зонда с углом заточки около 10° и радиусом закругления около 70 нм. На рис. 5, б, представлено изображение этого же зонда после контакта с поверхностью образца в режиме ДСЛ. Видно, что под действием продольного сжатия зонд потерял форму. На рис. 5, в, представлено РЭМ изображение зонда с углом заточки около 30° и радиусом закругления около 120 нм, полученное после осуществления контакта с поверхностью того же образца при аналогичном воздействии управляющего импульса.

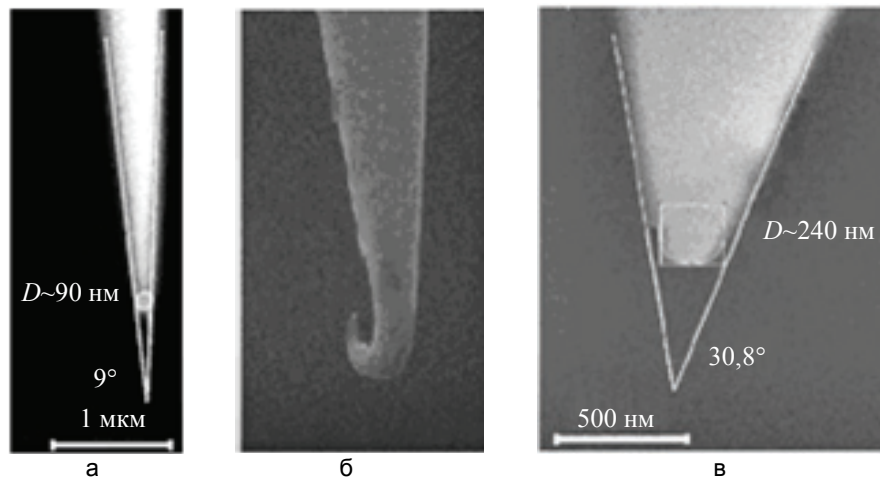


Рис. 5. РЭМ изображение W зондов: неустойчивый зонд до ДСЛ (а); неустойчивый зонд после продольного сжатия в режиме ДСЛ (б); устойчивый зонд после продольного сжатия в режиме ДСЛ (в)

Видно, что при данном угле заточки зонд сохранил свою форму при продольном сжатии в режиме ДСЛ. Полученный результат согласуется с приведенным выше оценочным условием (14) для устойчивости зонда. Действительно, у используемого в наших экспериментах прибора определенная экспериментально резонансная частота сканера f равнялась $\sim 10^3$ Гц и масса держателя с образцом m_s составляла $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ кг. Положив для модуля Юнга вольфрама E справочное значение $350 \cdot 10^9$ Па и взяв из экспериментальной кривой подвода (рис. 3, а) значение $l_0 \sim 20$ нм, получим, что зонд с радиусом 70 нм и углом заточки $\alpha = 10^\circ$ находится на границе условия устойчивости (14), а зонд с радиусом 120 нм и углом заточки $\alpha = 30^\circ$ попадает в область устойчивости относительно продольного сжатия. Конечно, следует помнить, что условие (14) представляет собой лишь грубую оценку экспериментальной ситуации, имеющей место в реальном режиме ДСЛ. Однако, принимая во внимание результаты эксперимента и учитывая, что при увеличении угла α с 10° до 30° требования неравенства (14) изменяются на порядок ($\text{tg}^2(30^\circ) / \text{tg}^2(10^\circ) = 11,6$), можно считать полученную выше оценку для устойчивости W зонда достаточно адекватной.

На рис. 6 представлено СЗМ-изображение результатов НИ поверхности поликарбоната. На поверхности образца наблюдается отчетливый отпечаток алмазной пирамидки, зафиксированной на вершине W зонда. Понятно, что зонд с алмазной пирамидкой на вершине защищен от наклепа.

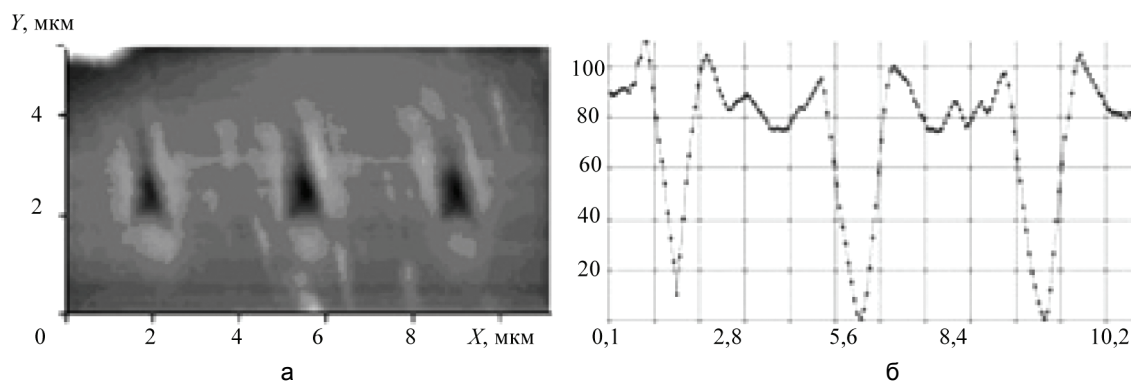


Рис. 6. Топография поверхности образца из поликарбоната после НИ зондом с алмазным кристаллом на вершине (а); поперечное сечение СЗМ-изображения (б)

Отметим, что в данном случае при изготовлении по описанному выше способу зонда для НИ (рис. 4, б) использовалось исходное W острие с радиусом закругления, много большим 100 нм. Очевидно, что

такие зонды останутся устойчивыми даже при больших давлениях в области контакта. Очевидно, что при работе с алмазными зондами-наноиндентерами, изготовленными на основе исходных W игл с малым радиусом закругления, оценивать их устойчивость по отношению к продольному сжатию можно также с помощью выражений (12), (14). Видно, что описанный выше способ создания W зонда с алмазным наконечником обеспечивает как собственно наноиндентирование, так и визуализацию наноотпечатка в полуконтактной силовой моде с хорошим пространственным разрешением.

На рис. 7 представлено СЗМ-изображение и поперечное сечение фрагмента двумерной решетки, созданной методом ДСЛ на поверхности Au пленки, напыленной на полимерную подложку. Период решетки d равен 460 нм вдоль направления AB и 265 нм вдоль направления, перпендикулярного к AB .

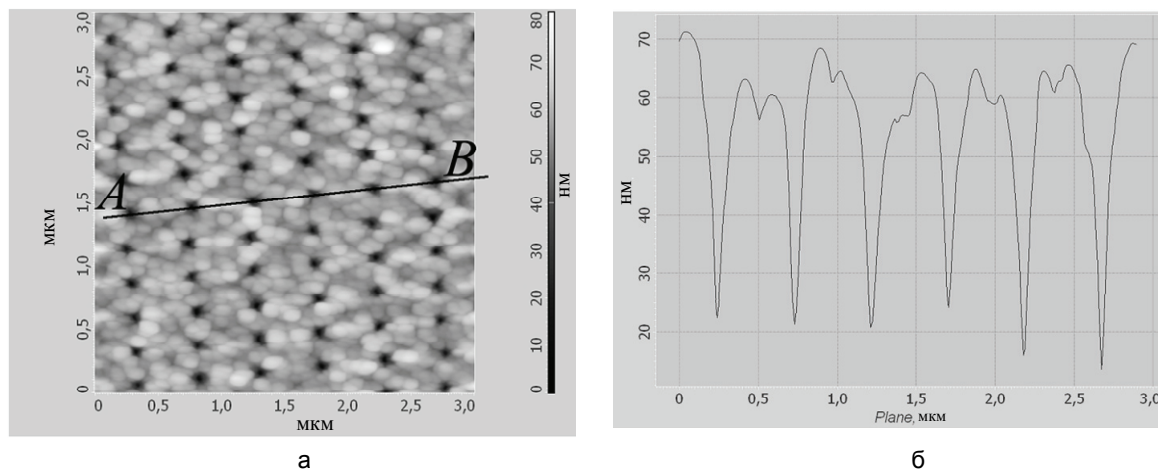


Рис. 7. СЗМ-изображение двумерной решетки, созданной методом ДСЛ в Au пленке толщиной 20 нм, напыленной на поликарбонатную подложку (а); поперечное сечение СЗМ-изображения, выполненное вдоль линии AB (б)

Отметим, что созданная с помощью W зонда методом ДСЛ структура представляет собой двумерную дифракционную решетку, которая, как известно, выполняет спектральное разложение при отражении белого света. В работающем на отражение оптическом микроскопе модифицированный в режиме ДСЛ участок золотой пленки выглядел как фиолетовый квадрат на золотом фоне при угле падения $\varphi = 45^\circ$.

Воспользовавшись условием $2d \sin \varphi = \lambda$ и положив для фиолетового света $\lambda = 390$ нм, получим $d=275$ нм, что согласуется с прямым измерением периода дифракционной решетки (рис. 7).

Заключение

В результате механического контакта зонда с поверхностью образца, осуществляемого в режимах ДСЛ и НИ, возникают силы продольного сжатия, которые могут привести к неустойчивости и необратимому изгибу вольфрамовых зондов, совмещенных с пьезорезонансными датчиками силового взаимодействия. Критическая сила, определяющая неустойчивость зонда, квадратичным образом уменьшается при уменьшении его радиуса и тангенса угла заточки. Показано, что вольфрамовые зонды с радиусом закругления около 100 нм и углом заточки около 30° , а также подобные зонды с алмазными наконечниками, устойчивы по отношению к изгибу при работе в режимах НИ и ДСЛ. С помощью таких зондов методом ДСЛ могут быть изготовлены дифракционные решетки на отражение, в том числе с переменным шагом.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК П557) и гранта 2.1.2/9784 Минобрнауки РФ.

Литература

1. Голубок А.О., Пинаев А.Л., Чивилихин Д.С., Чивилихин С.А. Динамическая силовая литография на тонких металлических пленках в сканирующем зондовом микроскопе с пьезорезонансным датчиком локального взаимодействия // Научное приборостроение. – 2011. – Т. 21. – № 1. – С. 31–43.
2. Голубок А.О., Васильев А.А., Кerpелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д. Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 62–69.
3. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания. – М.: Машиностроение, 1968. – 567 с.
4. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

5. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2006. – 160 с.
6. Быков В.А., Васильев В.Н., Голубок А.О. Учебно-исследовательская мини-лаборатория по нанотехнологии на базе сканирующего зондового микроскопа NanoEducator // Российские нанотехнологии. – 2009. – № 5–6. – С. 45–48.
7. Пинаев А.Л., Голубок А.О. Микро- и наномодификация металлического слоя на полимерной подложке в режиме динамической силовой литографии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 68. – С. 67–73.

- Голубок Александр Олегович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, golubok@ntspb.ru
- Пинаев Александр Леонидович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, младший научный сотрудник, pinaich@mail.ru
- Феклистов Андрей Алексеевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, feklstoff@yandex.ru
- Чивилихин Сергей Анатольевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, chivilikhin@gmail.com

УДК 004.89

МНОГОАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ
НЕИНФОРМИРОВАННОГО ПОИСКА

И.А. Бессмертный, К.А. Булыгин

Рассматривается подход к задаче поиска на дереве решений, основанный на использовании множества агентов, обменивающихся информацией и обладающих роевым интеллектом. В отличие от классических методов поиска, данный подход обеспечивает быстрое получение удовлетворительных решений и может использоваться в задачах с большим числом участников движения при условии доступа к коллективной базе данных для получения известных маршрутов и сохранения накопленного опыта.

Ключевые слова: задача поиска, агенты, роевой интеллект.

Введение

Существует обширный класс задач, решение которых сводится к поиску на дереве решений. К ним относятся транспортно-логистические задачи, планирование, упаковка, раскрой, маршрутизация в коммуникационных сетях и др. Самыми простыми являются методы неинформированного поиска, не требующие дополнительной информации для выбора путей на дереве решений. Эти методы имеют экспоненциально возрастающую сложность, поэтому получить оптимальное решение в приемлемые сроки не всегда возможно [1].

Между тем в повседневной жизни нам постоянно приходится решать подобные задачи, и помогает в этом опыт, как собственный, так и заимствованный. В последнее время в решении многих задач активно используется подход, называемый роевым интеллектом (*swarm intelligence*) [2], заключающийся в использовании многочисленных агентов, функционирующих по очень простому алгоритму и обменивающихся между собой информацией. Результативность работы роя агентов может быть существенно выше, чем одного агента, работающего по сложному алгоритму. Целью данного исследования является оценка возможности применения мультиагентного подхода и роевого интеллекта к неинформированному поиску.

Метод случайных блужданий

Вероятность p достижения цели при однократном случайном перемещении по дереву поиска на величину средней глубины дерева вычисляется следующим образом:

$$p = 1/b^d,$$

где b – коэффициент ветвления дерева поиска; d – средняя глубина дерева поиска. Среднее число попыток A до первого достижения цели при равномерном распределении вероятностей ветвления в каждой i -ой ветви дерева

$$A = \sum_{i=1}^{b^d} p(1-p)^{i-1}i = \sum_{i=1}^{b^d} \frac{1}{b^d} \left(1 - \frac{1}{b^d}\right)^{i-1} i. \quad (1)$$

Пусть имеется транспортная сеть размерностью $N \times N$, изображенная на рис. 1, состоящая из узлов и дуг, где узлы соответствуют перекресткам, а дуги – дорогам.

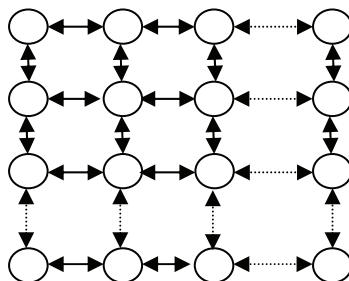


Рис. 1. Топология сети

Участник движения (агент) совершает поездки из одного узла в другой. Нахождение оптимального маршрута требует знания взаимного положения узлов и дорожной обстановки. В противном случае размерность задачи поиска не позволит решить ее в разумные сроки. Длительность поиска методом сначала в ширину определяется формулой

$$T = tb^d, \quad (2)$$

где t – время развертывания одного узла; b – коэффициент ветвления; d – глубина поиска (средняя длина маршрута). Для вычисления времени T по (2) необходимо располагать значениями t , b и d . Средняя протяженность оптимального маршрута (глубина поиска) для данной топологии сети равна $2N/3$, а коэффициент ветвления $b = 2$ при $N = 2$ и $b \rightarrow 3$ при $N \rightarrow \infty$. Величину t можно определить только экспериментальным путем. Однако подобрать t для (1) не удалось, а для результатов натуральных экспериментов была найдена аппроксимирующая функция

$$T_N = tb^{2N}, \tag{3}$$

где время развертывания одного узла $t = 0,15 \cdot 10^{-5}$ подобрано для конкретного компьютера, на котором проводились измерения. Подстановка в (2) значения размерности сети $N = 10$ даст среднее время поиска около 1,5 часов, что неприемлемо для большинства применений.

Среднее число развертываемых вершин для метода случайных блужданий V_r будет равно

$$V_r = dA = d \sum_{i=1}^{b^d} \frac{1}{b^d} \left(1 - \frac{1}{b^d}\right)^{i-1} i.$$

На рис. 2 приведено сравнение числа развертываемых вершин при поиске сначала в ширину и случайном поиске.



Рис. 2. Сравнение поиска в ширину и случайного поиска

Как и ожидалось, случайные блуждания приводят к существенно большему числу развертываемых вершин до первого достижения цели, чем при поиске методом перебора, что делает такой подход совершенно бесперспективным.

Если агент, двигаясь по сети, не имеет цели, но при случайных блужданиях сохраняет в памяти все маршруты, то через некоторое время сеть окажется полностью покрытой маршрутами, соединяющими каждую точку с каждой. На рис. 3 показаны расчетные зависимости средней длины маршрута при случайном поиске, а также сложности поиска в ширину (числа развертываемых вершин) от размерности сети.

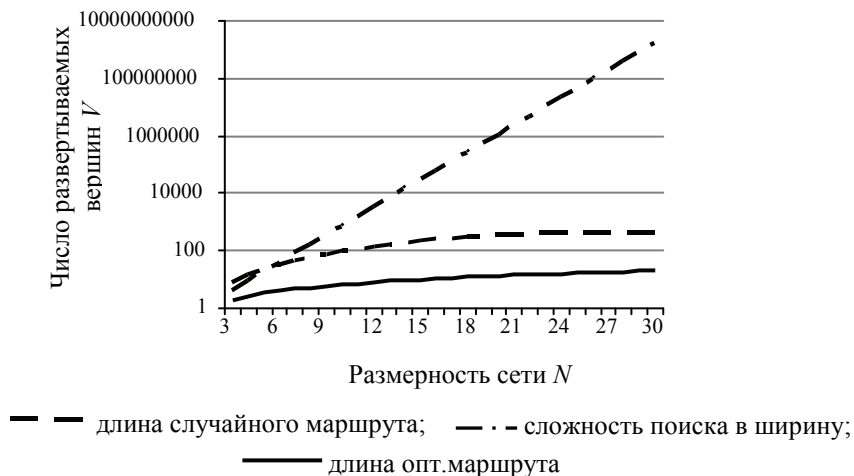


Рис. 3. Сравнение поиска в ширину и метода случайных блужданий

Приведенные здесь данные показывают, что сложность покрытия всей сети маршрутами методом случайного поиска на 3–7 порядков ниже, чем при поиске одного маршрута путем перебора, но средняя длина маршрута больше кратчайшей длины приблизительно на порядок. Очевидно, что такой результат нельзя признать удовлетворительным.

Если при случайных блужданиях агент вправе на каждом шаге выбирать любое направление, то возможны заведомо неэффективные маршруты. Для устранения таких неэффективных маршрутов интеллект агентов можно усилить, добавив два варианта запоминания исходного направления и запретив при случайных блужданиях движение, противоположное первоначально выбранному (тактика «ни шагу назад»).

Вариант «а» предполагает, что агент размещается в произвольно выбранном узле сети и случайно выбирает одно из четырех направлений. При последующих блужданиях разрешаются все направления, кроме противоположного первоначально. Предположительно, такой алгоритм будет плохо прокладывать диагональные маршруты, хотя при такой топологии сети движение по диагонали зигзагами не более эффективно, чем перемещение по катетам. Заметим, что в реальной транспортной задаче постоянные повороты лишь замедляют движение. При варианте «б» агент первоначально выбирает одно из восьми направлений, четыре ортогональных и четыре диагональных. Если на первом шаге выбрана диагональ, то при последующих блужданиях разрешены только два направления, горизонтальное и вертикальное, в сторону данной диагонали.

Рис. 4 показывает результаты компьютерного моделирования полностью случайных блужданий, а также с использованием двух вариантов алгоритма «ни шагу назад». Для сравнения показано также расчетное время поиска в ширину.

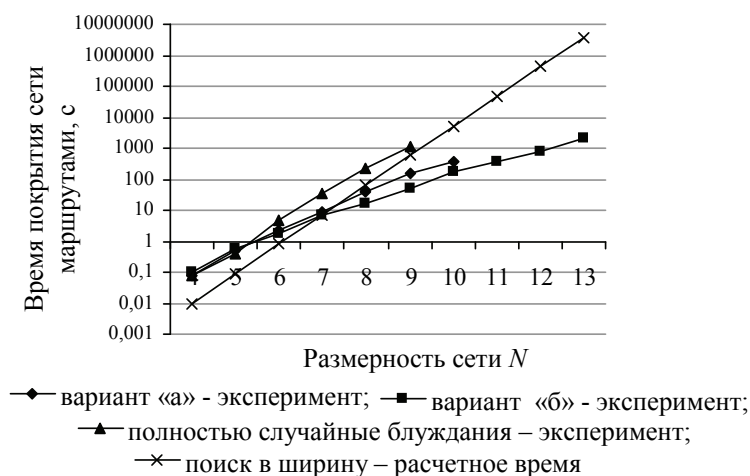


Рис. 4. Время покрытия сети

Результаты экспериментов показывают, что при полностью случайных блужданиях, начиная с размерности сети 8×8 , сеть полностью покрывается маршрутами быстрее, чем поиск в ширину находит один маршрут, а тактика «ни шагу назад» дает ускорение покрытия сети еще на порядок.

Исследование сочетания метода случайных блужданий и роевого интеллекта

Предположим, что имеется множество агентов (участников движения), которые совершают поездки с заданными целями и запоминают результаты в общей базе данных. Если маршрут, соединяющий две точки, уже имеется в базе, он прокладывается заново, и если длительность нового маршрута меньше, чем уже запомненного, то данные в базе обновляются, т.е. происходит обучение роя агентов. Таким образом, после множества поездок всех агентов роя будут найдены кратчайшие маршруты для всех пар начальных и конечных точек.

Как и в предыдущих экспериментах, вместо нахождения одного маршрута ставится задача найти все возможные маршруты в сети. Если между текущей позицией агента и целью уже есть проложенный маршрут, он присоединяется к текущему маршруту. Если между стартовой и финишной точкой есть промежуточная точка, к которой уже есть маршруты от старта и финиша, то маршрут строится из двух уже проложенных отрезков. Исследование данного подхода проводилось на компьютерной модели, написанной на языке SWI-Prolog. Зависимость времени покрытия сети T от размерности N представлена на рис. 5.

Полученные результаты показывают, что агенты, обменивающиеся опытом, покрывают всю сеть маршрутами существенно быстрее, чем это делает один агент. Поскольку каждый найденный маршрут сохраняется в базе маршрутов, эта база довольно быстро становится полной, а дальнейшие перемещения агентов только сокращают длины маршрутов. Таким образом, рой агентов достаточно быстро дает все решения, пусть даже и не идеальные, а дальнейшие блуждания сокращают длины маршрутов.

Для количественной оценки качества покрытия сети введем понятие оптимальность как отношение минимальной суммарной длины маршрутов к их фактической суммарной длине.

Рис. 6 демонстрирует скорость сходимости процесса поиска решений, полученную в результате экспериментов на модели. Графики на рис. 6 показывают, что средняя протяженность маршрута при-

ближается к оптимальной по асимптоте. Таким образом, здесь действует закон сохранения: выигрыш времени получен за счет потери качества. Получить покрытие сети кратчайшими маршрутами можно лишь после длительного поиска.

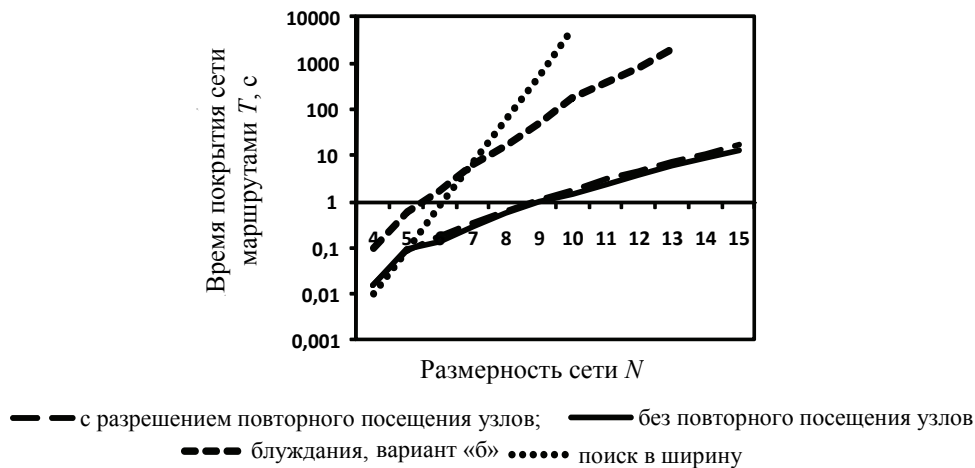


Рис. 5. Зависимость времени покрытия T от размерности сети N

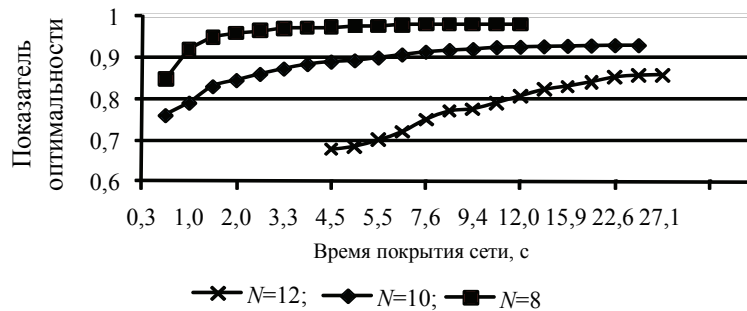


Рис. 6. Сходимость процесса поиска решений

Заключение

Результаты исследования роевого интеллекта применительно к поиску маршрутов в транспортной сети показывают, что метод случайных блужданий при накоплении опыта показывает удовлетворительные результаты, причем не требует эвристик. В отличие от других методов (либо решение оптимальное, либо его нет вовсе) [3, 4] качество решения здесь является функцией от длительности обучения агентов. Примечательно, что сеть полностью покрывается маршрутами существенно быстрее, чем классические алгоритмы находят единственный маршрут. Скорость нахождения решений зависит не от индивидуального интеллекта агентов, а, главным образом, от способности агентов обмениваться опытом. Таким образом, эффект роевого интеллекта заключается в доступности накопленного чужого опыта.

Литература

1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: Современный подход. – 2-е изд. Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 1408 с.
2. Engelbrecht A.P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. – John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2005.
3. Бессмертный И.А. Теоретико-множественный подход к логическому выводу в базах знаний // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 2(66). – С. 43–48.
4. Бессмертный И.А. Быстрый логический вывод в среде программирования Visual Prolog // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3(67). – С. 50–56.

Бессмертный Игорь Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, igor_bessmertny@hotmail.com

Булыгин Кирилл Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kirill.bulygin@gmail.com

УДК 004.415.532.3

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ
ТЕСТОВ ДЛЯ ПРОГРАММ, СОДЕРЖАЩИХ ОБРАБОТКУ ИСКЛЮЧЕНИЙ**

А.М. Карпушинский, Т.А. Павловская

Рассмотрены проблемы автоматической генерации тестовых данных для программ, написанных на объектно-ориентированном языке и содержащих конструкции обработки исключений. Описаны преимущества применения генетических алгоритмов на этапе поиска тестовых данных. Предложен алгоритм поиска тестов для интеграционного тестирования объектно-ориентированного кода, описана его реализация и апробация.

Ключевые слова: генерация тестовых данных, обработка исключений, генетические алгоритмы.

Введение

При тестировании программного обеспечения часто требуется найти тестовые наборы, покрывающие специфичные особенности программы. Отыскивать такие тесты вручную – процесс чрезвычайно долгий и трудоемкий, особенно когда программа сложная, поэтому в последнее время прилагаются усилия к созданию средств, автоматизирующих этот процесс, т.е. разработке методов автоматизированной генерации тестовых данных (АГТД). Большинство существующих методов поиска тестовых данных ориентированы на структурные языки программирования, в то время как объектно-ориентированные языки программирования (ООЯП) гораздо более сложны в тестировании. Наследование, полиморфизм, обработка исключений, события и прочие механизмы ООЯП привносят неявный поток управления.

Все ООЯП являются событийно-управляемыми, т.е. передача управления внутри программы выполняется как прямо (непосредственный вызов одних функций из других), так и косвенно (посредством генерации *сообщений* одним объектом и передачи их другим объектам для обработки). Механизм обмена сообщениями характеризуется тем, что при выполнении программы после обработки сообщения контроль всегда возвращается вызывающему объекту. Основными источниками сообщений в ООЯП являются события (например, event в C#), асинхронные вызовы (которые, по сути, являются комбинацией событий) и исключения (exceptions). Механизм обработки исключений представляет собой последовательность выброса исключения и его обработки либо в том же методе, в котором оно было выброшено, либо в одном из вызывающих (объемлющих) методов, находящихся ниже в стеке вызовов [1]. Сообщение генерируется в том случае, если при выбросе исключения управление передается в один из вызывающих методов.

Учитывая вышеизложенное, тестирование программы, написанной на ООЯП, можно разбить на два уровня: модульное тестирование, при котором каждый класс тестируется отдельно (при этом используются методы структурного тестирования, применимые для процедурных языков), и интеграционный (необходима адаптация существующих методов АГТД к механизму обмена сообщениями в ООЯП).

На уровне модуля тестирование каждого класса начинается с построения управляющего графа каждого класса программы, затем выбирается критерий покрытия структурных элементов программы (покрытие операндов, дуг или путей) и разрабатывается алгоритм нахождения входных тестовых данных, удовлетворяющих выбранному критерию. На интеграционном уровне каждая функция в классе является «черным ящиком», а механизм обмена сообщениями отражается диаграммой последовательностей, которая является формальной спецификацией программы. При этом осуществляется переход от структурной модели программы к ее поведенческой модели.

Целью данной работы является разработка и апробация нового метода АГТД, использующего метод глобальной оптимизации на основе генетического алгоритма. Предлагаемый метод адаптирован для решения проблемы тестирования объектно-ориентированного кода, содержащего, в частности, обработку исключений как один из аспектов событийно-управляемой модели.

Существующие методы АГТД

Перечислим существующие техники АГТД, применяемые при тестировании процедурного программного обеспечения:

- символьное выполнение;
- тестирование на основе ограничений;
- случайное тестирование;
- локальный и глобальный поиск (моделирование отжига, метод Миллера–Спунера, метод вариации переменной Корела, цель-ориентированный метод, генетические алгоритмы, алгоритмы роевого интеллекта, меметические алгоритмы – гибрид эволюционных алгоритмов и алгоритмов локального поиска).

Статические методы генерации (такие как метод символьного выполнения и метод ограничений) достаточно хорошо описаны и используются при тестировании процедурного кода. Они основаны на анализе внутренней структуры тестируемой программы и не требуют ее выполнения. В рамках статического метода производится обход заданного пути в управляющем графе и построение символьного представления значений внутренних переменных как выражений, содержащих только входные переменные.

Остальные перечисленные методы относятся к классу динамических. Они используют реальное выполнение программы, что позволяет избежать недостатков статических методов, а именно: неэффективности при наличии циклов, указателей и массивов (статический анализ зависимостей между входными данными и внутренними переменными затруднен), а в рамках ООЯП – при наличии неявного потока управления. К динамическим относятся методы случайного поиска, локального поиска, поиска с использованием методов глобальной оптимизации (симуляции отжига, генетических алгоритмов, алгоритмов роевого интеллекта).

Ниже представлено описание общего генетического алгоритма и рассмотрена его адаптация для использования при АГТД для тестирования объектно-ориентированных программ.

Генетические алгоритмы

Генетический алгоритм (ГА) в общем случае является алгоритмом глобальной оптимизации некоторой целевой функции многих переменных. Он основан на процессах, подобных процессу эволюции в природе. Возможные решения задачи оптимизации именуется особями (хромосомами). Множество возможных решений образует популяцию. Каждая особь оценивается степенью приспособленности (целевой функцией, показывающей, насколько «хорошим» является решение в контексте данной задачи) [2, 3]. С помощью функции приспособленности среди всех особей популяции выделяют:

- наиболее приспособленные (более подходящие решения), которые получают возможность скрещиваться и давать потомство;
- наихудшие (плохие решения), которые удаляются из популяции и не дают потомства.

Таким образом, приспособленность нового поколения в среднем выше предыдущего. Возможные решения обычно кодируются (чаще всего, преобразуются в битовые строки) для применения к ним генетических операций. К этим операциям относятся скрещивание (кроссовер) и мутация.

В классическом ГА:

- начальная популяция формируется случайным образом;
- размер популяции (число особей N) фиксируется и не изменяется в течение работы всего алгоритма;
- каждая особь генерируется как случайная L -битная строка, где L – длина кодировки особи;
- длина кодировки для всех особей одинакова.

На рис. 1 изображена общая схема работы генетического алгоритма.

Шаг алгоритма состоит из трех стадий:

1. генерация промежуточной популяции путем отбора текущего поколения;
2. скрещивание особей промежуточной популяции путем кроссовера, что приводит к формированию нового поколения;
3. мутация нового поколения.

Промежуточная популяция – это набор особей, получивших право размножаться. Наиболее приспособленные особи могут быть записаны туда несколько раз, наименее приспособленные с большой вероятностью туда вообще не попадут. В классическом ГА вероятность каждой особи попасть в промежуточную популяцию пропорциональна ее приспособленности, т.е. работает пропорциональный отбор. Особи промежуточной популяции случайным образом разбиваются на пары, потом с некоторой вероятностью скрещиваются, в результате чего получаются два потомка, которые записываются в новое поколение, или не скрещиваются, тогда в новое поколение записывается сама пара. В классическом ГА применяется одноточечный оператор кроссовера: для родительских строк случайным образом выбирается точка раздела, потомки получаются путем обмена отсеченными частями. К полученному в результате отбора и скрещивания новому поколению применяется оператор мутации, необходимый для «выбивания» популяции из локального экстремума и способствующий защите от преждевременной сходимости.

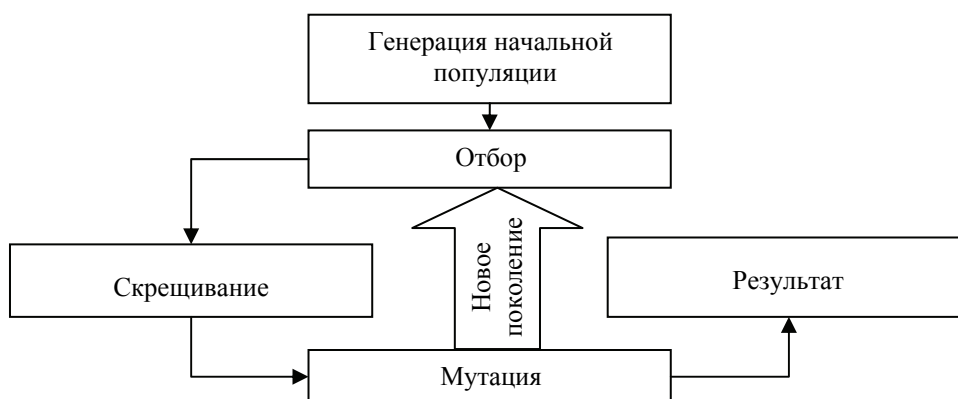


Рис. 1. Общая схема работы генетического алгоритма

Такой процесс эволюции может продолжаться до бесконечности. Критерием останова может служить заданное количество поколений или схождение популяции. Схождением называется состояние популяции, когда все строки популяции находятся в области некоторого экстремума и почти одинаковы [3, 4]. Иначе говоря, кроссовер практически никак не изменяет популяции, а мутирующие особи склонны вымирать, так как менее приспособлены. Таким образом, схождение популяции означает, что достигнуто решение, близкое к оптимальному. Итоговым решением задачи может служить наиболее приспособленная особь последнего поколения.

Адаптация генетического алгоритма для нахождения тестовых наборов

Рассмотрим ГА, адаптированный для решения проблемы интеграционного тестирования ООЯП. Положим, что каждый метод в отдельности протестирован и представляет собой «черный ящик», а передача управления между методами осуществляется посылками сообщений (будь то явный вызов или возврат, обработка события или исключения). Таким образом, программа представляется в виде совокупности классов, экземпляры которых «общаются» посредством посылки сообщений друг другу. Описание таких взаимодействий может быть отражено диаграммой последовательностей (рис. 2), и эта диаграмма может служить формальной спецификацией для разрабатываемой программы.

В любой момент времени класс может находиться в одном из своих состояний. Каждое состояние характеризуется совокупностью значений полей и наличием одного из полученных сообщений. Необходимо учитывать, что различные экземпляры одного и того же класса могут иметь отличное друг от друга поведение, т.е. посылать различные сообщения и иметь, таким образом, разные множества состояний, которые могут пересекаться. В первую очередь это обусловлено возможностью определить для класса несколько конструкторов, в каждом из которых варьируются начальные значения полей.

Пусть дан класс C , и пусть S_C – множество состояний этого класса, а Φ_C – множество операций класса C , т.е. множество возможных последовательностей передачи управления, доступных классу C . Тогда для каждой пары состояний s_1 и s_2 можно найти некоторое количество последовательностей операций Φ_C , которые обуславливают переход из s_1 в s_2 и, потенциально, могут выявить ошибку в классе C . Последовательность операций $f \in \Phi_C$ есть функция отображения S_C на S_C . Таким образом, для различных начальных состояний данная последовательность может выявить ошибки в реализации.

Исходя из вышесказанного, тестовый набор при тестировании класса должен состоять из набора тщательно выбранных последовательностей переходов, а также набора состояний класса.

При интеграционном тестировании программы, состоящей из нескольких классов, формальной спецификацией может быть диаграмма последовательностей. При этом критерием тестирования является покрытие всех дуг (т.е. всех возможных передач управления между методами всех классов). Иными словами, для диаграммы последовательностей S и тестируемой программы P тестовый набор T удовлетворяет критерию покрытия дуг, если каждая дуга в S , представляющая передачу сообщения, пройдет хотя бы один раз при выполнении P на данном тестовом наборе T . В общем виде необходимо, чтобы каждое сообщение в диаграмме было послано хотя бы один раз. На рис. 3 представлена общая схема предлагаемого генетического алгоритма.

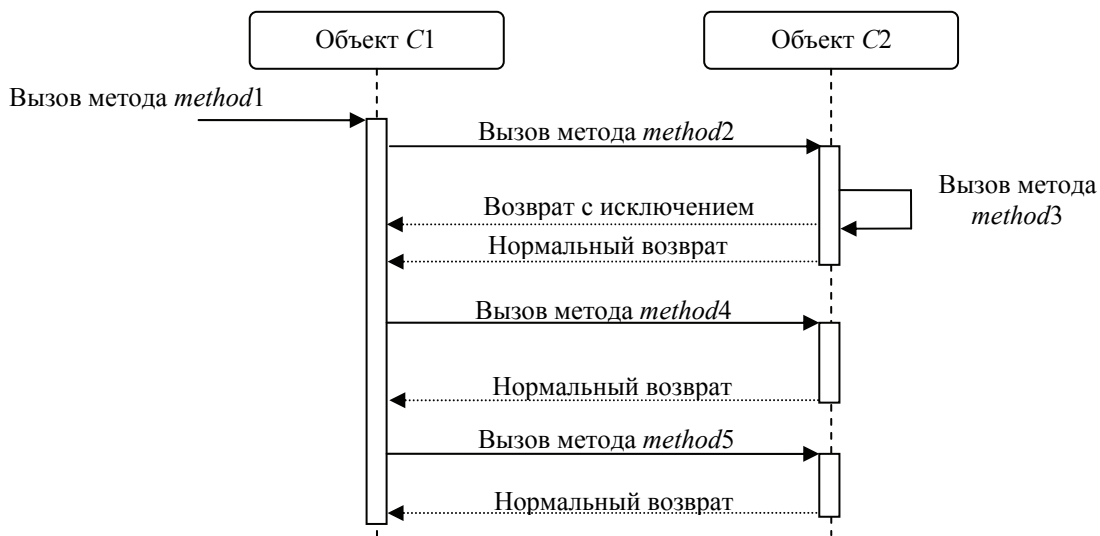


Рис. 2. Диаграмма последовательностей

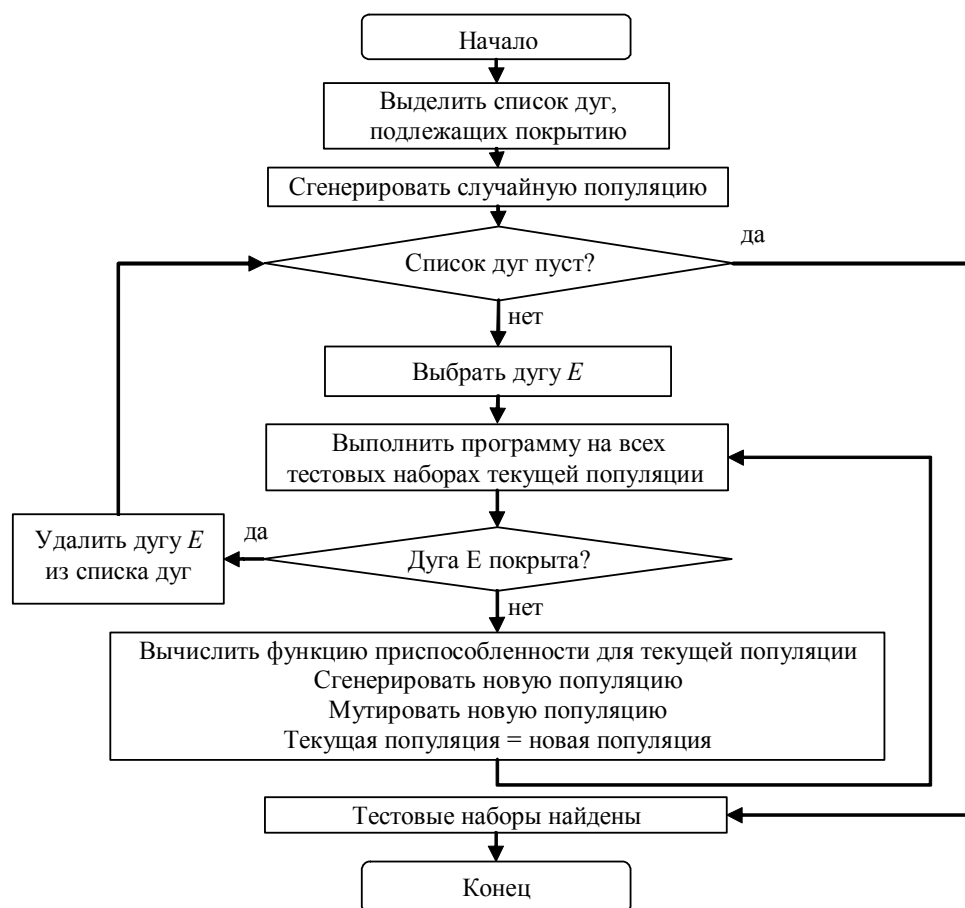


Рис. 3. Алгоритм генерации тестовых данных

Пусть искомые тестовые наборы полагаются особями в рамках алгоритма. Хромосомой особи будем считать последовательность конструктора, одного или нескольких вызовов других методов (включая значения параметров) и послышки сообщений, а также номера состояния, в которое переходит класс в результате выполнения этой последовательности. Первым шагом алгоритма является выделение списка всех дуг, которые нужно покрыть тестовыми наборами. Функцию приспособленности определим как отношение числа дуг, приведших к дуге E (рис. 3) на текущем тестовом наборе, к общему числу дуг, которые могут привести к этой дуге. Мутации особей можно проводить одним из следующих способов:

- изменение входных значений;
- изменение конструктора;
- добавление в последовательность вызова метода;
- удаление вызова метода из последовательности.

Скрещивание двух выбранных с определенной вероятностью особей происходит оператором однотоочечного кроссовера: случайным образом выбирается точка раздела, потомки получаются путем обмена отсеченными частями. Критерием останова является схождение популяции либо установленное число поколений.

Реализация

Предложенный алгоритм является частью разработанной системы АГТД, применяемой для тестирования программ, написанных с использованием ООЯП Java и содержащих обработку исключений. Экспериментальная разработка построена на языке C# .NET (.NET Framework v4.0) и включает следующие компоненты:

1. Разработанный синтаксический анализатор исходного кода на языке Java на базе свободно распространяемого инструмента antlr (www.antlr.org);
2. Разработанный построитель управляющего графа, использующий синтаксическое дерево исходной Java-программы и генерирующий внутреннее, а также текстовое представление управляющего графа;
3. Визуализатор управляющего графа;
4. Разработанный инструментатор. Используется для внесения в текст исходной программы вызовов служебных процедур, фиксирующих ход выполнения программы;

5. Разработанные модули алгоритмов генерации тестовых данных, реализующие предложенный генетический алгоритм, а также уже существующие алгоритмы поиска тестовых данных, включенных с целью оценки эффективности разработанного алгоритма;
6. Среда компиляции, включающая компилятор java (java.exe), и среда многократного выполнения инструментированной программы на разных входных данных, функционирующая на основе командных файлов.

Работа системы на программах небольшой величины (до 10 методов и 200 строк) показала результаты, приемлемые по производительности. Эффективность поиска сравнима с работой систем, основанных на уже существующих динамических методах, таких как метод локального поиска Б. Корела и метод последовательной релаксации (без учета конструкций обработки исключений). В ходе апробации системы получаемые тестовые наборы почти всегда удовлетворяли критерию покрытия путей (в зависимости от количества сложных передач управления внутри методов). Таким образом, в результате тестирования разработанной системы АГТД выявились ограничения для программ, подлежащих тестированию: циклы с переменным числом итераций, приведение типов, наследование, сложные структуры данных (переменные-объекты со множеством вложений).

Заключение

В рамках работы были изучены существующие методы АГТД, рассмотрены проблемы тестирования ООЯП, предложен способ АГТД объектно-ориентированных программ, содержащих обработку исключений, разработан и апробирован метод генерации тестовых наборов, основанный на генетическом алгоритме.

Литература

1. Shujuan Jiang, Yuanpeng Jiang. An analysis approach for testing exception handling programs // SIGPLAN Notices. ACM. – NY: ACM. – 2007. – V. 42. – P. 3–8.
2. Sandhu P.S., Dhiman S.K., Goyal A.A genetic algorithm based classification approach for finding fault prone classes // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – V. 60. – P. 485–488.
3. Буздалов М.В. Генерация тестов для олимпиадных задач по программированию с использованием генетических алгоритмов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2(72). – С. 72–76.
4. Новосельский В.Б., Павловская Т.А. Выбор и обоснование критерия эффективности при проектировании распределенных баз данных // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 2(60). – С. 76–82.

Карпушинский Антон Михайлович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, nochnik@inbox.ru
Павловская Татьяна Александровна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, профессор, pta-ipm@yandex.ru

УДК 535:621.373.826:539

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ И ЭЛЕМЕНТЫ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ

А.В. Беликов, А.В. Скрипник, Т.В. Струнина, К.В. Шатилова

Впервые представлены результаты обработки твердых тканей зуба человека импульсами YLF: Er лазера с диодной накачкой. Длительность импульсов YLF: Er лазера, генерирующего на длине волны 2,81 мкм, была около 1,4 мс. Впервые в экспериментах *in vitro* измерены эффективность удаления эмали и дентина зуба человека, диаметр, глубина и аспектное соотношение отверстий, формируемых в твердых тканях зуба человека под действием излучения этого лазера.

Ключевые слова: YLF: Er лазер, дентин, эмаль, зуб человека, лазерное текстурирование, микро сверление, эффективность удаления, аспектное соотношение.

Введение

Лазерные источники на кристаллах YAG: Er, YSGG: Cr, Er и YLF: Er считаются наиболее перспективными для обработки твердых тканей зуба, поскольку длины волн их излучения лежат вблизи пиков поглощения эмали и дентина [1–5]. Излучение YAG: Er и YSGG: Cr, Er лазеров с успехом используется для формирования полостей в эмали и дентине зуба при терапии кариеса перед постановкой пломб [6]. В работе [7] было показано, что текстуры, созданные излучением одномодового YAG: Er лазера на поверхности твердых тканей зуба, способствуют повышению адгезии современных светополимеризующихся материалов к твердым тканям зуба. Для создания текстур в [7] использовался YAG: Er лазер с энергией импульса 1 мДж, с длительностью импульса по полувысоте 100 мкс. Текстуры представляли собой регулярную последовательность из одиночных лазерных микрократеров (элементов текстур) диаметром 100 мкм и глубиной 45 мкм. В работе [8] описан оригинальный метод внутреннего отбеливания зуба человека [9] с применением излучения одномодового YSGG: Cr, Er лазера. Для доставки отбеливающего вещества (перекиси водорода) в дентин зуба используются микроканалы, сформированные под действием излучения одномодового YSGG: Cr, Er лазера. Микроканалы обладают высоким аспектным соотношением (отношением глубины микроканала к его диаметру). В работе [10] было показано, что при помощи излучения одномодового YAG: Er лазера возможно создание микроканалов с наиболее высоким аспектным соотношением.

Дальнейший прогресс использования лазерного излучения в стоматологии в значительной мере связан с поиском новых лазерных сред и методов их накачки. Применение диодной накачки для получения трехмикронного лазерного излучения позволяет существенным образом снизить массогабаритные характеристики лазерной стоматологической установки по отношению к современным аналогам, использующим ламповую накачку. Использование кристалла YLF: Er в качестве активной среды лазера с диодной накачкой позволяет получать эффективную генерацию на различных длинах волн, в том числе 2,66 мкм, 2,71 мкм и 2,81 мкм [11]. В работе [12] представлены результаты исследования обработки твердых тканей зуба излучением YLF: Er лазера с диодной накачкой и длиной волны генерации 2,66 мкм. Показано, что при сопоставимой длительности лазерных импульсов, эффективность удаления твердых тканей зуба излучением YLF: Er лазера с длиной волны генерации 2,66 мкм практически в 2 раза меньше эффективности их удаления излучением YAG: Er лазера с длиной волны генерации 2,94 мкм.

В настоящей работе проводится исследование возможности обработки твердых тканей зуба, а именно, создание текстур и микроканалов излучением YLF: Er лазера с диодной накачкой и длиной волны генерации 2,81 мкм. Исследованы геометрические параметры микрократеров, эффективность удаления эмали и дентина зуба человека, а также аспектное соотношение микроканалов, созданных излучением YLF: Er лазера с длиной волны генерации 2,81 мкм. Проведено сравнение результатов с результатами, полученными в работе [12].

Материалы и методы

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

В работе использовался макет YLF: Er лазера с диодной накачкой (Dental Photonics Inc., США), работающего в режиме свободной генерации. На длине волны генерации 2,81 мкм длительность импульса генерации (по основанию) τ составляла 1400 мкс, а энергия импульса достигала 50 мДж. На рис. 1

представлена осциллограмма импульса типичного для используемого в настоящем исследовании YLF: Er лазера. Относительная величина амплитуды A' рассчитывалась как отношение текущего i -го значения амплитуды к максимальному.

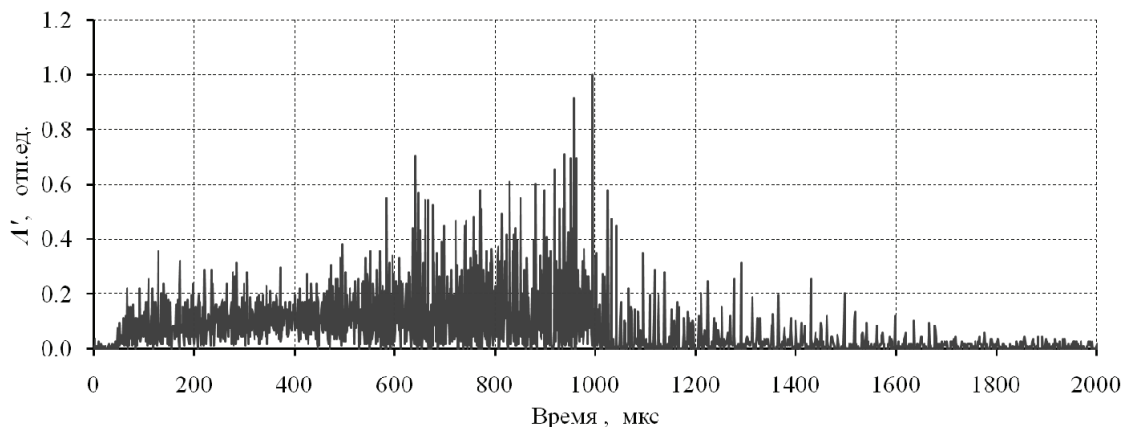


Рис. 1. Осциллограмма импульса излучения YLF: Er лазера ($\tau \sim 1400$ мкс)

При помощи алмазного диска на поверхности эмали и дентина формировалась плоская площадка. Лазерная обработка тканей зуба производилась в неконтактном режиме, без внешнего водяного охлаждения. Лазерное излучение фокусировалось на поверхности площадки собирающей линзой ($f' = 38$ мм). Микрократеры в эмали или дентине зуба формировались в результате воздействия одиночного лазерного импульса ($N_p = 1$) на поверхность сформированной ранее плоской площадки. Энергия одиночного лазерного импульса E_p для YLF: Er ($\lambda = 2,81$ мкм) изменялась с помощью внрезонаторного ослабителя Френеля и в настоящем исследовании была приблизительно 1 мДж и 2 мДж. Микроканалы формировались под действием последовательности лазерных импульсов ($N_p = 100$), следующих друг за другом с частотой около 1 Гц. При этом энергия одиночного лазерного импульса E_p для YLF: Er ($\lambda = 2,81$ мкм) была приблизительно 30 мДж.

После создания на поверхности эмали и дентина микрократеров и микроканалов образцы фотографировались. Затем образцы шлифовались для формирования продольных сечений, принадлежащих плоскости, проходящей через центральную ось микрократеров (микроканалов). Продольные сечения микрократеров (микроканалов) фотографировались. Диаметр D_0 и глубина h_0 микрократеров и микроканалов измерялись по фотографиям их продольных сечений. Затем рассчитывался объем микрократера V_0 и эффективность удаления биоткани $\langle \varepsilon \rangle$. Эффективность удаления биоткани $\langle \varepsilon \rangle$ рассчитывалась как отношение объема микрократера V_0 к энергии, затраченной на его формирование. Также рассчитывалось аспектное соотношение микроканалов A как отношение диаметра микроканала к его глубине.

Результаты и обсуждение

Поскольку в ходе воздействия излучения YLF: Er лазера с энергией 1 мДж разрушения эмали не были выявлены, то дальнейшие исследования проводились для излучения YLF: Er лазера с энергией 2 мДж. Для расчета объема микрократеров его форма аппроксимировалась элементарными фигурами вращения. В исследовании были зафиксированы две характерные формы микрократеров: полусфера и усеченный конус.

Для микрократеров, имеющих форму полусферы, объем вычислялся как

$$V_{\text{нс}} = \frac{1}{12} \cdot \pi D_0^3,$$

где D_0 – диаметр отверстия в твердой ткани зуба. Для микрократеров, имеющих форму усеченного конуса, объем вычислялся как

$$V_{\text{ук}} = \frac{1}{12} \cdot \pi h_0 (D_0^2 + D_0 D_1 + D_1^2),$$

где h_0 – глубина кратера; D_0 – больший диаметр отверстия в твердой ткани зуба; D_1 – меньший диаметр отверстия в твердой ткани зуба.

На рис. 2 представлены результаты измерения геометрических параметров микрократеров в эмали и дентине, сформированных под действием одиночного импульса YLF: Er лазера с диодной накачкой, длиной волны 2,81 мкм и $\tau \approx 1400$ мкс. На рис. 3 представлены результаты расчета объема микрократеров и эффективности удаления эмали и дентина одиночным импульсом YLF: Er лазера с диодной накачкой, длиной волны 2,81 мкм и $\tau \approx 1400$ мкс. Таким образом, при формировании микрократеров излучением YLF: Er лазера ($\lambda = 2,81$ мкм, $\tau \approx 1400$ мкс, $E_p \approx 2$ мДж) в эмали $D_0 = 115 \pm 7$ мкм, $h_0 = 32 \pm 4$ мкм,

$V_0=(16\pm6)\times 10^{-5}$ мм³, $\langle\Theta\rangle=82\pm 20$ мм³/кДж; в дентине $D_0=155\pm 5$ мкм, $h_0=26\pm 2$ мкм, $V_0=(19\pm 4)\times 10^{-5}$ мм³, $\langle\Theta\rangle=100\pm 21$ мм³/кДж.

Внешний вид микроканала, сформированного в результате воздействия на твердые ткани зуба последовательности из ста импульсов YLF: Er лазера с диодной накачкой, длиной волны 2,81 мкм и $\tau \approx 1400$ мкс, представлен на рис. 4. Толщина эмали в зоне обработки в данном случае составила 80 мкм. Наблюдается значительная карбонизация стенок практически по всей длине микроканала. Присутствие карбонизации может быть связано с тем, что длительность лазерного импульса $\tau \approx 1400$ мкс существенно превышает время термической релаксации дентина [13], и за время действия лазерного импульса тепло, стимулированное лазерным излучением, не полностью отводится с продуктами абляции, проникает в дентин и вызывает его карбонизацию.

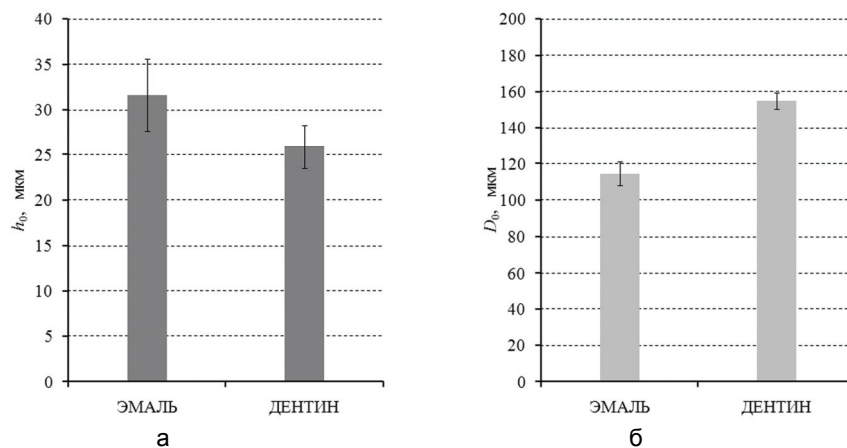


Рис. 2. Глубина h_0 (а) и диаметр D_0 (б) микрократеров, созданных в эмали и дентине излучением YLF: Er ($\lambda = 2,81$ мкм; $E_p \sim 2$ мДж; $\tau \sim 1400$ мкс) лазера

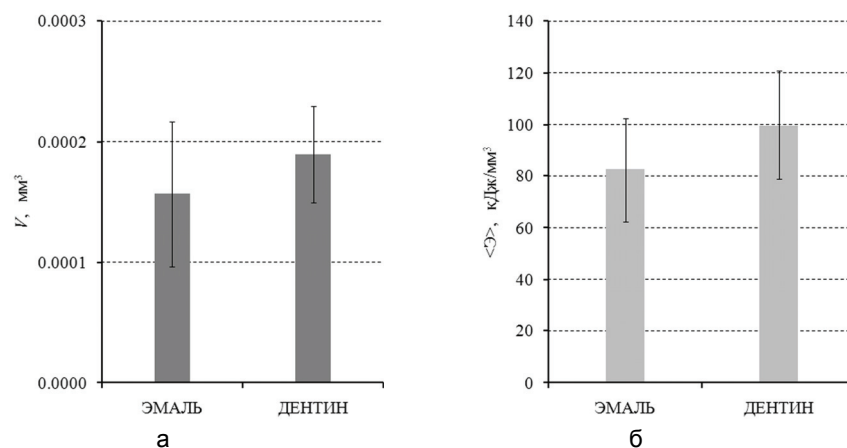


Рис. 3. Объем микрократеров V_0 (а) и эффективность удаления эмали и дентина $\langle\Theta\rangle$ (б) излучением YLF: Er ($\lambda = 2,81$ мкм; $E_p \sim 2$ мДж; $\tau \sim 1400$ мкс) лазера

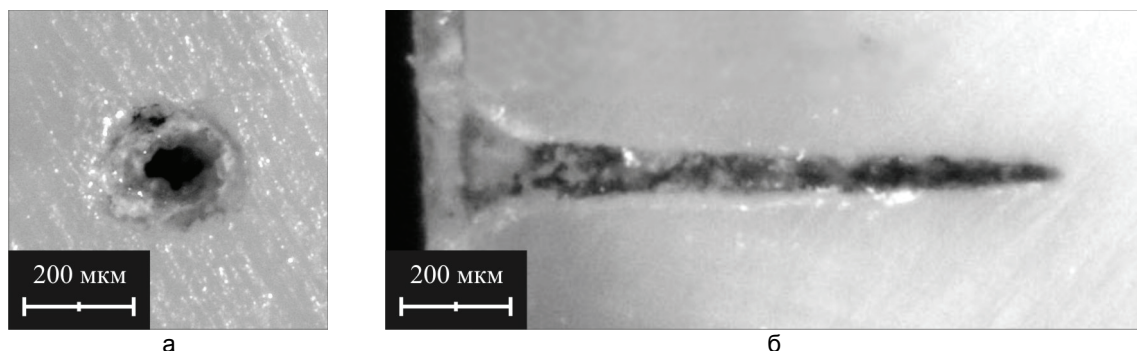


Рис. 4. Внешний вид (а) и продольное сечение (б) микроканала, сформированного в дентине излучением YLF: Er ($\lambda = 2,81$ мкм; $\tau \sim 1400$ мкс; $E_p \sim 30$ мДж; $N_p = 100$) лазера

Максимальная длина микроканала, сформированного в результате воздействия на твердые ткани зуба последовательности из ста импульсов YLF: Er лазера с диодной накачкой, длиной волны 2,81 мкм и $\tau \approx 1400$ мкс, составила величину $h_0 = 1170 \pm 100$ мкм. Максимальный диаметр микроканала достигал $D_0 = 260 \pm 30$ мкм. Максимальное значение аспектного соотношения, полученное в рамках настоящего эксперимента, составило величину $A = 4,5 \pm 0,5$.

В работе [12] сообщается, что при формировании микрократеров излучением YAG: Er лазера ($\lambda = 2,94$ мкм, $\tau \approx 130$ мкс, $E_p \approx 1$ мДж) в эмали $D_0 = 99 \pm 3$ мкм, $h_0 = 45 \pm 8$ мкм, $V_0 = (24 \pm 8) \times 10^{-5}$ мм³, $\langle \Theta \rangle = 240 \pm 80$ мм³/кДж; в дентине $D_0 = 101 \pm 1$ мкм, $h_0 = 46 \pm 4$ мкм, $V_0 = (27 \pm 7) \times 10^{-5}$ мм³, $\langle \Theta \rangle = 266 \pm 61$ мм³/кДж. Очевидно, что диаметр микрократеров D_0 , созданных излучением YLF: Er лазера, превышает D_0 для YAG: Er лазера в 1,2 и 1,5 раза для эмали и дентина соответственно. Глубина микрократеров h_0 для YLF: Er лазера в 1,4 и 1,8 раза меньше глубины микрократеров, созданных с помощью YAG: Er лазера. Значение эффективности удаления эмали излучением YLF: Er лазера в 2,9 раза меньше значения эффективности удаления эмали для YAG: Er лазера. Значение эффективности удаления дентина излучением YLF: Er лазера в 2,7 раза меньше значения эффективности удаления дентина для YAG: Er лазера. В работе [10] сообщается, что для YAG: Er лазера ($\lambda = 2,94$ мкм, $\tau = 105$ мкс по полувысоте, $E_p = 15$ мДж) аспектное соотношение формируемых микроканалов достигает $A = 2,4 \pm 0,12$. Таким образом, аспектное соотношение микроканалов, созданных в твердых тканях зуба человека излучением YLF: Er лазера ($\lambda = 2,81$ мкм, $\tau \approx 1400$ мкс, $E_p \approx 30$ мДж), почти в 2 раза больше аспектного соотношения микроканалов, созданных излучением YAG: Er лазера [10]. Полученные результаты могут быть обусловлены различием порогов разрушения [2, 14] и коэффициентов поглощения твердых тканей зуба на длинах волн 2,81 мкм и 2,94 мкм [3], а также разницей в длительностях импульсов лазеров [15, 16].

Заключение

Исследована возможность применения излучения YLF: Er лазера для обработки твердых тканей зуба. При формировании микрократеров излучением YLF: Er лазера ($\lambda = 2,81$ мкм, $\tau \approx 1400$ мкс, $E_p \approx 2$ мДж) в эмали $D_0 = 115 \pm 7$ мкм, $h_0 = 32 \pm 4$ мкм, $V_0 = (16 \pm 6) \times 10^{-5}$ мм³, $\langle \Theta \rangle = 82 \pm 20$ мм³/кДж; в дентине $D_0 = 155 \pm 5$ мкм, $h_0 = 26 \pm 2$ мкм, $V_0 = (19 \pm 4) \times 10^{-5}$ мм³, $\langle \Theta \rangle = 100 \pm 21$ мм³/кДж. Длина микроканала, сформированного в результате воздействия на твердые ткани зуба последовательности из ста импульсов YLF: Er лазера с диодной накачкой, длиной волны 2,81 мкм и $\tau \approx 1400$ мкс, составила $h_0 = 1170 \pm 100$ мкм, диаметр микроканала достигал $D_0 = 260 \pm 30$ мкм, аспектное соотношение $A = 4,5 \pm 0,5$.

Литература

1. Rechmann P., Hennig T. Influence of different laser wavelengths on the ablation characteristics of healthy dentin // Proc. of SPIE. Medical Applications of Lasers II. – 1994. – V. 2327. – P. 64–69.
2. 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.
3. Беликов А.В., Скрипник А.В., Шатилова К.В. Исследование динамики спектров поглощения эмали и дентина зуба человека при нагреве и абляции излучением субмиллисекундных импульсов эрбиевого лазера с длиной волны генерации 2,79 мкм // Оптика и спектроскопия. Биомедицинская оптика и спектроскопия. – 2010. – Т. 109. – № 2. – С. 1297–1302.
4. Беликов А.В., Жолобова Е.П., Скрипник А.В., Струнина Т.В. Исследование эффективности разрушения эмали зуба человека одномодовым излучением YAG: Er лазера // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 2(60). – С. 51–58.
5. Беликов А.В., Храмов В.Ю. Перспективы развития инновационных направлений исследований в области лазерных систем и биомедицинских оптических технологий // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5(69). – С. 110–113.
6. Coluzzi D.J., Convissar R.A. Atlas of laser applications in dentistry. – Quintessence Publishing, Inc, 2007. – 220 p.
7. Беликов А.В., Пушкарева А.Е., Скрипник А.В., Струнина Т.В., Шатилова К.В. Лазерное текстурирование поверхностей материалов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 4. – С. 52–56.
8. Альтшулер Г.Б., Беликов А.В., Скрипник А.В., Бобров А.П., Ткаченко Т.Б., Маслов В.В., Гайкова О.Н., Фельдштейн Ф.И. «M2 лазерная технология» и ее применение для отбеливания зубов. Результаты первых in vivo исследований // Инновационная стоматология. – 2010. – № 1. – С. 44–54.
9. Гринволл Л. Методики отбеливания в реставрационной стоматологии. Иллюстрированное руководство. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Высшее образование и наука», 2003. – 304 с.
10. Альтшулер Г.Б., Беликов А.В., Скрипник А.В., Шатилова К.В., Фельдштейн Ф.И. «M2 лазерная технология» и ее применение для создания микроканалов в зубе // Инновационная стоматология. – 2010. – № 1. – С. 20–23.

11. 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.
12. 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. Проблемы оптической физики и биофотоники. – Саратов: Новый Ветер, 2010. – С. 20–26.
13. Fried D., Visuri S.R., Featherstone J.D.B., Walsh J.T., Seka W., Glens R.E., McCormack S.M., Wigdor H.A. Infrared radiometry of dental enamel during Er: YAG and Er: YSGG laser irradiation Wigdor // J. Biomed. Optics. – 1996. – № 1. – P. 455–465.
14. 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.
15. Apel C., Franzen R., Meister J., Sarrafzadegan H., Thelen S., Gutknecht N. Influence of the Pulse Duration of an Er: YAG Laser System on the Ablation Threshold of Dental Enamel // Lasers Med Sci. – 2002. – V. 17. – P. 253–257.
16. Majaron B., Lukac M. Thermo-mechanical laser ablation of hard dental tissues: an overview of effects, regimes, and models // Proc. of SPIE. – 1999. – V. 3593. – P. 184–195.

<i>Беликов Андрей Вячеславович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, meddv@grv.ifmo.ru
<i>Скрипник Алексей Владимирович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, alesch_skrupnik@mail.ru
<i>Струнина Татьяна Валерьевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, struninatiana@mail.ru
<i>Шатилова Ксения Владимировна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kshatilova@mail.ru

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МНОГОЧАСТОТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ СРЕДНЕГО
ИК-ДИАПАЗОНА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

М.В. Иночкин, В.В. Назаров, Д.Ю. Сачков, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов, Н.А. Федоров

Исследована генерация Er:YLF-лазера на длинах волн 2,66 мкм, 2,71 мкм и 2,81 мкм в импульсно-периодическом режиме при селективной накачке излучением лазерных диодов на длине волны 0,98 мкм. Наблюдается существенное изменение задержек начала генерации на отдельных длинах волн в зависимости от частоты следования импульсов накачки, а также прекращение генерации на длинах волн 2,66 мкм и 2,71 мкм с увеличением частоты следования импульсов. Предложен метод управления спектром лазерной генерации за счет изменения длительности и частоты следования импульсов накачки.

Ключевые слова: эрбиевый лазер, диодная накачка, многочастотная генерация, импульсно-периодический режим.

Введение

Лазеры, излучающие в области 3 мкм, перспективны для применений в медицине, так как в данном диапазоне длин волн располагается один из основных максимумов поглощения воды. Среди лазеров трехмикронного диапазона наибольшее распространение получили лазеры на кристаллах, активированных ионами Er^{3+} [1–3]. Вследствие расщепления энергетических уровней иона Er^{3+} в кристаллическом поле длина волны генерации таких лазеров может варьироваться в довольно широких пределах [4–5]. Например, в среде Er:YLF в неселективном резонаторе может быть получена генерация на длинах волн 2,66; 2,71; 2,81 и 2,84 мкм [5]. Коэффициент поглощения воды для этих длин волн может изменяться в пределах нескольких порядков. Таким образом, изменение длины волны генерации эрбиевого лазера позволяет существенно влиять на параметры взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями. В настоящей работе проведено исследование изменения спектра генерации Er:YLF-лазера с диодной накачкой в зависимости от параметров накачки при импульсно-периодическом режиме работы лазера.

Модель многочастотной генерации Er:YLF-лазера

В работе [5] была предложена модель для описания свободной генерации эрбиевых лазеров в области 3 мкм, основанная на использовании усредненных населенностей верхнего (N_2) и нижнего (N_1) лазерных уровней. В данной работе эта модель развита для случая импульсно-периодического режима работы лазера, что потребовало учета процессов апконверсии с нижнего (${}^4I_{13/2}$) и с верхнего (${}^4I_{11/2}$) лазерных уровней. В этом случае для усредненных населенностей лазерных уровней N_2 и N_1 можно записать следующую систему балансных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = -\chi_g(\lambda, t)S - N_2(A_{21} + A_{20} + W_{21}) + \gamma_1 N_1^2 - \gamma_2 N_2^2 + R(t); \\ \frac{dN_1}{dt} = \chi_g(\lambda, t)S - N_1 A_{10} + (A_{21} + W_{21})N_2 - 2\gamma_1 N_1^2, \end{cases} \quad (1)$$

где A_{mn} – скорость спонтанного излучательного перехода между уровнями m и n ; W_{mn} – скорость спонтанного безызлучательного перехода; $R(t)$ – скорость накачки; γ_2 – коэффициент апконверсии с верхнего лазерного уровня; γ_1 – коэффициент апконверсии с нижнего лазерного уровня; S – усредненная плотность потока фотонов в резонаторе; $\chi_g(\lambda, t) = (\sigma_e(\lambda)N_2 - \sigma_a(\lambda)N_1)$ – показатель усиления на длине волны λ ; $\sigma_e(\lambda)$ – сечение вынужденного излучения; $\sigma_a(\lambda)$ – сечение поглощения из возбужденного состояния.

На различных стадиях работы лазера величина относительного вклада процессов релаксации в изменение усредненных населенностей лазерных уровней $N_1(t)$ и $N_2(t)$ может существенно изменяться. На сравнительно малом промежутке времени, после включения накачки и до начала генерации, основное значение имеет скорость накачки, а релаксационными и, тем более, нелинейными слагаемыми в системе уравнений (1) можно пренебречь. При этом, в отличие от режима одиночных импульсов, в импульсно-периодическом режиме необходимо учитывать конечную населенность лазерных уровней в начале очередного импульса накачки уже при частоте следования импульсов в десятки герц, поскольку времена релаксации верхнего (${}^4I_{11/2}$) и нижнего (${}^4I_{13/2}$) лазерных уровней (4 и 10 мс соответственно, [6]) становятся сравнимы с периодом повторения импульсов.

Из условия порога генерации $\chi_g(\lambda, t) = \delta(\lambda)$ можно получить зависимость задержки начала генерации от начальных населенностей лазерных уровней в виде

$$td(\lambda) = \frac{\delta(\lambda)}{\sigma_e(\lambda)R} + \left(\frac{1}{F(\lambda)} - 1 \right) \frac{N_{10}}{R} - \frac{N_{20}}{R}, \quad (2)$$

где, как и в [5], введен нормированный безразмерный спектральный форм-фактор

$$F(\lambda) = \frac{\sigma_e(\lambda)}{\sigma_e(\lambda) + \sigma_a(\lambda)} = \frac{1}{1 + \frac{Z_u}{Z_l} \exp\left(\frac{hc}{kT} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) \right)}, \quad (3)$$

где Z_u и Z_l – числа заполнения для верхнего (${}^4I_{11/2}$) и нижнего (${}^4I_{13/2}$) лазерных уровней; k – постоянная Больцмана; T – температура; λ_0 – длина волны перехода между самыми нижними подуровнями штарковской структуры уровней ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{13/2}$.

Из уравнения (3) следует, что функция $F(\lambda)$ является монотонно возрастающей функцией длины волны и изменяется в диапазоне $0 < F(\lambda) < 1$.

В случае использования селективной накачки после начала генерации происходит последовательная смена длин волн генерации от более коротких к более длинным. Например, в [5] была реализована последовательная генерация лазера на четырех длинах волн (2,66 мкм, 2,71 мкм, 2,81 мкм и 2,84 мкм) при длительности импульса накачки 2 мс. В настоящей работе длительность импульса накачки была ограничена значением 0,5 мс и условия возникновения генерации на длине волны 2,84 мкм не выполнялись. В связи с этим в дальнейшем рассмотрение процессов генерации будет ограничено тремя длинами волн, что не является принципиальным ограничением.

После окончания импульсов накачки и генерации ($R=0$, $S=0$) усредненные населенности лазерных уровней N_1 и N_2 релаксируют согласно выражениям (1). При этом величина нелинейных слагаемых в системе (1), соответствующих переходам по кросс-релаксационным схемам, сравнима с величиной линейных слагаемых. Таким образом, на промежутке между импульсами накачки необходимо учитывать процессы кросс-релаксации. В этом случае проблематично получить аналитическое решение системы (1) и проще выполнить ее численное интегрирование. Заметим, что на участке релаксации нахождение решений $N_1(t)$ и $N_2(t)$ происходит существенно быстрее, так как отсутствует излучение накачки и генерации ($R=0$, $S=0$). Итогом этого расчета являются значения усредненных населенностей уровней N_{10} и N_{20} перед началом следующего импульса накачки.

Исследования многочастотной генерации Er:YLF-лазера при импульсно-периодической накачке

На рис. 1 представлен результат расчета зависимости задержек начала генерации $td(f)$ на длинах волн 2,66; 2,71 и 2,81 мкм от частоты следования импульсов f при длительности импульса накачки 0,5 мс. Для всех длин волн коэффициент отражения выходного зеркала был принят равным 95%, а показатель вредных потерь – $0,006 \text{ см}^{-1}$. Скорость накачки была принята равной $R=2,3 \times 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Форма импульса накачки задавалась прямоугольной во времени. Зависимости $td(f)$ на рис. 1, а, соответствуют условию $\gamma_1=\gamma_2=0$, т.е. случаю отсутствия апконверсионных взаимодействий. Расчет, соответствующий рис. 1, б, выполнен при коэффициентах апконверсии $\gamma_1=2 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, $\gamma_2=1 \times 10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

Анализ зависимостей $td(f)$, представленных на рис. 1, показывает, что можно выделить 3 диапазона характерного изменения величин $td(f)$. В области I ($f=0-15$ Гц) значения $td(f)$ для всех длин волн примерно постоянны и не зависят от частоты следования импульсов. При этих частотах повторения импульсов установившиеся значения усредненных населенностей лазерных уровней в момент включения накачки N_{10} и N_{20} малы, так как после выключения импульса накачки усредненные населенности лазерных уровней успевают релаксировать к нулевым значениям практически полностью.

Во II области ($f=15-35$ Гц для $\gamma_1=\gamma_2=0$ и $f=15-65$ Гц для $\gamma_1 \neq 0$, $\gamma_2 \neq 0$) длительность задержки $td(f)$ на длине волны 2,66 мкм возрастает, а для двух других длин волн убывает. Такое поведение можно объяснить тем, что в этой области частот повторения импульсов установившееся начальное значение населенности нижнего лазерного уровня N_{10} растет с увеличением частоты f , а верхний лазерный уровень все еще успевает расселяться из-за меньшего времени жизни уровня ${}^4I_{11/2}$ по сравнению с ${}^4I_{13/2}$. При этом согласно выражению (2) рост начального значения населенности нижнего лазерного уровня N_{10} в большей степени влияет на задержки генерации для более коротких длин волн, так как $F(\lambda)$ является возрастающей функцией длины волны. Таким образом, при достижении определенного значения населенности N_{10} генерация излучения сразу начнется на переходах с большей длиной волны. Процессы межзонного взаимодействия приводят к уменьшению населенности нижнего лазерного уровня N_1 , что приводит к увеличению максимальной частоты для области II с 35–60 Гц.

В выделенной на рис. 1 области III, когда генерация реализуется только на длине волны 2,81 мкм, поведение задержки генерации $td(f)$ для случая отсутствия (рис. 1, а) и наличия (рис. 1, б) процессов ап-

конверсии кардинально противоположно. При отсутствии апконверсии задержка генерации $td(f)$ заметно возрастает, что можно объяснить увеличением начальных населенностей уровня ${}^4I_{13/2} N_{10}$ и уровня ${}^4I_{11/2} N_{20}$ из-за уменьшения промежутка времени между импульсами. При наличии процессов апконверсии длительность задержки генерации $td(f)$ на длине волны 2,81 мкм практически не меняется. Это в первую очередь связано с тем, что наличие апконверсии с уровня ${}^4I_{13/2}$ приводит к дополнительному заселению верхнего лазерного уровня ${}^4I_{11/2}$ и расселению нижнего лазерного уровня ${}^4I_{13/2}$.

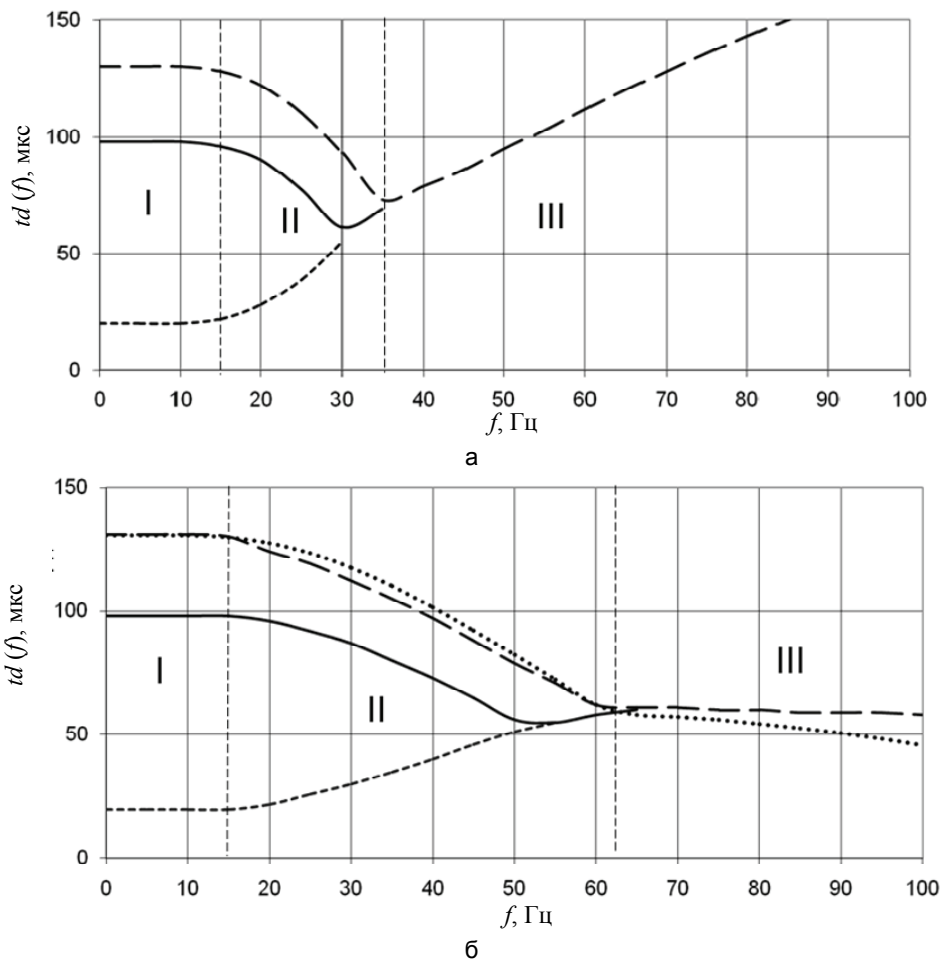


Рис. 1. Результаты расчета зависимостей задержек начала генерации $td(f)$ от частоты следования импульсов (длительность импульса накачки 0,5 мс, мощность излучения накачки 340 Вт): $\gamma_1=0, \gamma_2=0$ (а); б) $\gamma_1=2 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}, \gamma_2=1 \times 10^{-18} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ (б); $\lambda=2,66 \text{ мкм}$ – короткий штрих, $\lambda=2,71 \text{ мкм}$ – сплошная линия, $\lambda=2,81 \text{ мкм}$ – длинный штрих. На рис. 1, б, линия в виде точек представляет зависимость $td(f)$ для $\gamma_1=\gamma_2=2 \times 10^{-17} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$

Оценка влияния параметров γ_1 и γ_2 на зависимость времен задержек генерации $td(f)$ показала, что характер влияния апконверсии с уровней ${}^4I_{11/2}$ и ${}^4I_{13/2}$ несколько различен. Теоретические расчеты системы уравнений (1) показали, что уменьшение соотношения γ_1/γ_2 приводит к уменьшению скорости падения времени задержки от частоты. В случае $\gamma_1/\gamma_2 > 1$ падение значения задержки генерации $td(f)$ от частоты сменяется ростом.

Наблюдаемая зависимость набора длин волн генерации от параметров накачки может быть использована для целенаправленного изменения спектра генерации лазера. Из рис. 1 видно, что при длительности импульса накачки 500 мкс и частоте следования импульсов более 50 Гц генерация реализуется только на одной длине волны 2,81 мкм. При использовании импульсов накачки длительностью 30–75 мкс при частоте следования импульсов f не более 30 Гц можно получить генерацию только на длине волны 2,66 мкм. Данная особенность многочастотной генерации может быть использована для управления спектром генерации лазера только за счет изменения параметров накачки (мощность, длительность импульса, частота следования импульсов, применение пакетного режима следования импульсов). На рис. 2 представлены две области изменения параметров накачки. В пределах области 1 наблюдается генерация исключительно на длине волны 2,66 мкм, для получения генерации на длине волны 2,81 мкм необходимо использовать длительность Tp и частоту следования импульсов накачки f , соответствующие области 2.

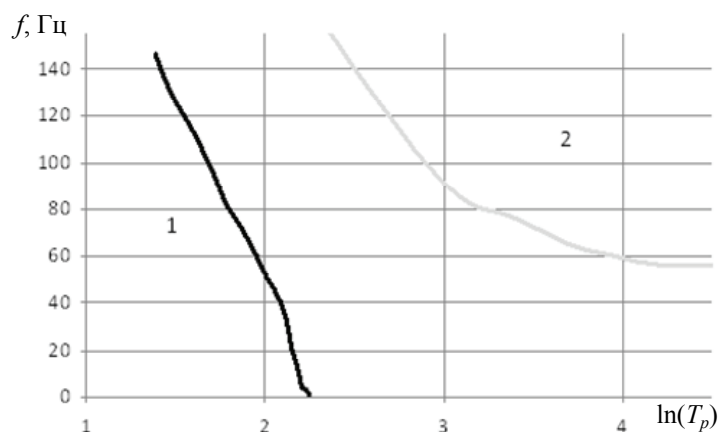


Рис. 2. Области изменения параметров накачки для получения генерации на длине волны 2,66 мкм (область 1) и 2,81 мкм (область 2)

Заключение

В работе проведено исследование зависимости спектра генерации Er:YLF-лазера от параметров селективной накачки в импульсно-периодическом режиме работы лазера. Предложенная расчетная модель многочастотной генерации излучения в эрбиевых кристаллах может быть использована для определения параметров источника накачки и оптических элементов резонаторов, необходимых для получения генерации на требуемых длинах волн или их сочетании. Для ряда медицинских задач может представлять определенный интерес реализация режимов работы лазера, переключение между которыми обеспечивает значительное изменение поглощения излучения лазера водой и биологическими тканями. Для Er:YLF-лазера такими режимами могут быть режимы генерации на длинах волн 2,66 мкм и 2,81 мкм.

Литература

1. Jensen T., Dienes A., Huber G. Investigation of diode-pumped 2,8-mm Er:LiYF₄ lasers with various doping levels // Optics Letters. – 1996. – V. 21. – Is. 8. – P. 585–587.
2. Zajac A., Skorczakowski M., Swiderski J., Nyga P. Electrooptically Q-switched mid-infrared Er:YAG laser for medical applications // Optics Express. – 2004. – V. 12. – Is. 21. – P. 5125–5130.
3. Жариков Е.В., Ильичев Н.Н., Калитин С.П., Лаптев В.В., Малютин А.А., Осико В.В., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Саидов З.С., Смирнов В.А., Умысков А.Ф., Щербаков И.А. Спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кристалла иттрий-скандий-галлиевого граната с хромом и эрбием // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13. – № 5. – С. 973–979.
4. Auzel F., Hubert S., Meichenin D. Multifrequency room-temperature continuous diode and Ar* laser-pumped Er³⁺ laser emission between 2,66 and 2,85 μm // Appl. Phys. Lett. – 1989. – V. 54. – Is. 8. – P. 681–683.
5. Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Динамика спектра генерации трехмикронного Er:YLF-лазера при полупроводниковой накачке // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 11. – С. 62–67.
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 LiY_{1-x}Er_xF₄ (x=0,003–1) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92. – № 1. – С. 73–88.

- Иночкин Михаил Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, m_inochkin@mail.ru
- Назаров Вячеслав Валерьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, v_v_nazarov@mail.ru
- Сачков Дмитрий Юрьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dsachkov@gmail.com
- Хлопонин Леонид Викторович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com
- Храмов Валерий Юрьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, vkhramov@gmail.com
- Федоров Никита Анатольевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, nifikedorov@mail.ru

УДК 681.142.2

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
ПРОЦЕССОВ В САПР

А.Г. Зыков, А.В. Безруков, О.Ф. Немолочнов, В.И. Поляков, А.В. Андронов

Рассматривается применение графо-аналитических моделей для верификации вычислительных процессов в рамках САПР, приводится пример построения комплексного кубического покрытия по графо-аналитической модели ациклического вычислительного процесса, формулируется задача синтеза тестовых наборов на основе кубического покрытия.

Ключевые слова: графо-аналитические модели, верификация вычислительных процессов, кубические покрытия, тестирование.

Введение

Проблема анализа качества аппаратного и программного обеспечения становится сегодня все более острой, особенно по мере расширения использования информационных технологий и нанотехнологий в приборостроении. Экспоненциальный рост сложности аппаратного и программного обеспечения вычислительных процессов порождает повышенные требования к бездефектному проектированию. Известны примеры, как дорого обходятся ошибки, допущенные на различных этапах проектирования аппаратуры, поэтому все современные САПР обязательно снабжаются методологическими, программными и инструментальными средствами анализа разрабатываемого изделия на всех этапах автоматизированного проектирования. Не менее актуальными являются проблемы, связанные с обеспечением проектирования надежных программ. Однако возможности средств верификации сегодня заметно отстают от возможностей систем проектирования и технологии изготовления, поэтому разработка машинно-ориентированных методов верификации аппаратно-программных компонентов вычислительных процессов является актуальной [1]. Одним из направлений формализации верификации вычислительных процессов (ВВП) является использование их описания с помощью графо-аналитических моделей (ГАМ), на основании которого строится комплексное кубическое покрытие и синтезируются тестовые наборы [2].

Ставится задача нахождения допустимых значений переменных в системах неравенств-отношений, определяющих условия-предикаты вычислительных процессов программ.

Построение комплексного покрытия ациклического вычислительного процесса

В работе [3] предложен метод верификации вычислительных процессов на основе алгебро-топологического подхода. Рассмотрим работу метода на примере ГАМ простого интервального процесса (рис. 1).

Описание ГАМ можно готовить и редактировать в текстовом редакторе. В итоге получаем xml-описание ГАМ следующего вида (приведена часть описания):

```
<GAM name="multiswitch">
  <!--Уникальное в рамках пространства имен имя модели -->
  <meta>
    <!--Краткое описание ГАМ -->
    <description>Демонстрационная ГАМ для вычислительного процесса с мно-
жественным ветвлением</description>
  </meta>
  <attributes>
    <!--Атрибуты модели -->
    <vars>
      <!--Внешние переменные для ГАМ -->
      <in>
        <!--Входные параметры для ГАМ -->
        <var name="x">
          <!--Уникальное имя в рамках ГАМ -->
          <type>int</type>
          <!--тип данных -->
          <default>0</default>
          <!--Значение по-умолчанию -->
        </var>
      </in>
      <out>
        <var name="y">
          <!--index определяет порядок переменных -->
          <type>float</type>

```

```

        <default>0</default>
    </var>
  </out>
</vars>
<startUid>1</startUid>
<!--Начальный элемент ГАМ -->
</attributes>
<nodes>
  <!--Вершины ГАМ -->
  <cv uid="1">
    <!--Определение вершины. -->
    <input>In</input>
    <!--Ссылка на предыдущую вершину -->
    <trueOutput>4</trueOutput>
    <!--Ссылка на следующую вершину -->
    <falseOutput>2</falseOutput>
    <condition> x > 5 </condition>
    <!--Условие -->
  </cv>
  <cv uid="2">
    <input>1</input>
    <trueOutput>5</trueOutput>
    <falseOutput>3</falseOutput>
    <condition> x > 0</condition>
  </cv>

```

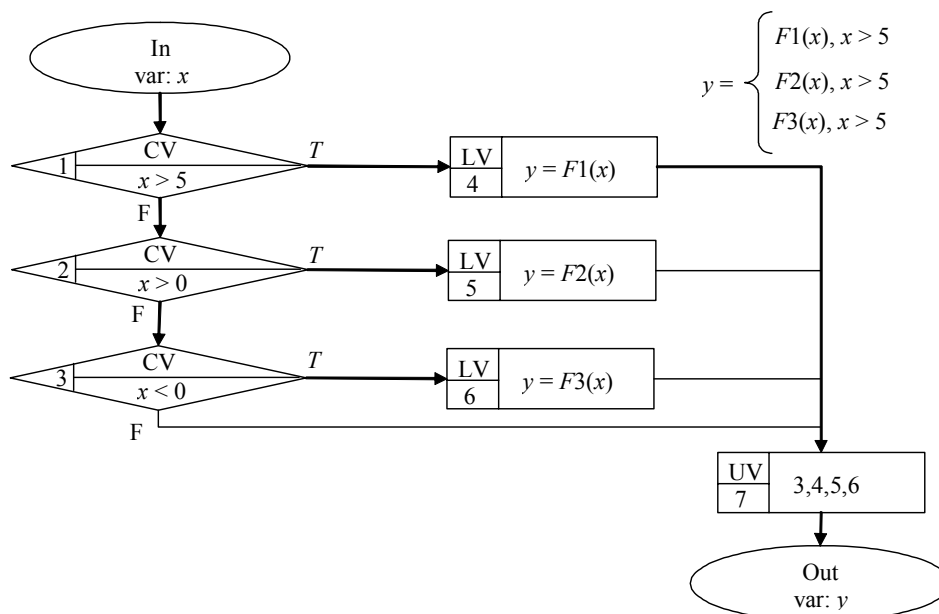


Рис. 1. ГАМ вычислительного процесса для интервальной функции

Далее xml-описание ГАМ необходимо преобразовать в машинно-ориентированный вид. Для машинной обработки были разработаны специальные списочные структуры, представляющие ГАМ. Элементы этих структур изображены на рис. 2. После преобразования происходит поиск всех возможных кубов покрытия по алгоритму, представленному на рис. 3. Результат построения покрытия приведен в таблице (символ \times обозначает произвольное значение из области определения предиката или переменной), где Y – предыдущее значение, а Y' – последующее значение переменной y .

На следующем этапе происходит определение значений входных переменных для того, чтобы процесс выполнялся по определенной ветви. Для этого, в общем случае, нужно найти хотя бы одно решение системы неравенств, задаваемой логическими выражениями в условных вершинах ГАМ. В общем виде такая система выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} F_0(a_{01}, a_{02}, a_{03}, \dots, a_{0i}) \\ F_1(a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1i}) \\ \dots \\ F_k(a_{k1}, a_{k2}, a_{k3}, \dots, a_{ki}) \end{cases},$$

где F_k – логическое выражение для соответствующей условной вершины с номером k на проверяемой ветви, a_{ki} – значение переменной a_i на этом этапе.

В рассматриваемой ГАМ для пути 1 – 4 – 7 (номера вершин) система примет вид $\{x > 5\}$.

Для пути 1 – 2 – 5 – 7 получим

$$\begin{cases} x > 0 \\ x \leq 5. \end{cases}$$

Аналогично определяются системы отношений-неравенств и для остальных кубов покрытия.

Условная вершина:

Тип: CV	Входы	Переменные УП	Выход	
	z_k	r_1, r_2, \dots, r_i	z_j^T	z_j^F
Имя или номер вершины	AD_k	AD_1, AD_2, \dots, AD_i	AD_j^T	AD_j^F
		FR УП		

Линейная вершина:

Тип: LV	Входы	Переменные УП	Выход
	z_k	r_1, r_2, \dots, r_i	z_j
Имя или номер вершины	AD_k	AD_1, AD_2, \dots, AD_i	AD_j

Объединяющая вершина:

Тип: UV	Входы	Выход
	z_1, z_2, \dots, z_k	z_j
Имя или номер вершины	AD_k	AD_j

Рис. 2. Элементы списка машинного описания ГАМ

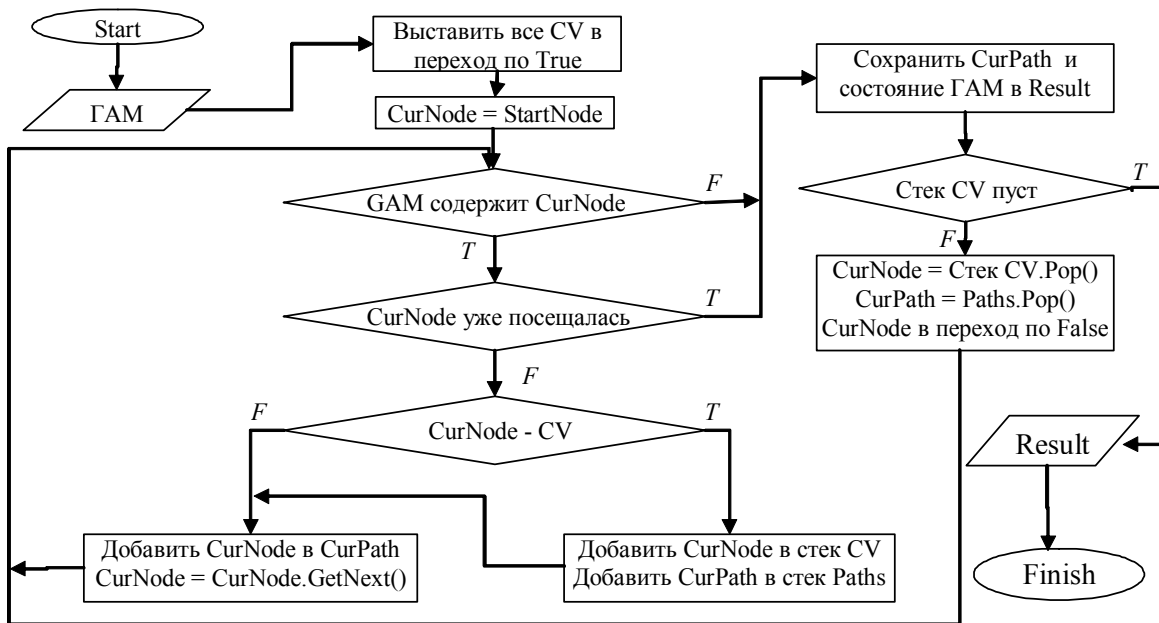


Рис. 3. Алгоритм построения кубического покрытия ГАМ

CV1	CV2	CV3	Y	Y'
0	0	0	x	x
0	0	1	x	F3(x)
0	1	x	x	F2(x)
1	x	x	x	F1(x)

Таблица. Кубическое покрытие ГАМ рис. 1

Для определения значений переменных, участвующих в условных выражениях, сформулируем следующие правила.

1. Достаточно найти только одно решение для совокупности переменных условия-предиката, нет необходимости решать систему со всей математической строгостью.
2. Не все переменные будут участвовать в каждом выражении, а многие будут участвовать в виде константы, что упрощает решение системы.
3. Во многих случаях систему можно будет разделить на части, так как нередко вершины не связаны по данным.
4. Часть ветвей программы будут в принципе недостижимы ни при каких ситуациях (don't care), некоторые из этих случаев можно определять без решения системы в целом.

На последнем этапе с помощью синтезированных тестов проводится тестирование программного обеспечения (ПО), на основании которого делается вывод о соответствии или несоответствии программы и ее спецификации.

Для реализации и исследования предложенного метода синтеза контролирующих тестов и дальнейших научно-исследовательских работ в области верификации вычислительных процессов разработана исследовательская САПР верификации вычислительных процессов (ИСАПР ВВП).

Общая структура исследовательской САПР ВВП

Итерационно-рекурсивная модель вычислительного процесса программ, предложенная в [4], является теоретической основой для разработки такой САПР, а в работе [5] сформулированы основные цели, которые преследуются при ее создании. С учетом этих положений предлагается следующая структура ИСАПР (рис. 4).

Ядро системы представляет собой набор системных и пользовательских плагинов, взаимодействующих друг с другом через единый интерфейс. Взаимодействие с хранилищем ведется через отдельный (общий для САПР) интерфейс, что позволяет унифицировать способ хранения и доступа к данным и применить любую доступную систему управления базами данных. Система для выполнения своей учебной функции также должна предоставлять три типа пользовательских интерфейса.



Рис. 4. Структурная схема ИСАПР ВВП

Под внешними интерфейсами подразумеваются способы обмена данными с информационными системами университета для более полной интеграции ИСАПР в учебный процесс.

Система разрабатывается как достаточно универсальная учебно-исследовательская среда, без привязки к определенному типу задач, но, так как в рамках работы рассматривается применение графоаналитических моделей для верификации ПО, то к реализации предлагается следующая схема взаимодействия модулей (рис. 5).

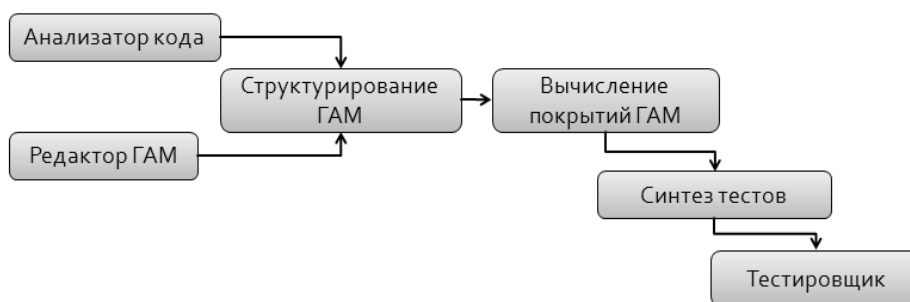


Рис. 5. Модули учебно-исследовательской САПР верификации на основе ГАМ

Данное разделение на модули, очевидно, вытекает из схемы применения метода, представленной в [2]. Назначение модулей системы верификации следующее:

- модуль «Анализатор кода» восстанавливает ГАМ на основе скомпилированной программы;
- модуль «Редактор ГАМ» позволяет строить модели вручную на основе спецификации программы;
- модуль «Структурирование ГАМ» упрощает полученные модели, выделяя в машинном представлении ГАМ структурные единицы (что особенно важно для моделей, полученных от анализатора) [6];
- назначение модулей «Вычисление покрытий ГАМ» [7] и «Синтез тестов» очевидно из их названий;
- модуль «Тестировщик» создает необходимое для тестирования окружение и выводит результаты тестирования.

«Редактор ГАМ» работает только при непосредственном участии пользователя, остальные модули могут использоваться как в автоматическом, так и в полуполуавтоматическом режиме.

Заключение

Использование предложенной схемы верификации на основе графо-аналитических моделей позволяет наглядно (на уровне логической структуры и, как следствие, интерфейса) продемонстрировать весь процесс верификации, а предложенная структура определяет проектирование и разработку исследовательской САПР верификации вычислительных процессов, позволяет сделать разработку отдельных модулей во многом независимой.

Литература

1. Bruce Wile, John C. Goss, Wolfgang Roesner. Comprehensive Functional Verification: The Complete Industry Cycle. – San Francisco, 2005. – 676 с.
2. Зыков А.Г., Немолочных О.Ф., Поляков В.И., Безруков А.В., Кузьмин В.В. Графо-аналитические модели как средство верификации вычислительных процессов // Труды Международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям. Научное издание в 4-х томах. – М.: Физматлит, 2010. – Т. 2. – 400 с.
3. Немолочных О.Ф., Зыков А.Г., Лаздин А.В., Поляков В.И. Верификация в исследовательских, учебных и промышленных системах // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2003. – Вып. 11. – С. 146–151.
4. Немолочных О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И., Осовецкий Л.Г., Сидоров А.В., Кулагин В.С. Итерационно-рекурсивная модель вычислительных процессов программ // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 12. – С. 14–20.
5. Немолочных О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И., Петров К.В. Учебно-исследовательская САПР верификации и тестирования вычислительных процессов программ // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – Вып. 32. – С. 127–128.
6. Немолочных О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И., Сидоров А.В. Структурирование программ и вычислительных процессов на множество линейных и условных вершин // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – Вып. 19. – С. 207–212.
7. Немолочных О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И. Кубические покрытия логических условий вычислительных процессов и программ // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Вып. 14. – С. 225–233.

- | | |
|---|--|
| <i>Зыков Анатолий Геннадьевич</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zukov_a_g@mail.ru |
| <i>Безруков Александр Владимирович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, versus1945@list.ru |
| <i>Немолочных Олег Фомич</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, nemolochnov_o_f@mail.ru |
| <i>Поляков Владимир Иванович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, v_i_polyakov@mail.ru |
| <i>Андронов Алексей Викторович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, starsabre@mail.ru |

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В САПР**
О.Ф. Немолочнов, А.Г. Зыков, В.И. Поляков, А.А. Македонский

Рассматриваются вычислительные процессы, описываемые множеством параллельных структур, получаемых предложенным методом структурирования, для верификации программ в САПР.

Ключевые слова: структурирование вычислительных процессов, графо-аналитические модели.

Введение

Любой вычислительный процесс (ВП) должен быть верифицирован, независимо от авторского стиля его проектирования и реализации. Сложность вычислительных процессов определяется не количеством всех операторов программы, а числом безусловных и условных точек ветвления ВП, которые определяют логику принятия решений в программе. Таким образом, для решения задач анализа и тестирования программ целесообразно выделить все условия ветвления ВП в отдельное множество и рассмотреть их независимо от линейных операторов. Каждое условие-предикат можно представить логической переменной, а множество условий-предикатов – логической функцией соответственно. Это позволит перейти от смысловых понятий условий-предикатов к переменным и выражениям на языке алгебры логики и использовать аппарат булевой алгебры [1]. Целью работы является разработка метода структурирования ВП по его графо-аналитической модели (ГАМ).

Структурирование вычислительных процессов

Одним из способов описания алгоритма работы программы является ее ГАМ. В модели каждая команда представляется вершиной графа, а дуги графа – переходами между командами. В таком графе дуги образуются либо в порядке следования операторов, либо с помощью условной и безусловной передачи управления, нарушающей естественный ход выполнения программы. На графе выделяются начальная и конечная вершины, содержащие соответственно точки входа и выхода из программы. Будем называть такой граф неструктурированным графом программы [2]. Более информативным является структурированный граф.

Алгоритм структурирования является многопроходным, состоящим из нескольких итераций. Итерации заканчиваются, когда все команды из анализируемого программного кода покрыты вершинами графа или если какие-либо команды покрыть вершинами графа не удалось. Вторая ситуация означает, что в программе существует так называемый мертвый код, который следует обрабатывать особо.

Под структурированием графа будем понимать извлечение вычислительного процесса из программного кода и его описание в виде ГАМ на основе знания системы команд вычислителя (процессора), для которого написана программа [3]. Вычислитель может быть физическим (реальным) или смоделированным (виртуальным). Вычислительный процесс в виде ГАМ может быть последовательно представлен с различной степенью детализации. Первоначально – в виде линейных или условных вершин и дуг, где линейные вершины реализуют различные алгебраические выражения (формулы) без разветвлений, условные вершины – условия-предикаты, а дуги реализуют связи между вершинами, вырабатываемые устройством управления конкретного процессора. Дальнейшее структурирование сводится к выделению замкнутых подмножеств вершин в виде линейных и параллельных структур (циклических и ациклических) и обращений к процедурам. Под циклом будем понимать некоторое подмножество команд, которое может исполняться два и более раза.

В итоге ГАМ вычислительного процесса представляется в виде композиции линейных и параллельных структур с выделенными процедурами как самостоятельными независимыми единицами, которые, в свою очередь, тоже могут потребовать процесса структурирования. Между структурами устанавливается соотношение включения (вложенности) друг в друга. В основу структурирования положен принцип замкнутости подмножеств соответственно для команд и вершин, т.е. в любое замкнутое подмножество нельзя войти иначе, чем через точку входа (*Tin*), и выйти иначе, чем через точку выхода (*Tout*). В общем случае, любая программа или процедура являются замкнутыми через точки входа и выхода параллельными структурами.

Извлечение ВП из программы путем дешифрации может быть построено на основе анализа машинного кода. Таким образом, объединение условных и линейных вершин в циклы, процедуры, параллельные структуры и другие возможные блоки позволит в конечном итоге структурировать ГАМ ВП и автоматизировать верификацию, контроль и диагностику программного продукта.

Для построения ГАМ ВП используются три уровня структуризации, реализуемые последовательно.

На первом уровне программа представлена в виде машинного кода, расшифровываемого вычислительной машиной, реальной или виртуальной, система команд которой априорно считается известной. Все команды разбиваются на две группы: линейные команды, содержащие в себе, помимо операций пре-

образования информации, неявную микрокоманду передачи управления следующей команде, и команды условной и безусловной передачи управления, содержащие в явном виде микрооперацию передачи управления по заданным в них адресам. Таким образом, команды порождают вершины ГАМ, связанные между собой дугами, задающими переходы между командами-вершинами.

На втором уровне структуризации последовательности команд объединяются в некоторые замкнутые множества в виде линейных и условных вершин графа вычислительного процесса. Вершины образуют граф, в котором линейные вершины порождают одну дугу, а условные вершины порождают две альтернативные дуги. В линейных вершинах осуществляется вычисление значений переменных по итеративным или рекуррентным формулам. В условных вершинах вырабатываются направления передачи управления и, в этом смысле, они являются условиями-предикатами. Построенный таким образом граф является бинарным или булевым графом, в котором дуги графа задают только связи между вершинами и, следовательно, не являются нагруженными.

На третьем уровне структуризации, который фактически является структурированием вычислительного процесса, вершины графа второго уровня объединяются в некоторые замкнутые множества, образующие линейные и параллельные структуры. Отсюда следует, что линейные структуры являются вырожденными, так как содержат только один путь, и, следовательно, совпадают по определению с линейными вершинами второго уровня структуризации.

Для построения математического описания ГАМ вычислительного процесса, порождаемого программой при интерпретации ее команд вычислительной машиной, предложена итерационно-рекурсивная модель. Данная модель является концептуальной дискретно-синхронизированной и отражает один шаг при вычислении значений переменных в прямом направлении (итерация от точек входа к точкам выхода) и обратном направлении (рекурсия) от точек выхода к точкам входа. Для всех переменных, вычисляемых в линейных и параллельных структурах, можно построить итерационно-рекурсивные покрытия специального вида. Такие покрытия содержат в себе кубическую часть, описывающую условия вычисления некоторой заданной переменной, и линейные формулы. Множество линейных и параллельных структур и связей между ними образуют структурированную графоаналитическую модель вычислительного процесса.

Структурирование графа программы позволяет:

- уменьшить его размерность по числу вершин и дуг;
- перейти на основе выделенных условных вершин к построению булева графа;
- построить комплексные кубические покрытия переменных, вычисляемых программой;
- упростить организацию автономного (модульного) и сборочного тестирования программного обеспечения.

Параллельные структуры

Для ациклических и циклических параллельных структур ВП, реализованных программно, наблюдается аналогия с комбинационными и последовательностными логическими схемами, законы функционирования которых описываются кубическими покрытиями булевых функций.

Отличительной особенностью любой параллельной структуры является ее замкнутость по условиям-предикатам, т.е. совокупность условий-предикатов, образующих параллельные структуры, должна порождать тождественно истинное условие вычисления переменных по всем ветвям структуры. Это условие, наряду с условием одной точки входа и одной точки выхода, является основой при поиске и построении параллельных структур ВП программы.

Среди параллельных структур следует выделять особые случаи – циклы и процедуры. Для циклов следует находить линейную структуру – начало цикла, осуществляющую начальную установку параметров цикла, и параллельную структуру, образующую тело цикла, в которой отдельно выделено множество условных вершин, осуществляющих выход из цикла. Процедуры выделяются в самостоятельные структурные единицы, так как к ним возможны обращения из разных точек программы. Структурирование тел циклов и процедур осуществляется по тем же правилам с выделением линейных и параллельных структур.

Выделим два типа вычислений переменных в виде линейных и интервальных формул, которые в данном рассмотрении являются принципиально различными. Линейная формула вычисляет некоторую переменную на безальтернативной основе и реализуется в дальнейшем в виде последовательности операторов (машинных команд в исполнительных программах). Интервальная формула вычисляет одну и ту же переменную по двум или более линейным формулам в зависимости от некоторых заданных условий. Интервальная формула в дальнейшем реализуется в виде параллельной структуры, в которой могут существовать условия компенсации значений вычисляемой переменной. Указанная структура характеризуется одной точкой входа (точкой ветвления) и одной точкой выхода (точкой объединения ветвей). В программах эти точки реализуются с помощью команд безусловной и условной передачи управления, так как исполнительная программа записывается в виде линейной последовательности операторов, если она реализуется на одном вычислителе.

Заметим, что на ГАМ могут существовать параллельные ветви вычислений разных переменных в зависимости от некоторых условий. Но в таких структурах не возникают условия компенсации, и поэтому их анализ при поиске решений сводится к анализу обычных линейных формул в несколько усложненном варианте, связанном с вычислением условий. Также отметим, что циклы и обращения к процедурам сами по себе не создают параллельных структур и сводятся к линейным формулам, если в них, в свою очередь, нет внутренних интервальных формул. Таким образом, их анализ не требует специального рассмотрения.

Для примера рассмотрим ГАМ ациклического ВП с двумя условиями-предикатами, представленную на рисунке.

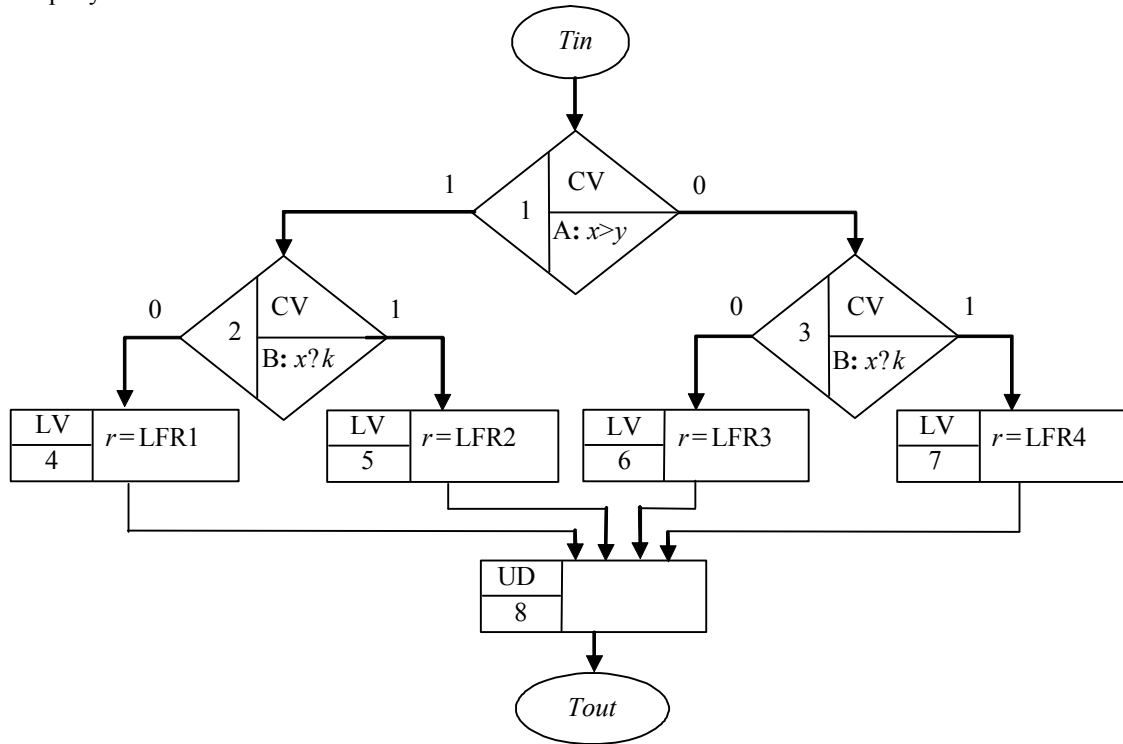


Рисунок. ГАМ с параллельной структурой вычислительного процесса, где А и В – условия-предикаты, А определяется отношением $x > y$, а В – отношением $x \geq k$

Модель представлена в нотации, предложенной в [4]. Здесь CV – обозначение условных вершин, LV – линейных вершин и UD – объединяющих вершин.

AB	00	01	11	10
	LFR3	LFR4	LFR2	LFR1

Таблица. Карта Карно для ГАМ структуры на рисунке

В таблице приведен вариант вычисления переменной r при различных значениях условий-предикатов, которые определяются отношениями, представленными в следующей системе неравенств:

$$r = \begin{cases} \text{LFR1, при } x > y \text{ и } x \leq k; \\ \text{LFR2, при } x > y \text{ и } x \geq k; \\ \text{LFR3, при } x \leq y \text{ и } x \leq k; \\ \text{LFR4, при } x \leq y \text{ и } x \geq k. \end{cases} \quad (1)$$

Из (1) видно, что условия вычисления r по формулам заданы в избыточной форме, и, с учетом перестановок, существует 4 различных сочетания последовательного их вычисления. Соответственно, потенциально существует четыре различных параллельные структуры на графе вычислительного процесса, реализующие одну и ту же интервальную формулу (1). С помощью карты Карно можно, основываясь на конечных значениях условий А и В, перейти к вычислению необходимой формулы. Например: если условия-предикаты А и В являются истиной, то на выходе получим команду $r = \text{LFR2}$, но если условие А будет ложью ($x \leq y$) при том же условии В, то получим на выходе $r = \text{LFR4}$. Изменение порядка следования условий-предикатов А и В приводит к разнообразию программных реализаций.

Заключение

Построение структурированных графо-аналитических моделей программного кода путем выделения линейных и условных вершин с последующим объединением их в параллельные структуры позволяет упростить верификацию и сопровождение программных продуктов, что в итоге дает возможность повысить качество и надежность программного обеспечения. Структурирование ГАМ ВП, в свою очередь, снижает размерность задачи верификации и делает ВП более прозрачным для его системного анализа. Это упрощает процесс организации модульного, сборочного и системного тестирования программ. Синтез тестов по структурированным ГАМ позволяет определить наличие недеklarированных возможностей и мертвого кода в программах и принять меры по предотвращению несанкционированного доступа и разного рода закладок в систему.

Литература

1. Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И. Кубические покрытия логических условий вычислительных процессов и программ // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – № 14. – С. 225–233.
2. Зыков А.Г., Немолочнов О.Ф., Поляков В.И., Сидоров А.В. Структурирование программ и вычислительных процессов на множество линейных и условных вершин // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – № 19. – С. 207–212.
3. Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И. Методы формализации графо-аналитических моделей вычислительных процессов программ // Труды Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» (AIS'07) и Интеллектуальные САПР (CAD-2007). – М.: Физматлит, 2007. – Т. 3. – С. 8–96.
4. Немолочнов О.Ф., Зыков А.Г., Поляков В.И., Осовецкий Л.Г., Сидоров А.В., Кулагин В.С. Итерационно-рекурсивная модель вычислительных процессов программ // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 12. – С. 14–20.

<i>Немолочнов Олег Фомич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, nemolochnov_o_f@mail.ru
<i>Зыков Анатолий Геннадьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zukov_a_g@mail.ru
<i>Поляков Владимир Иванович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, v_i_polyakov@mail.ru
<i>Македонский Алексей Алексеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alexeymakedonskiy@gmail.com

УДК 004.9

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СЕРТИФИКАТОВ И ПРОТОКОЛОВ
SSL/TLS ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ
ПРИ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ**

М.Я. Беккер, А.О. Терентьев, Ю.А. Гатчин, Н.С. Кармановский

Рассмотрен вопрос использования цифровых сертификатов и протоколов шифрования данных SSL/TLS в системах облачных вычислений. Показаны основные способы использования цифровых сертификатов для шифрования сетевых соединений, дан анализ особенностей использования этих способов. Предложен подход к решению вопроса о выборе наиболее подходящего способа в условиях различных видов систем облачных вычислений.

Ключевые слова: облачные вычисления, безопасность облачных вычислений, цифровой сертификат, шифрование, SSL, TLS, PKI.

Введение

При переходе к использованию облачных вычислений возникают значительные риски [1], которые требуют совершенствования системы защиты информации с учетом используемого вида облачных служб. При этом одним из первостепенных встает вопрос о защите данных, передаваемых между пользователем и поставщиком услуг [2]. Наиболее распространенным решением этой задачи является использование цифровых сертификатов шифрования и протоколов SSL (Secured Socket Layer) / TLS (Transport Layer Security).

Крупнейшие компании – от поставщиков услуг облачных вычислений (например, социальная сеть Facebook [3]) до производителей аппаратуры (например, SONY [4]) – внедряют функции SSL/TLS шифрования в свои продукты.

Протокол SSL, позволяющий использовать шифрование с открытым ключом для аутентификации и шифрования клиент-серверных соединений, получил широкое распространение во Всемирной сети [5]. Основанный на нем протокол TLS принят Internet Engineering Task Force (IETF) в качестве стандарта RFC-2246 [6], а в 2006 г. обновлен до версии 1.1 (RFC-4346 [7]). Протоколы SSL/TLS позволяют осуществить установление шифрованного соединения с использованием цифрового сертификата сервера и (или) клиента.

Целью настоящей работы является выработка рекомендаций по повышению безопасности передачи данных при проектировании систем облачных вычислений путем использования цифровых сертификатов для шифрования сетевых соединений на базе протоколов SSL/TLS.

Выпуск, хранение, проверка и отзыв цифровых сертификатов

Под цифровым (или электронным) сертификатом шифрования подразумевается электронный документ, содержащий открытый ключ шифрования, а также некоторый набор атрибутов, принадлежащих владельцу ключа. Сертификат может быть не подписан вообще (unsigned), подписан самим владельцем открытого ключа (self-signed, «самоподписной» сертификат) или подписан специальным удостоверяющим центром.

Для безопасного установления зашифрованных сетевых соединений клиент и сервер должны иметь возможность убедиться в достоверности используемых открытых ключей. Однако безопасный прямой обмен сертификатами возможен далеко не всегда. В таком случае клиент и сервер осуществляют проверку при посредстве так называемых удостоверяющих центров (УЦ) или центров сертификации (CA, Certificate Authority).

Систему, обеспечивающую проверку достоверности сертификатов клиентов и серверов при посредстве УЦ, называют инфраструктурой открытых ключей (PKI, Public Key Infrastructure). PKI включает в себя соответствующие аппаратные и программные средства, персонал, регламентные процедуры, необходимые для выпуска, управления, распространения, проверки достоверности и отзыва цифровых сертификатов. УЦ подтверждают достоверность открытого ключа и атрибутов его владельца путем выпуска сертификата, подписанного цифровой подписью удостоверяющего центра.

С целью разработки стандартов PKI, используемых в сети Интернет, в рамках IETF создана соответствующая рабочая группа – PKIX Working Group [8]. Стандартом X.509 определены форматы данных сертификатов и списков отзыва сертификатов, согласно RFC-5280 [9] определен формат сертификатов X.509 версии 3 и списков отзыва сертификатов (CRL, Certificate Revocation List) версии 2.

Для использования цифровых сертификатов каждый клиент и сервер должны располагать индивидуальным локальным хранилищем сертификатов (CS, Certificate store), которое представляет собой упорядоченный набор файлов или базу данных, содержащую сертификаты.

В хранилище располагается, как минимум, набор тех сертификатов, которым доверяет данная система. В том случае, если PKI не используется, достаточно разместить в хранилище неподписанные или «самоподписные» сертификаты доверенных узлов, зарегистрировав их как заслуживающие доверия (trusted).

Также в хранилище могут находиться собственные сертификаты данной системы, которые автоматически или с разрешения пользователя предъявляются при установлении сетевых соединений. Функции хранилища сертификатов могут быть предоставлены для приложений операционной системой либо реализованы в каждом отдельном приложении – web-браузере, web-сервере, почтовом клиенте и т.д. В последнем случае каждое приложение будет иметь собственный набор сертификатов.

При использовании PKI в хранилище также размещаются сертификаты центров сертификации, которым доверяет данная система. Такие сертификаты называются корневыми (RC, Root Certificate), так как они используются при проверке других сертификатов и списков отзыва с учетом установленной сертификационной политики (Certificate Policy, CP – см. RFC-3647 [10]).

С корневого сертификата начинается так называемый «путь проверки» (certificate validation path), который может включать несколько промежуточных звеньев. Путь проверки может быть построен через различные последовательности сертификатов от различных удостоверяющих центров. Этот процесс называют поиском пути (path discovery). Выбор пути проверки может осуществляться проверяющим клиентом самостоятельно (например, с помощью CryptoAPI, появившегося в операционных системах Windows, начиная с Windows NT 4.0 [11]). Также поиск пути может быть делегирован специальному серверу в соответствии с предложенным для этой цели протоколом SVCP согласно RFC-5055 [12].

Помимо самих сертификатов, центры сертификации могут использовать списки отзыва сертификатов (CRL), представляющие собой списки отозванных сертификатов с указанием времени отзыва, подписанные удостоверяющим центром. Такие списки свободно распространяются через общедоступный сетевой ресурс. При проверке сертификата с помощью PKI проверяющая система проверяет не только подпись сертификата и срок его действия, но также отсутствие его в соответствующем списке отзыва.

Количество отозванных сертификатов крупных PKI может быть довольно значительным, что вызывает рост накладных расходов при их проверке клиентом. Для решения этой проблемы разработан протокол проверки статуса отзыва сертификата в режиме «online» (OCSP, Online Certificate Status Protocol), принятый в качестве стандарта RFC-2560 [13]. Сервер OCSP распространяет информацию о статусе сертификатов в виде так называемых доказательств (proofs), защищенных с помощью электронной цифровой подписи, в виде ответов на запрос в соответствии с протоколом OCSP или в виде сокращенных списков отозванных сертификатов (MiniCLR). В сертификате, выпущенном в рамках соответствующей PKI, может быть указан адрес сервера OCSP для проверки статуса отзыва данного сертификата.

Следует обратить внимание, что при проверке срока действия сертификата используется текущая системная дата и время. Некорректная установка системной даты и времени является одной из наиболее распространенных проблем при использовании цифровых сертификатов. Для предотвращения возникновения таких проблем рекомендуется использовать системы сетевой синхронизации даты и времени с соответствующими серверами.

Таким образом, цифровые сертификаты в системах облачных вычислений могут применяться различными способами, в зависимости от используемой инфраструктуры, экономических показателей, требований, предъявляемых к системе обеспечения безопасности.

Шифрование передаваемых данных с использованием SSL/TLS

Чаще всего в качестве основного атрибута сертификата сервера используется доменное имя. При проверке сертификата сервера клиент имеет возможность убедиться, что он осуществляет сеанс связи (сессия) именно с сервером владельца данного доменного имени. Также важнейшим атрибутом любого сертификата является срок годности, устанавливающий календарную дату окончания его срока действия. В качестве прочих атрибутов клиентского сертификата чаще всего используются персональные данные физического лица – пользователя облачных служб (фамилия, имя, отчество, дата рождения, адрес, номер лицевого счета, адрес электронной почты и т.д.).

После успешной проверки достоверности сертификатов они могут быть использованы не только для шифрования передаваемых данных, но также для аутентификации и авторизации [14].

Однако аутентификация и авторизация с использованием цифровых сертификатов требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки настоящей работы. Отметим только, что, как правило, цифровые сертификаты используют не в качестве основного средства, а в качестве компонента многофакторной системы аутентификации/авторизации, в особенности в гетерогенных информационных системах с использованием облачных вычислений. При этом применение сертификатов для аутентификации клиентов имеет особую важность для отклонения запросов от клиентов, не обладающих привилегиями доступа к службам, но маскирующихся под них (например, отклонения попыток доступа с использованием украденной аутентифицирующей информации другого вида, такой как имя пользователя и пароль).

Далее будем рассматривать использование протоколов SSL/TLS для шифрования передаваемых данных. Шифрование передаваемых данных обеспечивает защиту от прослушивания сетевых соединений и атак типа man-in-the-middle, при которых злоумышленник внедряется в цепочку сетевого соединения в качестве одного из промежуточных узлов.

Очевидно, что для защиты от перечисленных угроз достаточно проверить достоверность сертификата только с одной стороны, после чего ключ шифрования сессии может быть передан безопасным способом. В этой связи при использовании SSL/TLS в системах облачных вычислений чаще всего ограничиваются проверкой сертификата сервера, что упрощает администрирование и снижает эксплуатационные издержки клиентов, поскольку системы клиент–сервер подразумевают незначительное количество серверов, обслуживающих значительное количество клиентов.

Основным программным обеспечением пользователем систем облачных вычислений является web-браузер. Все популярные на сегодняшний день web-браузеры поддерживают протокол HTTPS (HTTP Secured), принятый в качестве стандарта RFC-2818 [15]. Сам по себе протокол HTTPS не является самостоятельным протоколом, а представляет собой режим использования SSL/TLS протоколов для шифрования HTTP-соединения, установленного по протоколу TCP.

Таким образом, наиболее распространенным и экономически обоснованным подходом к шифрованию сетевых соединений в системах облачных вычислений является SSL/TLS шифрование с использованием сертификатов, предъявляемых со стороны сервера при установлении такого соединения. Однако при этом предстоит решить вопрос о том, каким способом осуществляется выпуск, распространение и проверка сертификатов, что и будет далее рассмотрено.

Использование PKI сторонних поставщиков

В работе [1] авторами подробно рассмотрен вопрос классификации систем облачных вычислений по видам пользовательской аудитории (или так называемой «области видимости»), где два вида таких систем можно выделить как основные – это публичные (общего пользования) и частные (с кругом пользователей, как правило, ограниченными контрагентами или сотрудниками одной организации).

Для публичных облачных систем существует сеть PKI общего пользования, которая используется по умолчанию всеми распространенными web-браузерами. В комплект поставки современного web-браузера входит набор сертификатов широко известных общедоступных центров сертификации, которые производитель браузера считает достойными доверия. Подобные наборы сертификатов также обычно входят в комплект поставки различного программного обеспечения, такого как операционные системы, серверы сетевых служб и т.д.

Сеть PKI общего пользования используется публичными облачными службами. Как правило, заключение договора на обслуживание, а также оплата услуг платных служб происходит в начале использования такой службы через сеть Интернет, причем потребитель услуг и поставщик могут находиться в противоположных точках земного шара. Очевидно, что в этом случае сложно предложить альтернативу использованию PKI общего пользования от одного из известных общедоступных сертификационных центров.

Такие центры сертификации предлагают организациям и частным лицам услуги по выпуску и обслуживанию цифровых сертификатов, как правило, на платной основе. Выпущенный ими сертификат может быть проверен практически любым пользователем или сервером в сети Интернет, поскольку сертификат такого центра с большой вероятностью уже присутствует в хранилище соответствующего узла, установленный вместе с операционной системой или соответствующим клиентским или серверным программным обеспечением (ПО).

Кроме того, услуги некоторых сертификационных центров, сертификаты которых входят в комплект поставки большинства современных web-браузеров, можно получить и бесплатно [16].

Выпускаемые центрами сертификации сертификаты могут иметь различные уровни доверия. При подключении по протоколу HTTPS большинство web-браузеров не только отображают в адресной строке наименование протокола «https://...», но и сообщают пользователю уровень доверия к используемому сертификату и дополнительную информацию о нем (например, выделяют адресную строку цветом в соответствии с уровнем доверия к предъявленному web-сервером сертификату, причем высокий уровень доверия обозначается зеленым цветом, а более низкий – синим, показывают краткое наименование центра выдачи сертификата, и т.д.).

Таким образом, использование PKI сторонних поставщиков оправдано при развертывании публичных облачных служб, пользователем которых может стать любой желающий при наличии подключения к сети Интернет.

В частном облаке можно использовать сеть PKI сторонних поставщиков точно так же, как это осуществляется при использовании публичных облачных служб. Во многих случаях при разработке политики безопасности использование пользователями web-браузера с набором корневых сертификатов, поставляемого в комплекте с операционной системой, и приобретение для серверов предприятия сертификата одного из центров сертификации, которому доверяет поставщик операционной системы, может быть признано достаточным для установления защищенных соединений.

Однако использование PKI сторонних поставщиков влечет за собой все риски, характерные для использования облачных вычислений вообще и подробно рассмотренные авторами в работе [1]. Особенно следует обратить внимание на риск потери контроля, поскольку отзыв сертификата в этом случае возможен только при посредстве поставщика услуг. Более того, необходимо учитывать, что доверить стороннему поставщику приходится не просто одну из используемых сетевых служб, а сетевую службу, являющуюся основой обеспечения безопасности всех остальных используемых служб.

Также следует учитывать, что при использовании набора корневых сертификатов, установленного вместе с программным обеспечением, наличие уязвимости одного из соответствующих центров сертификации компрометирует всю систему. Таким образом, надежность такой системы обеспечения информационной безопасности определяется надежностью самого слабозащищенного центра сертификации, количество которых довольно велико.

С учетом изложенного очевидно, что во многих случаях при разработке политики безопасности предприятия встает вопрос о поиске более безопасного способа использования цифровых сертификатов, чем PKI сторонних поставщиков.

Создание «собственной» PKI

Под «собственной» будем понимать такую инфраструктуру публичных ключей, которая полностью управляется и контролируется специалистами использующей ее организации.

В случае построения частной системы облачных вычислений необходимо определиться, целесообразно ли использование PKI вообще, или же можно ограничиться прямым обменом сертификатами. Вполне вероятно, что в ряде случаев вполне возможно обойтись без PKI, выпустив необходимые сертификаты и установив их непосредственно в хранилище клиентских и серверных систем вручную или при помощи административного программного обеспечения. Использование же PKI при наличии разветвленной компьютерной сети со значительным количеством серверов и пользователей имеет преимущество с точки зрения обеспечения безопасности, которое заключается в возможности гибкого управления подчиненными сертификатами и их сроками действия. При наличии PKI администратор может в любое время объявить любой из ранее выпущенных сертификатов недействительным при помощи списка отзыва сертификатов (CRL), что значительно повышает степень защиты информации.

При создании «собственной» PKI-инфраструктуры выделяются, как правило, соответствующие ресурсы для ее первоначального создания и дальнейшей поддержки. Поскольку необходимо обеспечить как выпуск, так и проверку сертификатов, одним из основных требований к подобной инфраструктуре является высокий уровень ее работоспособности (способность обслуживать большое количество запросов проверки, отказоустойчивость, возможность быстрого восстановления после аварий и т.д.). Кроме того, службы проверки сертификатов должны быть топологически доступны для сетевых запросов соответствующих клиентов и серверов.

Администратор узла PKI может при помощи управления PKI выпустить новый сертификат или объявить существующий недействительным, что значительно повысит степень защиты информации и гибкость управления этой защитой, но будет предъявлять более жесткие требования к информационной безопасности самих узлов PKI.

Самой простой вариант организации PKI – система с одиночным узлом УЦ. В этом случае все клиенты имеют в хранилище доверенный сертификат этого единственного одиночного узла.

Для организации, имеющей более одного крупного подразделения, система с одиночным узлом может оказаться недостаточно гибкой. Тогда обычно используют иерархическую PKI. В этом случае все клиенты доверяют одному головному УЦ, но в системе существуют другие УЦ, которые подчиняются вышестоящему УЦ вплоть до головного, образуя древовидную структуру. Это позволяет делегировать полномочия по выпуску сертификатов отдельным группам пользователей и серверов на более низкие уровни, гибко реагировать на возможные проблемы информационной безопасности в одной из «ветвей», обслуживающей, например, одно из подразделений организации, не затрагивая всю остальную систему.

В случае доверительных отношений между держателями отдельных УЦ возможно построение сетевой PKI, когда некоторые УЦ непосредственно доверяют другим УЦ без посредничества головного центра, а клиенты доверяют только «своему» УЦ.

На практике же чаще всего встречаются смешанные варианты перечисленных выше архитектур, могущие порождать очень сложные цепочки сертификации. Для лучшего контроля над ситуацией часто используется строго иерархическая структура в рамках организации, но при этом выделяется отдельный УЦ, называемый мостовым, который отвечает за доверительные взаимоотношения с УЦ других организаций.

Таким образом, выбор структуры «собственной» PKI осуществляется, в первую очередь, в зависимости от структуры организации, а также ее взаимоотношений с другими организациями – контрагентами.

Одновременное использование нескольких наборов сертификатов или PKI

Как показано в работе [1], на сегодняшний день редко можно встретить публичные и частные облачные системы в чистом виде. На практике, как правило, возникает необходимость одновременного

использования ресурсов предприятия и публичных облачных служб. Следует обратить внимание, что при использовании собственных сертификатов или развертывании «собственной» PKI простое добавление выпущенных сертификатов в общее хранилище сертификатов пользовательских систем и приложений, например web-браузера, может оказаться недостаточным для обеспечения должного уровня защиты. Дело в том, что при этом web-браузер признает доверенными как добавленные сертификаты, так и предустановленные ранее корневые сертификаты. Следовательно, при уязвимости одного из центров сертификации она может быть использована для атаки на корпоративные ресурсы частного облака, так как поддельный сертификат будет признан достоверным при обращении к корпоративным ресурсам. В то же время удаление предустановленных корневых сертификатов также не приведет к желаемому результату, так как пользователь лишается возможности использования защищенных HTTPS-соединений с публичными службами в штатном режиме.

Задача обеспечения высокого уровня информационной безопасности в случае одновременного использования публичных облачных служб и защиты с помощью собственных сертификатов может быть решена различными способами.

Решение этой задачи возможно на стороне клиента. Например, можно использовать разные хранилища для корневых сертификатов PKI общего пользования и собственных сертификатов. Для этого используется дополнительное специализированное программное обеспечение, поскольку в настоящее время в распространенных web-браузерах отсутствует возможность настройки хранилища для использования разных наборов сертификатов при работе в различных сетевых зонах. Авторами направлено предложение производителям ведущих web-браузеров о добавлении такой функции в будущих версиях, что позволит осуществлять более тонкую настройку клиентских систем и во многих случаях избавит администраторов от необходимости использования дополнительного программного обеспечения.

Решение рассматриваемой задачи возможно также средствами сервера при использовании «собственной» PKI. В этом случае клиентское ПО настраивается на использование только «собственной» PKI, из хранилища клиентов удаляются прочие предустановленные сертификаты (при их наличии), а проверка сертификатов публичных облачных служб осуществляется при посредстве «собственной» PKI.

Рекомендации разработчикам систем безопасности облачных вычислений

Приведенный выше сравнительный анализ позволяет сформулировать следующие рекомендации разработчикам систем безопасности облачных вычислений по выбору способа использования цифровых сертификатов для шифрования данных.

- Для систем с невысокими требованиями к гибкости смены сертификатов при высокой критичности уровня затрат, а также для тестовых и пилотных систем рекомендуется использование «самоподписанных» сертификатов и их прямая установка на пользовательские и серверные узлы.
- Для систем с высокими требованиями к уровню защиты информации и топологически гарантированными сетевыми соединениями клиентов облачных служб с инфраструктурой организации-поставщика служб рекомендуется использование «собственной» PKI инфраструктуры.
- Для публичных облачных служб, а также систем с требованиями к защите информации, допускающими использование субподрядчиков, имеющих гарантированные сетевые соединения клиентов облачных служб с сетевыми ресурсами проверки сертификатов (как правило, через сеть Интернет) рекомендуется приобретение сертификатов соответствующих доверенных поставщиков.

Выбор способа использования сертификатов должен начинаться с максимально точной количественной оценки приоритетов – уровня защищенности информации, степени риска, срока жизни решения, уровня первоначальных затрат, стоимости поддержки решения, стоимости перехода от одного способа к другому и т.п.

При выборе способа использования сертификатов следует предусмотреть и оценить возможные варианты перехода в будущем на альтернативные способы (в частности, если система критериев выбора изменится со временем). При этом наиболее затратным является использование «собственной» PKI организации, дающей возможность обеспечения максимальной степени защиты информации.

Заключение

Использование шифрования на базе протоколов SSL/TLS в системах облачных вычислений влечет за собой необходимость обеспечить выпуск, распространение и проверку цифровых сертификатов, как минимум, с одной стороны сетевого соединения.

Авторами проведен анализ и выявлены особенности трех основных способов использования цифровых сертификатов поставщиками и пользователями систем облачных вычислений: использование PKI сторонних поставщиков, разработка и внедрение «собственной» PKI, прямой обмен сертификатами. Предложен подход к выбору способа использования цифровых сертификатов при облачных вычислениях с учетом особенностей каждого способа.

Наиболее безопасным способом использования цифровых сертификатов является создание «собственной» PKI. Однако этот способ требует значительных затрат. Одновременное использование не-

скольких наборов сертификатов или PKI позволяет обеспечить требуемый уровень безопасности для каждой используемой сетевой зоны.

Выработаны рекомендации разработчикам систем безопасности облачных вычислений, использующих цифровые сертификаты для шифрования сетевых соединений на базе протоколов SSL/TLS, которые позволяют минимизировать риски и оптимизировать экономические показатели с учетом вида проектируемых и эксплуатируемых облачных служб.

Литература

1. Беккер М.Я., Гатчин Ю.А., Кармановский Н.С., Терентьев А.О., Федоров Д.Ю. Информационная безопасность при облачных вычислениях: проблемы и перспективы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1(71). – С. 97–102.
2. Sicherheitsrisiken der Cloud sind beherrschbar. Virtualisierungs guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.virtualisierungs-guide.de/Sicherheit/tabid/267/articleType/ArticleView/articleId/13535/Sicherheitsrisiken-der-Cloud-sind-beherrschbar.aspx>, свободный. Яз. нем. (дата обращения 12.05.2011).
3. Facebook nun mit durchgehender SSL-Verschlüsselung. Der Standard [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://derstandard.at/1295570976708/Facebook-nun-mit-durchgehender-SSL-Verschlueselung>, свободный. Яз. нем. (дата обращения 12.05.2011).
4. Kein Trickraub mit Netzwerkkameras. SONY [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sony.de/biz/content/id/1189437949068/section/produkt/product/nvmfixedcameras?preserveContent=true>, свободный. Яз. нем. (дата обращения 12.05.2011).
5. Introduction to SSL. Mozilla Developer Network [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://developer.mozilla.org/en/Introduction_to_SSL, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
6. The TLS Protocol Version 1.0. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc2246/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
7. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.1. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc4346/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
8. PKIX Working Group. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/wg/pkix/charter/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
9. Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and Certificate Revocation List (CRL) Profile. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc5280>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
10. Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate Policy and Certification Practices Framework. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc3647>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
11. Poking Around Under the Hood: A Programmer's View of Windows NT 4.0. Microsoft Developer Network [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.microsoft.com/msj/archive/S413.aspx>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
12. Server-Based Certificate Validation Protocol. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc5055>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
13. X.509 Internet Public Key Infrastructure Online Certificate Status Protocol. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc2560>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
14. An Internet Attribute Certificate Profile for Authorization. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc5755>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
15. HTTP Over TLS. The Internet Engineering Task Force [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc2818/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).
16. StartSSL Free. StartSSL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.startssl.com/?app=1>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 12.05.2011).

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Беккер Михаил Яковлевич | – Microsoft Deutschland GmbH, ведущий консультант, mbecker@microsoft.com |
| Терентьев Андрей Олегович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, 9444828@mail.ru |
| Гатчин Юрий Арменакович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gatchin@mail.ifmo.ru |
| Кармановский Николай Сергеевич | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, karmanov50@mail.ru |

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СТРУКТУРЫ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ УГРОЗ ОХРАНЯЕМОМУ ОБЪЕКТУ

В.В. Волхонский, А.Г. Крупнов

Выполнен анализ возможных воздействий на средства обнаружения угроз. Предложен подход для учета этих воздействий, позволяющий решать задачи разработки структуры средств обнаружения и делать аргументированный выбор их параметров и характеристик. Показаны ограничения в использовании метода многорубежной охраны. Даны рекомендации по построению структуры средств обнаружения.

Ключевые слова: угрозы, средства обнаружения, система безопасности, охраняемый объект.

Введение

Как известно, одна из важнейших задач системы безопасности (СБ) – это своевременное и надежное обнаружение комплекса угроз объекту обеспечения безопасности [1]. Очевидно, что возможность решения этой задачи зависит как от конкретных видов угроз, так и от правильности выбора средств обнаружения (СО) и их расположения на объекте обеспечения безопасности, т.е. от структуры СО угроз. В настоящее время имеется достаточно много публикаций по вопросам выбора принципа действия, параметров и расположения на объекте одиночных устройств обнаружения [2]. Однако для совокупности СО задачи выбора структуры комплекса СО решаются лишь на уровне эмпирических рекомендаций. В частности, это относится к методу многорубежной охраны в системах охранной сигнализации [3, 4] с использованием нескольких СО несанкционированного проникновения (НСП). Однако эти рекомендации ограничиваются необходимостью использовать СО разного физического принципа действия. При этом не говорится о выборе конкретного физического принципа действия, взаимного расположения самих СО и их зон обнаружения (ЗО), что, несомненно, должно оказывать влияние на вероятность обнаружения угрозы.

Таким образом, возникает задача аргументированного выбора упомянутых параметров с учетом вероятностных характеристик, что позволило бы повысить эффективность СБ.

Поскольку задачи обнаружения различных видов угроз имеют специфику, в дальнейшем ограничимся наиболее распространенным случаем НСП. При необходимости результаты, приведенные ниже, могут быть обобщены и на другие виды угроз.

Модели нарушителя

Возможности по обнаружению проникновения в значительной мере будут зависеть от степени подготовленности нарушителя, которая может характеризоваться моделью потенциального нарушителя. Общие вопросы разработки модели нарушителя рассмотрены в [5]. Для предварительного анализа возможно использование упрощенной модели, для которой можно условно выделить следующие три основных категории.

- *Неподготовленный*, действующий без априорной информации об объекте и СБ. Вероятнее всего, он будет проникать через наиболее уязвимые места объекта. Неподготовленный нарушитель обычно не имеет конкретной цели и действует спонтанно.
- *Подготовленный*, обладающий простейшими подручными средствами (инструменты, лестница и др.) и априорной информацией об объекте и СБ, в том числе базовыми знаниями о принципах функционирования СБ, в частности, СО. Зная о возможном наличии средств охраны, он будет искать также и менее защищенные СО места. Подготовленный нарушитель имеет, как правило, конкретную цель и тактику действий.
- *Высококвалифицированный*, владеющий существенной априорной информацией как об объекте, так и о СБ, включая знание ее основных параметров и деталей функционирования ее элементов, а также имеющий специальные средства (инструменты, детали и приборы, и др.). В дополнение к этому он может применять различные методы и способы противодействия системе безопасности и воздействия на нее, основываясь на предварительной информации не только об объекте, но и о самой СБ, собранной ранее. Проникновение возможно с любого направления, с применением различных методов «обхода» средств обнаружения и с возможным воздействием на различные элементы СБ как в процессе проникновения, так и выполненным предварительно.

Методы воздействия на СБ

Для достижения своей цели нарушитель может использовать различные приемы и средства, а также маршруты проникновения, позволяющие свести к минимуму вероятность обнаружения НСП. Выбор преступником этих методов и средств определяется априорной информацией о типе СО, их физическом принципе действия, расположении на объекте и т.п. Вероятность обнаружения также зависит от квалификации преступника, точнее, от его возможностей по использованию средств и методов, уменьшающих

вероятность его обнаружения. В связи с этим известные модели нарушителей, упомянутые выше, целесообразно связать с методами и способами воздействия на СО того или иного типа нарушителя.

Можно говорить о двух основных методах несанкционированного воздействия на средства обнаружения для снижения вероятности обнаружения.

1. *Пассивный метод*, предполагающий использование приемов и средств, уменьшающих вероятность обнаружения без прямого или косвенного воздействия на само устройство обнаружения или другие элементы СБ. Такой метод можно условно назвать обходом средств обнаружения. Примерами могут служить следующие действия:

- Перемещение на границах зон обнаружения, где чувствительность, а, следовательно, и вероятность обнаружения ниже;
- Перемещение со скоростями вне рабочего диапазона обнаружения (выше или ниже соответственно максимальной и минимальной скоростей обнаружения);
- Использование средств снижения видимости объекта обнаружения в рабочем спектральном диапазоне.

2. *Активный метод*, использующий непосредственные воздействия на СО, иначе говоря, воздействия (механические, электрические, программные и т.п.), нарушающие нормальное функционирование элементов СБ и либо снижающие вероятность обнаружения угрозы, либо исключаящие саму возможность обнаружения. Такой метод можно условно назвать противодействием СО. Подобное противодействие СО может быть прямым (к примеру, закрашивание оптической системы) или косвенным (например, загоразивание зоны обнаружения).

Сравнивая методы воздействия на СБ и модели нарушителей, можно говорить о том, что неподготовленный преступник не использует никакие из упомянутых методов, подготовленный – пассивные методы, а высококвалифицированный – все методы, как пассивные, так и активные.

Многорубежная охрана

Проанализируем применяемый в настоящее время способ использования многорубежной охраны [3, 4] с учетом модели нарушителя и различных вариантов структуры и состава СО. Предполагая, что используется модель неподготовленного нарушителя, а средства обнаружения имеют разные физические принципы действия, можно говорить, как показано в [4], о независимости функционирования СО разных рубежей. Обозначая вероятности P_i обнаружения каждым i -ым рубежом (т.е i -ым СО), вероятность

P^J обнаружения хотя бы одним из рубежей будет для двух рубежей равна $P^2 = P_1 + P_2 - P_1P_2$, а для трех – $P^3 = P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_2 - P_1P_3 - P_2P_3 + P_1P_2P_3$. Таким образом, многорубежная охрана позволяет повысить вероятность обнаружения СБ в целом. На практике обычно используется до трех рубежей в одной подсистеме, например, охранной сигнализации. Однако, учитывая возможности по обнаружению одной и той же угрозы разными подсистемами безопасности [4], для интегрированной системы безопасности можно использовать общее выражение $P^J = 1 - \prod_{i=1}^J (1 - P_i)$ для произвольного количества рубежей.

В случае подготовленного нарушителя, использующего активные и пассивные методы воздействия на СО, предположение о независимости функционирования средств обнаружения становится неправомочным. Также это предположение не будет соответствовать действительности в случае перекрытия зон обнаружения. Другими словами, используемые рекомендации по организации многорубежной охраны соответствуют действительности, но только для неподготовленного нарушителя. В связи с этим требуется оценка вероятности обнаружения с учетом влияния на условия окружающей среды и различных методов активного и пассивного воздействия.

Анализ вероятности обнаружения

В общем случае вероятность обнаружения будет зависеть от ряда факторов, к основным из которых можно отнести следующие.

- Совокупность факторов, определяющих окружающие условия (ОУ) и влияющие на j -ое СО. Обозначим их E^j .
- Пассивные способы воздействия (ПВ) на j -ое средство обнаружения или обход СО. Обозначим n -ое пассивное воздействие на j -ое СО как B_n^j , а множество N возможных воздействий на средства обнаружения как B^j .
- Активные способы воздействия (АВ). Пусть множество A^j определяет совокупность K возможных воздействий A_k^j на j -ое СО.

Тогда вероятность обнаружения i -ой угрозы T_i j -ым СО можно записать как функцию упомянутых выше факторов $P_i^j = P(D_i^j / \mathbf{E}, \mathbf{B}, \mathbf{A})$. При условии воздействия всех факторов множество \mathbf{S} возможных воздействий будет определяться пересечением подмножеств АВ, ПВ и ОУ, т.е. $\mathbf{S} \subseteq (\mathbf{A} \cap \mathbf{B} \cap \mathbf{E})$. Обычно имеет место только часть \mathbf{S}_i воздействий, формируемых i -ой угрозой и определяемых соответствующими подмножествами $\mathbf{E}_i \subseteq \mathbf{E}$, $\mathbf{B}_i \subseteq \mathbf{B}$, $\mathbf{A}_i \subseteq \mathbf{A}$, для которых справедливы соотношения $\mathbf{S}_i \subseteq (\mathbf{A}_i \cap \mathbf{B}_i \cap \mathbf{E}_i)$, $\mathbf{S}_i \subseteq \mathbf{S}$. Заметим, что в общем случае $\mathbf{A} \cap \mathbf{E} \neq \emptyset$, $\mathbf{A} \cap \mathbf{B} \neq \emptyset$ и $\mathbf{E} \cap \mathbf{B} \neq \emptyset$, т.е. факторы АВ, ПВ и ОУ могут частично совпадать.

Ясно, что рассматриваемые воздействия, как правило, приводят к уменьшению вероятности обнаружения и эффективности СБ в целом. Рассматривать крайне редкие случаи повышения вероятности обнаружения при том или ином виде воздействия вряд ли имеет смысл. В связи с этим с точки зрения увеличения надежности обнаружения необходимо обеспечить независимость функционирования СО от окружающих условий, пассивных и активных воздействий, насколько это возможно.

Проанализируем, какие требования к структуре средств обнаружения должны предъявляться при использовании модели подготовленного нарушителя, т.е. только пассивных способов воздействий на СО.

Очевидно, что N возможных пассивных воздействий $\mathbf{B}^j = [B_1^j, B_2^j, \dots, B_N^j,]$ на j -ое СО зависят, в первую очередь, от принципа действия СО и его положения на объекте, а, следовательно, и расположения зоны обнаружения. Аналогично для k -го СО L воздействий $\mathbf{B}^k = [B_1^k, B_2^k, \dots, B_L^k,]$ могут совпадать или отличаться от j -го в зависимости от принципа их действия и взаимного расположения.

Для повышения вероятности обнаружения необходимо исключить возможность одновременного разного пассивного воздействия на оба СО. Для этого события любой пары B_n^j и B_l^k должны быть несовместными, $B_n^j \cap B_l^k = \emptyset$, для обеспечения невозможности одновременно выполнения этого воздействия, т.е.

$$\bigcup_{n \in N} B_n^j \cap \bigcup_{l \in L} B_l^k = \emptyset, \quad j \in J, k \in K. \quad (1)$$

Невыполнение последнего равенства соответствует случаю, когда есть общий(ие) фактор(ы) ПВ, одновременно применимый(ые) к обоим СО.

Простым способом проверки правильности приведенных выше рассуждений может служить выбор принципов действия каналов обнаружения комбинированных датчиков движения. В настоящее время используется практически только одно сочетание – пассивный инфракрасный и радиоволновой. Действительно, преобразуя выражение (1) для случая воздействий ОУ на СО, можно записать выражение, определяющее необходимость $\bigcup_{n \in N} E_n^j \cap \bigcup_{l \in L} E_l^k = \emptyset$, $j \in J, k \in K$. Это выполняется практически в полной

мере для упомянутого сочетания, подобранного опытным путем, но не для других. Таким образом, полученные результаты могут служить математическим обоснованием такого выбора.

Используя формулу полной вероятности применительно к рассматриваемой задаче, можно записать выражение для вероятности обнаружения при условии воздействий на СО комплекса угроз

$$P^j(D^j / \mathbf{E}, \mathbf{B}, \mathbf{A}) = \sum_{i=1}^J P(\mathbf{S}_i^j) \cdot P(D^j / \mathbf{S}_i^j), \quad \text{где } \mathbf{S}_i^j \subseteq \mathbf{S}. \quad (2)$$

Из этого выражения и предыдущих рассуждений можно сделать общие выводы, что для обеспечения максимума вероятности обнаружения угрозы необходимы:

- инженерное обеспечение объекта и структура СО, позволяющие свести к минимуму вероятность $P(\mathbf{S}_i^j)$ реализации различных видов воздействий;
- структура СО, обеспечивающая минимум влияния окружающих условий и, следовательно, максимум вероятности $P(D^j / \mathbf{S}_i^j)$;
- выбор СО, обладающих минимальной чувствительностью к неинформативным физическим параметрам объекта, т.е. параметрам, на которые не воздействует угроза при ее реализации.

Из первого пункта следует также необходимость обнаружения не только угрозы объекту, но и воздействия на элементы системы безопасности. Это, впрочем, можно рассматривать как дополнительную угрозу, но не объекту, а самой системе безопасности.

Более детальные выводы можно сделать на основе анализа конкретной ситуации с использованием того или иного метода анализа или оптимизации выражения (2).

Выбор положения и формы зон обнаружения

Проанализируем требования к взаимному расположению средств обнаружения и соответствующих им зон обнаружения.

Одиночная зона – простейший случай (рис. 1, а), при котором возможность использования различных воздействий не представляет трудностей.

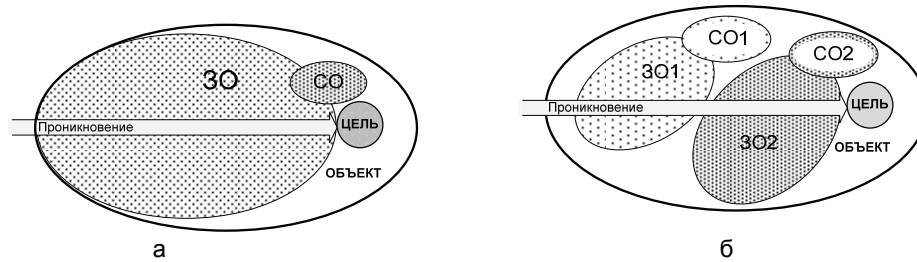


Рис. 1. Одиночная (а) и последовательные (б) зоны обнаружения

Два требования по расположению зон обнаружения на объекте в этом случае очевидны и относятся к любой модели нарушителя [1].

- Начало зоны обнаружения должно быть максимально приближено к периметру объекта, чтобы обеспечить возможность максимально раннего обнаружения.
- Предполагаемый маршрут НСП должен, по возможности, больше проходить по зоне обнаружения, поскольку при этом возрастает продолжительность воздействия на физический параметр зоны, контролируемый средством обнаружения. Для этого нужно выбирать параметры зоны обнаружения (положение и размеры) таким образом, чтобы преступник перемещался по зоне, в идеальном случае, на всем маршруте несанкционированного проникновения (рис. 1, а).

Неперекрывающиеся зоны обнаружения. Упомянутая многорубежная охрана состоит в использовании нескольких ЗО на маршруте НСП. С точки зрения расположения этих зон они могут быть последовательными, не перекрывающимися (рис. 1, б) или с перекрытием (рис. 2). Но в первом случае при проникновении подготовленного нарушителя не будет выполняться требование несовместности $B_n^j \cap B_l^k = \emptyset$ пассивных воздействий, поскольку в каждой из следующих последовательных (без перекрытия) ЗО может применяться новый набор ПВ, соответствующий физическому принципу действия конкретного типа СО. Например, для структуры СО на рис. 1, б, можно применить сначала воздействие B_l^1 , а затем B_k^2 , делая это независимо. С точки зрения снижения возможности ПВ на СО действительно целесообразно использовать СО различного физического принципа действия [3]. Это усложняет задачу НСП, но не является оптимальным решением, т.е. лишь отчасти усложняет задачу нарушителя и повышает надежность обнаружения.

Перекрывающиеся зоны обнаружения. При перекрывающихся зонах (рис. 2) возникает необходимость использования одновременно нескольких воздействий. В связи с этим совмещение ЗО позволяет затруднить или полностью исключить ПВ на все СО одновременно. Если зоны обнаружения перекрываются, возможно несколько вариантов.

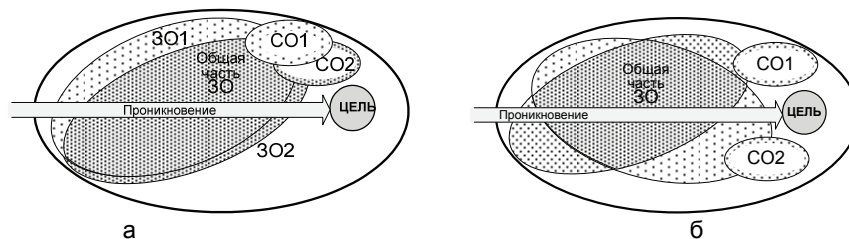


Рис. 2. Перекрывающиеся ЗО средств обнаружения, расположенных в одном (а) и разных местах (б)

1. Перекрывающиеся зоны обнаружения СО одного физического принципа действия, расположенных в одной области объекта (рис. 2, а). При этом для обхода обоих СО потребуются одни и те же действия. Следовательно, такой вариант не приведет практически к сколько-нибудь существенному увеличению вероятности обнаружения.
2. Перекрывающиеся зоны обнаружения СО одного физического принципа действия, установленных в разных областях объекта, например, как на рис. 2, б. В этом случае часть действий, необходимых для

обхода разных СО, будут отличаться (т.е. может выполняться сформулированное выше требование несовместности действий), и обычно выполнить их одновременно не удастся.

3. Перекрывающиеся зоны СО с разными физическими принципами действия, расположенные в одном месте. В такой ситуации методы и средства обхода, как правило, будут отличаться в значительной мере, зачастую полностью, что исключает использование их одновременно. Следовательно, и вероятность обнаружения будет выше.

Очевидно, что при решении практических задач на основе приведенных выше рассуждений требуется учет конкретного физического принципа действия СО.

Основные правила выбора структуры средств обнаружения

Учитывая изложенное выше, в дополнение к общим требованиям к системе безопасности [1] можно сформулировать основные правила или принципы построения структуры средств обнаружения угроз на объекте обеспечения безопасности, состоящие в необходимости обеспечить следующее:

1. Использование перекрытия ЗО в пространстве, т.е. решение задачи обнаружения угрозы одновременно во времени несколькими средствами обнаружения;
2. Выбор места установки каждого СО и их взаимного расположения так, чтобы эффективные пассивные воздействия на средства обнаружения были несовместными для разных СО, контролирующей одну и ту же зону, т.е. создание условий, требующих выполнения невыполнимого;
3. Возможность выявления эффективных активных воздействий на средства обнаружения либо самим СО, либо специализированными средствами обнаружений воздействия в любом состоянии (в любом режиме работы) СБ;
4. Использование многопараметрических СО, т.е. средств, анализирующих одновременно несколько физических параметров объекта обеспечения безопасности при реализации угрозы;
5. Равную защищенность объекта или цели(ей), предполагающую возможность своевременного реагирования после обнаружения угрозы для любого маршрута НСП;
6. Формирование зон(ы) обнаружения, перекрывающей любой и весь маршрут НСП или, по крайней мере, наиболее уязвимые места возможного маршрута;
7. Использование инженерных средств технической укреплённости, вынуждающих нарушителя двигаться по маршруту с максимально надежным обнаружением НСП.

Строго говоря, такая характеристика как вероятность обнаружения, используемая в работе, может оказаться в ряде случаев недостаточной для анализа уязвимостей объекта критической инфраструктуры, поскольку в такой ситуации не учитываются протяженность зон обнаружения и распределение вероятности обнаружения по зоне. В таких случаях представляется целесообразным использование плотности распределения вероятности обнаружения на маршруте прохождения нарушителя и способа анализа, предложенного в [6]. Очевидно, что при этом форма плотности распределения вероятности будет зависеть от окружающих условий и применяемых пассивных и активных способов противодействия. Из этих же рассуждений следует также необходимость тщательного учета протяженности зоны обнаружения и возможной формы кривой плотности распределения вероятности обнаружения.

Заключение

На основе анализа известных методов и приемов построения структуры средств обнаружения на объектах обеспечения безопасности и возможных воздействий на СО в работе получены следующие результаты.

- Предложен подход к анализу структуры СО на основе описания вероятности обнаружения как функции множества воздействий на средства обнаружения, позволяющий получить математическое выражение для вероятности обнаружения и учитывающий окружающие условия, пассивные и активные воздействия на СО угроз. Проанализированы соотношения между подмножествами пассивных и активных воздействий и окружающих условий на СО.
- Показано, что для повышения вероятности обнаружения угроз необходимо обеспечить выполнение требования несовместности воздействий на СО.
- Обоснована целесообразность установки средств обнаружения одного физического принципа действия в разных частях объекта, а разного – в одной, с перекрытием их зон обнаружения.
- Показано, что при использовании известного метода многорубежной охраны имеются ограничения. Так, для увеличения вероятности обнаружения целесообразно перекрытие зон обнаружения, а выбор взаимного расположения СО будет зависеть от их физического принципа действия.
- Обобщены и математически подтверждены известные требования к построению структуры СО, в частности, по используемому сочетанию типов обнаружителей в комбинированных датчиках движения (пассивный инфракрасный и радиоволновой).

В целом, полученные результаты позволяют осуществить аргументированный выбор принципа действия и взаимного расположения на объекте СО для минимизации возможности действий нарушителя по снижению вероятности обнаружения НСП.

Литература

1. Волхонский В.В. Основные положения концепции обеспечения безопасности объектов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3(73). – С. 116–121.
2. Волхонский В.В. Извещатели охранной сигнализации. Изд. 4-е доп. и перераб. – СПб: Экополис и культура. – 2004. – 272 с.
3. Коновалов В.А., Севрюков Д.В., Хасянов Р.С. Многорубежная защита. Особенности охраны периметра в обеспечении комплексной безопасности особо важных объектов // Системы безопасности. – 2007. – № 3. – С. 114–117.
4. Волхонский В.В. Системы охранной сигнализации. 2-е изд., доп. и перераб. – СПб: Экополис и культура. – 2005. – 204 с.
5. Бояринцев А.В., Ничиков А.В., Редькин В.Б. Общий подход к разработке моделей нарушителей // Системы безопасности. – 2007. – № 4. – С. 50–53.
6. Волхонский В.В. Подход к оценке вероятности пресечения несанкционированных действий в объединенной системе безопасности // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – Київ, 2000. – С. 77–81.

Волхонский Владимир Владимирович – ЗАО Хоневелл, кандидат технических наук, доцент, руководитель направления систем безопасности, volkhonski@mail.ru
Крупнов Алексей Геннадьевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, krupnov@list.ru

УДК 13, 31, 37

**ИНТЕРАКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫХ ДИСЦИПЛИН ВУЗА**

Т.А. Новолодская

Рассматривается проблема формирования коммуникативного пространства на основе интерактивных технологий обучения в системе социально-гуманитарного знания. Предлагаются эффективные способы построения как учебного, так и воспитательного процессов. Анализируются некоторые виды образовательных мероприятий с использованием Интернет-ресурсов и возможностей виртуального пространства. Объясняется их роль в развитии творческого потенциала студентов и преподавателей. Показано, что их применение в процессе образовательного дискурса помогает решить важные проблемы, стоящие перед высшей школой.

Ключевые слова: социально-гуманитарное знание, интерактивные технологии, виртуальное пространство, деловые игры, имитационные упражнения, метафора, интенциональное объяснение, экзистенциальная истина.

Введение

В основе активных методов обучения лежит диалогическое общение как между преподавателем и студентами, так и между самими студентами. В процессе диалога развиваются коммуникативные способности студентов, их умение решать проблемы коллективно, рассматривать различные точки зрения в процессе нахождения оптимального результата. Отсюда возникает естественный интерес к игровым формам обучения.

Первоначально игрой интересовались психологи и философы. В работах Ф. Ницше, Й. Хейзинги, Х.Г. Гадамера, Л. Витгенштейна игра становится существенной характеристикой человека, проникая во все сферы человеческой жизни.

Опираясь на идеи Хейзинги, Гадамера, Витгенштейна, современная наука активно использует игровые методы при выработке управленческих решений, при анализе нестандартных ситуаций. Интересный анализ использования игровых методов в различных сферах деятельности представлен в работах как отечественных исследователей, так и их зарубежных коллег [1–12]. Все авторы согласны с тем, что игровые методы позволяют участникам дискурса находить нетривиальные решения обсуждаемых проблем и наиболее полно проявить свои коммуникативные способности. В этих работах исследуется применение деловых игр в таких областях знания и деятельности, как экономика, управление, военное искусство, педагогика и психология.

И хотя философия одна из первых предложила свои варианты исследования игры как сферы бытия человека, в ее практическом образовательном стандарте игровые методы почти не рассматриваются. В настоящей работе предпринята попытка оценить эффективность игровых моделей в реализации образовательных стратегий в системе философского знания.

Деловая игра и метафора как средства обучения

Игровая форма соответствует логике социального взаимодействия, готовит ее участников к профессиональному общению. В деловых играх проводится имитационный эксперимент, в котором используется модель реального процесса, а не он сам. Исходным моментом развития всех игр (в том числе и деловых), которые можно рассматривать как модель сотрудничества и конфликта, является ролевая игра. Игра в шахматы – один из примеров ролевой игры. Затем возникли салонные, а позднее военные игры, которые в качестве прототипа имели шахматы [11].

Использование возможностей деловой игры при обсуждении проблем социально-гуманитарного знания обеспечивает, с одной стороны, активное общение участников игрового процесса, а с другой – позволяет это общение направить на более эффективное усвоение материала по предложенной тематике. Деловые игры служат также средством изучения правил и принципов логической культуры ведения дискуссий. Деловая игра стимулирует творческий поиск и умение работать в команде. Здесь выявляются не только интеллектуальные способности студентов, но и особенности их психологии. Они позволяют определить такие важные моменты, как: 1) уровень деловой активности; 2) наличие тактического и (или) стратегического мышления; 3) скорость адаптации в создавшихся условиях; 4) способность анализировать собственные возможности и выстраивать соответствующую линию поведения; 5) умение критически оценивать аргументы других людей и предвосхищать линию «атаки» со стороны оппонентов; 6) стиль поведения, ориентацию при принятии решений на игру «на себя» или «в интересах команды» и др.

В деловой игре каждый участник играет определенную роль. Например, обсуждается проблема, которая обозначена в курсе философии. Каждый участник игры «влезает в шкуру действующего лица» и предлагает аргументы, которые соответствуют взглядам выбранного мыслителя. Каждый известный философ, роль которого исполняет группа студентов, – это поистине Вселенная мыслителя, и поэтому здесь не просматривается возможность тривиального ответа на уровне закрытого режима диалога по схеме: «да»–«нет». При таком подходе следует учиться рефлексии – вхождению в мыслительную лабораторию выбранного «оригинала» и поиску необходимых аргументов для демонстрации его способов доказательства или опровержения.

Метод деловой игры удачно может быть применен в различных информационных средах – как в реальной студенческой аудитории, так и в виртуальном Интернет-семинаре, Интернет-конференции, Интернет-коллоквиуме и т.п. Ситуации, разыгрываемые в деловой игре, развивают творческие способности студентов, выступающих в роли философов и аналитиков. Здесь требуется не только знание материала первоисточников или принципиально возможных вариантов ответа, определяемых философскими предпочтениями выбранных оригиналов, но и умение их комментировать и грамотно защищать перед оппонентами.

В качестве примера конструктивности таких виртуальных игровых ситуаций, позволяющих эффективно решать весьма сложные научные проблемы, следует привести работу итальянского ученого, специалиста в области квантовой механики – Луиджи Аккарди. В своей книге [12] он предлагает обсуждение принципиальных вопросов квантовой механики в контексте мировой культуры. В качестве действующих лиц для своего «виртуального симпозиума» он выбирает известных ученых – физиков и философов (цитаты из их работ) и двух вымышленных персонажей. И получается интересный и поучительный дискурс. Особую роль при обсуждении научных проблем из области квантовой физики у него играет метафора «хамелеона». Важно, что она обретает право быть аргументом в научном выводе. Метафора «хамелеона», которую использует Аккарди, является не только оригинальным символом, но и моделью, описывающей сложные вероятностные процессы поведения квантовых объектов.

Следует отметить, что метафора в контексте социально-гуманитарных дисциплин имеет вообще особый статус. Следует вспомнить, что она являлась излюбленным аналитическим приемом у древнегреческого философа Платона. Так, суть гносеологических проблем удачно раскрывалась им с помощью метафоры «о пещере». Понимание смысла метафоры здесь идет через процедуру ее интерпретации. И всякий раз, читая этот текст, мы соотносим имеющиеся в тексте образы с теми интенциональными контекстами, которые и помогают осуществить их понимание.

Использование метафор в научном и образовательном дискурсе связано с выяснением особенностей компьютерной стратегии в этой сфере. Компьютерные коммуникации между агентами в процессе усвоения научной информации сталкиваются с необходимостью активного формирования гибридных областей науки, что выражается в цитированиях, заимствованиях методов из сопредельных дисциплин и использовании понятий – аналогов (они-то и выступают как метафоры). В то же время преодоление дисциплинарных границ сопряжено со стандартизацией форм представления знания. Текст начинает выполнять социально-коммуникативную функцию, которая обеспечивает либо метафорический, либо метонимический характер в отношениях между ним и контекстом. Коммуникационные структуры обеспечивают перемещение из одного контекста в другой, актуализируя скрытые аспекты кодирующей системы данного текста. И эти особенности коммуникативных функций текста, представленного в пространстве Интернета в ходе деловой игры, должны быть серьезно проанализированы и учтены.

Игровая модель обучения в социально-гуманитарном образовании

Здесь надо также отметить специфику социально-гуманитарного познания. Главной операцией постижения явлений в гуманистике является понимание, т.е. раскрытие их культурно-исторического смысла методами диалога, эмпатии (со-чувствия, со-переживания) и герменевтики. Что касается операции объяснения, то в этих науках она имеет свою особенность. Здесь объяснение ориентируется не на рациональность действия, а на мотивы и цели поступка. Такое объяснение получило название «интенционального объяснения». В интенциональном объяснении, имеющем форму практического силлогизма, посылки выражают интенцию субъекта, его желание достигнуть некоторой цели и осознание им средств достижения этой цели. Но интенция не является причиной действия. Одна и та же интенция способна приводить к различным действиям. Она отнюдь не вызывает определенного действия с той непреложностью, с которой причина вызывает следствие при необходимых условиях.

Социально-культурные феномены, хотя и являются предметом научного познания, тесно связаны с повседневностью. Они должны быть понятны тем, для кого предназначены. По этой причине в познавательной деятельности, имеющей дело с «жизненным миром» людей, необходимо опираться на их смыслополагание или раскрытие уже существующих для них смыслов, на постижение значения знаков, т.е. на интерпретацию. Аксиологическая наполненность смысложизненных поисков человека обращает социально-гуманитарное знание к экзистенциальной реальности, которая постигается на уровне экзистенциальной истины. Экзистенциальная истина сопричастна миру убеждений, верований, моральных импера-

тивов как отдельной личности, так и определенных человеческих коллективов. И эта экзистенциальная истина – своя для каждого человека и для каждого исторического времени. Нужно всегда помнить, что каждое время «говорит» и предъявляет себя на «своем языке». И этот момент важно не упустить при проведении деловой игры. Отношение к таким объектам обсуждения должно формироваться в коммуникативном пространстве возможных экзистенциальных смыслов. А виртуальная реальность Интернета здесь весьма удачно может «предоставить» свои когнитивные ресурсы.

Проведение деловой игры требует тщательной подготовки. Пропедевтика деловой игры предполагает следующие аналитические операции.

- Выбор темы и диагностика исходной ситуации. Темой игры может быть практически любой раздел учебного курса. Желательно, чтобы учебный материал имел практический выход либо на решение важных смысложизненных проблем, либо на определенные проблемы из области профессиональной деятельности будущих специалистов.
- Формирование целей и задач не только с учетом темы, но и согласно исходной ситуации. Нужно построить игру на основе определенной целевой установки и в контексте заданной исходной ситуации.
- Диагностика «игровых» качеств (психологических, интеллектуальных, коммуникабельных) участников деловой игры.

В использовании метода деловой игры можно отметить положительные и отрицательные моменты. Положительным моментом в применении деловых игр являются высокая мотивация, эмоциональная насыщенность процесса обучения, активность всех ее участников. В ее процессе формируются знания и умения студентов, а послеигровое обсуждение способствует закреплению этих знаний.

Отрицательным моментом является высокая трудоемкость подготовки к занятию как для преподавателя, так и студентов. Если игра проходит в виртуальном пространстве Интернета, да еще в режиме онлайн, то необходимо, чтобы все участники игры могли там присутствовать.

Надо отметить, что одна из важных процедур в организации игры – выработка правил игры. Она начинается с общей установки, которую дает преподаватель. Принятые правила не меняются до конца игры, и все участники им подчиняются. В компетенции студентов находится выработка правил, связанных с оцениванием степени участия каждого из них в совместной игровой деятельности, установление контроля за ее ходом, а также соблюдение участниками этических правил. Но эти компетенции студентов не отменяют оценочной деятельности и самого преподавателя.

Ролевая игра идет в быстром темпе, развивая импровизационное мышление игроков. Ее цель – активизировать участников игры, пробудить в них творческие силы, сблизить друг с другом. При распределении ролей ни в коем случае не стоит руководствоваться принципом «разбавления более сильных студентов более слабыми», чтобы не создать дополнительный дискомфорт в группе. Но при этом следует предотвратить и процесс превращения деловой группы в дружескую компанию. Завершающий этап должен показать, достигнута ли главная цель организаторов игры – ощутили ли игроки себя «реальными участниками», т.е. побывали ли в том духовном космосе, который характерен для его «оригиналов».

Экспертам также предлагается своя «игра по правилам», только эти правила могут варьироваться в зависимости от целевой установки, – т.е. того, что требуется получить на выходе. Тут могут быть использованы различные оценочные критерии.

Во-первых, оцениваться может «чистота игрового эксперимента», которая предполагает оценивать только адекватную выбранному «оригиналу» аргументацию и не допускать обращения за поддержкой к более поздним научным открытиям и их авторам.

Во-вторых, учитывается не столько «чистота авторской аргументации», сколько использование «авторских мировоззренческих и методологических приоритетов» для демонстрации их актуальности в контексте современных научных практик.

В-третьих, рассматриваются, главным образом, навыки логической культуры ведения дискурса. Эти требования сопровождают любой вид дискурса независимо от его целевых установок. Владение навыками логической культуры позволит студентам достойно выглядеть в профессиональной и культурной среде.

Опыт, полученный в игре, может оказаться даже более продуктивным в сравнении с приобретенным в процессе традиционного обучения [13]. Он позволяет самому студенту участвовать в рождении коллективного «когнитивного трансформера» и оценить собственные творческие способности на этом захватывающем и интересном поприще. Коллективные обсуждения дают возможность спрогнозировать последствия принятия тех или иных решений и рекомендаций в контексте выбранных философских парадигм. Педагогическая суть деловой игры – активизировать мышление студентов, повысить самостоятельность будущего специалиста, внести дух творчества в обучение, помочь ему находить самостоятельные ответы на нетривиальные жизненные и научные проблемы. Если главным вопросом в проблемном обучении выступает «почему», то в деловой игре – «что было бы, если бы...».

Прежде, чем приступить к использованию деловой игры в учебном процессе, рекомендуется начинать с имитационных упражнений. Они отличаются меньшим объемом и ограниченностью решаемых задач. Имитационные упражнения ближе к учебным играм. Их цель – предоставить студентам возмож-

ность в творческой обстановке закрепить те или иные навыки, акцентировать внимание на каком-либо важном понятии, категории, законе. В условии должно содержаться обязательное противоречие, т.е. в имитационном упражнении есть элемент проблемности.

После имитационных упражнений можно переходить к деловым играм. В учебном процессе вуза – это, скорее, ролевая игра. Игровые ситуации позволяют сфокусировать внимание на тех проблемах, которые несут в своем понятийном изложении противоречивые ценностные установки и способы разрешения. Ценности в контексте таких тем, как «Личность в ее поисках смысла жизни и своего места в обществе», «Человек как индивид и гражданин», «Аналитика любви в творчестве философов и писателей» (например, у З. Фрейда, Э. Фромма, Ф.М. Достоевского и В.С. Соловьева) – это демонстрация поливариантности человеческого бытия, его философских ориентаций в мире и себе.

Любая информационная среда предоставляет человеку возможность получения необходимых для него сведений, гипотез, теорий и пр. Умение же получать информацию и преобразовывать ее необходимо воспитывать, вырабатывать, оно приобретается в процессе обучения. Для формирования необходимой культуры работы с информационными потоками требуется определенный личностный характер, способный выработать в себе эти навыки и умения. С одной стороны, речь должна идти о воспитании таких свойств личности, как самостоятельность, инициативность, коммуникабельность, уверенность в своих действиях, т.е. тех, которые в большей мере востребованы происходящими технологическими и информационными процессами. Вместе с тем воспитание в большей степени должно ориентироваться на возможность сохранения и развития индивидуальных схем поведения. Возвращаясь к античному идеалу образования, вспомним, что целью должно являться не формирование узкого специалиста, а становление разносторонне развитого человека. А для этого необходим более комплексный подход в гуманитарном образовании, который как раз и может обеспечить Интернет. И здесь очень важно осознать роль искусства для развития мыслящего человека.

В системе образования с использованием компьютерных средств следует оценить возможности кино. Кино – синтетическое искусство, где совмещаются образ и звук, где много хорошей музыки, в том числе и классической. Именно через кино студенту будет легче войти в круг тех проблем, которые обсуждаются в литературе и философии. Обсуждение фильма – очень важный момент для преподавания, поскольку здесь студенты привыкают не только излагать, но и отстаивать свою точку зрения на данную проблему. Преподаватель становится просто необходимым при решении студентом и обратной задачи: самостоятельно, используя ресурсы Интернета, подобрать образы, раскрывающие содержание той или иной конкретной темы. Например, для раскрытия темы: «Истина как гносеологическая ценность и как экзистенциальный императив» можно предложить студентам фильм А. Тарковского «Солярис» (по произведению С. Лема) и предложить им найти кинематографические образы (символы), раскрывающие данную тему. В таких заданиях Интернет не отчуждает студентов и преподавателя, а, наоборот, способствует их более тесному общению.

Для организации эффективной самостоятельной работы студентов над темами учебного курса можно использовать и такой интерактивный продукт, как виртуальная лаборатория. Решение проблем создания таких лабораторий совместными усилиями преподавателей и студентов – еще один способ формирования коммуникативного пространства, где преобладают неформальные образцы профессионального дискурса. А старшекурсники осознают свою причастность к тем новым образовательным процессам, которые формируются в альма-матер при их творческом участии. В этом состоит и реализация воспитательной функции в условиях высшей школы.

Заключение

Подводя итоги проведенному исследованию интерактивных технологий, обеспечивающих конструктивность образовательного дискурса, можно констатировать следующие положения.

- Методы деловой игры с использованием Интернет-ресурсов, оказываются тем оселком, на котором можно проверить не только знания студентов, но и их личностные качества. У преподавателя появляется возможность индивидуального подхода к своим студентам.
- Философские проблемы еще в античности обсуждались в процессе дискурса. Интернет-ресурсы предоставляют широкие возможности для возрождения этой творческой традиции, а игровые методы дают шанс преодолеть стереотипы современного рационализма и научиться иным способам постижения мира и себя в мире.
- Через предложенные образовательные компетенции игра проникает в пространство серьезного, позволяет понять возможность существования альтернативных истин в контексте и научного и обыденного познания.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы), государственный контракт № П2415 от 18 ноября 2009 г.).

Литература

1. Васин А.А. Некооперативные игры в природе и обществе. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 412 с.
2. Вачугов Д.Д., Веснин В.Р., Кислякова Н.В. Практикум по менеджменту. Деловые игры. – М.: Высшая школа, 2004. – 192 с.
3. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.
4. Гуревич А.М. Рольевые игры и кейсы в бизнес-тренингах. – СПб: Речь, 2006. – 140 с.
5. Джексон П. 58 1/2 импровизаций на тренинге. – Минск: Бегин групп, 2004. – 152 с.
6. Евграфов П.М., Глуховенко Ю.М. Ноу-хау обучающих программ и деловые игры. – М.: АРС, 2004. – 222 с.
7. Ньюстром Дж., Скэннел Э. Деловые игры и современный бизнес. – М.: Бином, 1998. – 139 с.
8. Оуэн Г. Теория игр. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 230 с.
9. Плешакова М.В. Деловые игры в экономике. Методология и практика. – М.: КноРус, 2008. – 240 с.
10. Резник С.Д., Игошина И.А., Кухарев К. Организационное поведение. Практикум. Деловые игры, тесты, конкретные ситуации. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 256 с.
11. Дынина Н.В., Матинова Т.А., Тамберг О.А. Учебные кейсы и деловые игры в ходе научно-педагогической практики магистров. Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии // Научно-практический журнал. – 2009. – № 1. – С. 42.
12. Аккарди Л. Диалоги о квантовой механике. Гейзенберг, Фейнман, Академус, Кандидо и хамелеон на ветке. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 448 с.
13. Потеев М.И., Хлопотов М.В. Методика подготовки будущих инженеров специальности «Информационные технологии в образовании» к проектной деятельности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 45. – С. 3–10.

Новолодская Татьяна Алексеевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат философских наук, доцент, m_nov_Lodn@mail.ru

УДК 338.4

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ
ПРОДВИЖЕНИЯ УСЛУГ НА РЫНКЕ**

О.А. Цуканова

Рассматривается проблема продвижения рекламно-издательских услуг на рынке. Предлагается комплекс мероприятий по эффективному продвижению данного вида деловых услуг на рынке с использованием различных инструментов с целью увеличения объема сбыта продукции продуцентов рекламно-издательских услуг, а также повышения имиджа предприятия в обществе.

Ключевые слова: личные продажи, реклама, рекламно-издательские услуги, продвижение, стимулирование сбыта.

Введение

Продвижение представляет собой совокупность разнообразных методов и инструментов, позволяющих эффективно вывести товар (услугу) на рынок, стимулировать его продажи и создать устойчивый круг лояльных фирме покупателей. Реализация указанных задач осуществляется с помощью инструментов маркетинговых коммуникаций, а именно: реклама – любая платная форма неличного представления и продвижения идей или товаров; стимулирование сбыта – кратковременные побудительные поощрения покупки или продажи товара; пропаганда – неличное и неоплачиваемое продвижение товара посредством распространения о нем коммерчески важных сведений в печатных средствах информации или благожелательного представления по радио, телевидению или со сцены; личные продажи – устное представление товара в ходе беседы с одним или несколькими потенциальными покупателями с целью совершения запродажи [1], представительство в сети Интернет, которое может рассматриваться как дополнительный информационный рекламный носитель, а также как более сложная модель взаимодействия с покупателями в виде Интернет-магазина.

Для эффективного продвижения товаров и услуг на рынке необходимо рациональное сочетание всех перечисленных инструментов. При этом для каждого отдельного вида услуг и товаров следует разрабатывать свой комплекс мероприятий по доведению продукции до потребителя.

Цель статьи – предложить комплекс мероприятий по продвижению рекламно-издательских услуг на рынке с целью их оперативного и результативного доведения до потребителя.

Использование инструментов продвижения рекламно-издательских услуг на рынке

Наиболее эффективным средством продвижения в сфере деловых услуг являются личные продажи. При этом для повышения эффективности продвижения товаров и услуг данные мероприятия необходимо подкреплять рекламными кампаниями и стимулированием сбыта.

Таким образом, значительную роль в процессе функционирования рекламно-издательского хозяйствующего субъекта играет рационально организованное продвижение товаров и услуг при помощи личных продаж. При этом возникает необходимость стимулировать персонал и мотивировать торговых представителей предприятия на проявление энтузиазма в реализации стратегии достижения намеченных показателей хозяйственной деятельности. Руководство предприятия должно тщательно подходить к разработке и применению стимулов как материального характера, таких как повышение оклада, процента от продаж, выплата премий за отличную работу, награждение ценными подарками, так и нематериального характера – упоминание фамилий особо отличившихся сотрудников, перевод внештатных кадров в штат организационно-правовой структуры, продвижение по карьерной лестнице. Одним из условий социально-экономического роста предприятия может послужить создание отдела повышения квалификации кадров, которое необходимо в условиях динамично меняющейся внешней среды.

В целом личные продажи значительно способствуют осуществлению маркетинга взаимодействия между производителем деловых услуг и потребителем, налаживанию долгосрочных связей между контрагентами [2].

Среди требований, предъявляемых к сотрудникам, занятым в сфере оказания услуг по размещению рекламы, можно отметить обладание следующими навыками: эффективно управлять временем, производительностью труда и потенциальным доходом; убедительно говорить на деловых встречах, брать на себя инициативу в представлении интересов покупателя в ситуациях, способствующих продажам; обладать гибкостью, с готовностью встречать проблемы, менять планы и методы работы; анализировать причины и поводы негативной реакции потребителей; развивать четкую ориентацию к профессиональному росту и росту доходов; быть настроенным на разрешение человеческих проблем; творчески разбивать стандартные подходы и стереотипы решения, искать уязвимые места в сопротивлении продажам и эффективно использовать их.

Главным критерием качества работы всех сотрудников является достижение плановых показателей, отражающих прогресс стратегии. Для рационализации работы рекламных агентов целесообразно определить планы выработки как по реализации услуг в рамках строго привычного ассортимента, так и по новой продукции. В целом, в основе политики стимулирования и вознаграждения лежит соответствие трудовых показателей стратегическим целям хозяйствующего субъекта. Стимулирование рекламных агентов должно зависеть от качества выполнения ими своих обязанностей, среди которых можно отметить следующие: привлечение новых рекламодателей; работа со старыми клиентами, проведение переговоров по продлению сотрудничества; контроль наличия материалов для изготовления макетов рекламы; контроль по срокам оплаты контрактов, выставлению счетов и иных бухгалтерских документов [3].

Субъекту управления предприятием необходимо уделять достаточно внимания не только поощрению старых сотрудников, но и привлечению новых кадров. При этом целесообразно принимать только тех кандидатов, которые продемонстрировали желание и приверженность данному виду деятельности, организовывать обучение принятых работников, оказывать помощь молодым сотрудникам на начальном периоде работы, создавая, таким образом, условия для комфортного труда. Большое внимание должно также уделяться составлению наиболее оптимального штатного расписания сотрудников предприятия, эффективного использования фонда оплаты труда [4].

Высокая результативность личных продаж в сфере деловых услуг, в частности, рекламно-издательских, невозможна без проведения периодических рекламных кампаний, мероприятий по стимулированию сбыта и пропаганды, направленных, в первую очередь, на повышение имиджа производителя.

Особенности рекламной кампании изменяются в зависимости от стадии жизненного цикла товара или услуги. Так, на этапе вывода новых изданий на рынок целесообразно поставить задачу завоевать долю рынка, создать определенный уровень осведомленности о новинке. На более поздних этапах рекламные стратегии приобретают долгосрочные цели, связанные преимущественно с наращиванием марочного капитала и увеличением объема продаж в будущем. Хорошо известная как на отечественном, так и зарубежных рынках марка продуцента услуг позволит проводить более выгодную ценовую политику по сравнению с конкурентами; поддерживать запланированный уровень продаж товаров и услуг, используя лояльность потребителей; обеспечить повышение объема сбыта путем расширения ассортимента товаров и услуг.

В сфере рекламно-издательских услуг можно выделить такие виды приверженности марки производителя, как:

- приверженность для самоутверждения (размещение рекламы в элитных изданиях, ориентированных на сегменты потребителей с высокой покупательской способностью);
- дифференцированная приверженность, связанная с осознанными и уникальными характеристиками услуги и/или сопутствующего товара (реклама в узкоспециализированном издании);
- приверженность в силу невыгодности перехода на использование аналогичного комплекса услуг другого продуцента (данный тип приверженности связан со скидками и льготными условиями, предоставляемыми постоянным клиентам).

Целесообразным станет проведение широкой рекламной кампании для рекламно-издательских хозяйствующих субъектов. Наиболее эффективной может стать реклама в прессе, наружная реклама и Интернет-реклама – как текстовая, так и баннерная. Реклама в печатных изданиях быстрой периодики имеет гибкие возможности в плане использования цвета, размеров объявлений, вкладок и купонов, а также определенную степень избирательности аудитории, и при этом по сравнению с другими медианосителями упрощается оценка откликов на рекламу. Реклама в прессе медленной периодики носит в большей степени имиджевый характер, обладает способностью длительного воздействия на потребителя.

Для увеличения охвата аудитории целесообразно часть средств рекламной кампании выделить на наружную рекламу, обладающую следующими преимуществами: обеспечение контакта с большим количеством населения при низкой стоимости и высокой частоте; возможность создания ярких, запоминающихся рекламных объявлений. Наружная реклама является одним из самых гибких и адаптивных способов рекламы, объединяя в себе положительные качества рекламы на телевидении, радио и в местах совершения покупки. В целом в качестве маркетинговых целей, устанавливаемых перед наружной рекламой, можно отметить: напоминание потребителям о товаре, марке, предприятию; быстрое создание осведомленности о новых товарах; поддержание и усиление индивидуальности и идентичности существующих товаров и услуг; локализованный подход к потребителям в рамках географического сегментирования; последовательное рекламное продвижение товаров посредством продолжения основных рекламных идей в новом формате; стимулирование заказов по телефону и Интернет.

Вместе с тем целесообразно в качестве рекламоносителя широко использовать сеть Интернет. Эффективность интернет-рекламы на современном этапе обусловлена следующими причинами:

- Интернет-аудитория быстро увеличивается;
- значительная часть пользователей сети быстро воспринимает информацию о товарах-новинках;
- грамотно размещенная Интернет-реклама не производит резкого негативного воздействия на пользователей;

- количество предприятий, имеющих собственный сайт, значительно увеличилось на современном этапе. При этом сайт хозяйствующего субъекта можно рассматривать как дополнительное средство рекламы;
- существуют различные способы оплаты рекламы в Интернете в зависимости от поставленных целей предприятия;
- в сети есть возможность детально анализировать актуальную для рекламодателя информацию о посетителях;
- в Интернете можно сегментировать потенциальных клиентов по различным характеристикам;
- существует возможность пользоваться услугами баннерообменных сетей. Стоимость размещения рекламы через баннерные сети значительно ниже, чем при размещении баннеров напрямую на определенных ресурсах.

Таким образом, Интернет как носитель рекламы сочетает в себе все преимущества традиционных медианосителей, но при этом предоставляет ряд преимуществ с точки зрения как рекламоспособности, так и стоимости услуг по размещению рекламы.

Показатели рекламоспособности каждого медиа должны быть сбалансированы в соответствии с требованиями установленного бюджета. При этом целесообразно совмещать недорогие средства информации, обеспечивающие эффективность по издержкам, со средствами, обладающими наибольшими возможностями передачи ключевого обращения и охвата перспективных потенциальных покупателей, т.е. обеспечивающими результативность. При этом поиск оптимальных комбинаций способов коммуникаций, которые позволяли бы наилучшим образом охватить потенциальных покупателей, должен вестись непрерывно. Хозяйствующий субъект при выборе тех или иных средств коммуникации руководствуется рядом правил:

- в условиях растущего рынка целесообразно выделять значительную долю средств от объема продаж на рекламу;
- производители товаров долгосрочного пользования, а также дорогих товаров и услуг должны обеспечить известность своих торговых марок и долгосрочную рекламную кампанию;
- чем выше воспринимаемое качество торговой марки в товарной категории, тем больший процент от выручки тратится на рекламу;
- при росте числа конкурентов предприятие вынуждено увеличивать расходы на рекламу и мероприятия по стимулированию сбыта.

При выборе конкретных медианосителей продуцентам услуг необходимо ориентироваться на то, что рекламная компания должна быть достаточно продолжительной и равномерной для формирования устойчивых предпочтений у потребителей к изданиям данного хозяйствующего субъекта.

На практике установлено, что максимальная осведомленность аудитории достигается после 20 недель рекламной кампании, после чего ее эффект снижается [3]. Таким образом, длительность рекламной кампании рекламно-издательского хозяйствующего субъекта должна быть не менее 22 недель.

При подготовке рекламной кампании производителям рекламно-издательских услуг необходимо руководствоваться основными принципами сервисной рекламы:

- демонстрация материальных объектов, т.е. использование рекомендаций и благодарностей пользователей услуги (в качестве таковых могут послужить положительные отзывы рекламодателей об эффективности рекламы в том или ином объекте прессы);
- демонстрация высокой квалификации сотрудников предприятия, так как качество услуги во многом зависит от персонала и взаимодействия между продуцентом и потребителем;
- упор на качество и эффективность услуг [5].

Полезным инструментом для улучшения эффекта рекламы могут стать мероприятия по связям с общественностью (пропаганда), которые позволят предприятию и его потребителям взаимно адаптироваться друг к другу. Пропаганда включает в себя использование редакционного, а не платного места и времени во всех средствах распространения информации для решения конкретной задачи – способствовать достижению поставленных хозяйствующим субъектом целей.

В целом реклама направлена на повышение долгосрочной предпочтительности к торговой марке, в то время как мероприятия по стимулированию сбыта используются в качестве инструмента краткосрочного увеличения продаж и сглаживания циклических и сезонных колебаний спроса. Для стимулирования сбыта услуг рекламно-издательским хозяйствующим субъектом могут быть осуществлены следующие мероприятия:

- организация конкурсов среди рекламодателей, по результатам которых организационно-правовые структуры получают подарки и сувениры от издателя. При этом призы должны быть логично взаимосвязаны как с целевым рынком, так и продвигаемой услугой или товаром, представлять ценность для потребителей, по стоимости быть на уровне подарков конкурирующих организационно-правовых структур;
- предоставление в периоды циклических и сезонных падений спроса на услуги рекламно-издательского предприятия скидок и бонусов, способствующих увеличению объема реализуемых товаров и услуг.

В качестве подарков могут использоваться различные товары или дополнительные услуги, но главным ориентиром стимулирования является взаимосвязь с общими целями маркетинга, а также обоснованность дополнительных инвестиций. В целом подарки должны обладать высоким качеством (у потребителей всегда возникают ассоциации между качеством подарка и основного товара или услуги), достаточной популярностью, эксклюзивностью (подарок должен быть уникален для той категории товаров или услуг, вместе с которыми он распространяется).

Наряду с этим при планировании мероприятий по повышению экономической результативности нужно учитывать результаты опроса потребителей, отражающего их реальные потребности и ожидания.

В целом все действия по стимулированию сбыта должны быть направлены на защиту доли рынка от уменьшения, стимулирования приобретения услуг данной организационно-правовой структуры, поддержку и усиление рекламной кампании, расширение дистрибуции изданий розничными торговцами.

Одним из современных способов продвижения товаров и услуг следует считать использование возможностей Интернет, создание своего представительства в сети. Рекламно-издательские предприятия на современном этапе широко используют такую возможность, создавая электронные версии печатных изданий, привлекая тем самым к своей продукции клиентов, в частности, новые географические и демографические сегменты потребителей.

Заключение

В работе автором предложены способы продвижения рекламно-издательских услуг на рынке. Можно отметить, что доведение деловых услуг до потребителей невозможно без сочетания всех инструментов продвижения. Наиболее эффективным инструментом продвижения деловых услуг следует считать личные продажи, результативность которых всецело определяет эффективность функционирования предприятия-производителя услуг. Для роста результативности личных продаж, повышения имиджа предприятия в обществе необходимо проведение рекламных кампаний и пропаганды. Стимулирование сбыта в сфере деловых услуг также значительно содействует результативности личных продаж и доведения продукции до потребителей.

Литература

1. Багиев Г.Л., Тарасевич В.М., Анн Х. Маркетинг. – СПб: Питер, 2006. – 718 с.
2. Цуканова О.А., Варзунов А.В. Концептуальные положения управления процессом повышения экономической результативности деятельности рекламно-издательского комплекса мегаполиса // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3(67). – С. 107–114.
3. Бузин В.Н. Основы медиапланирования: Курс лекций. – М.: Межд. институт рекламы, 2002. – 208 с.
4. Цуканова О.А. Формирование системы стратегического управления социально-экономическим развитием производителей рекламно-издательских услуг в мегаполисе. Монография. – СПб: Герда, 2010. – 188 с.
5. Николайчук Н.Е. Маркетинг и менеджмент услуг. Деловой сервис. – СПб: Питер, 2005. – 608 с.

Цуканова Ольга Анатольевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, доцент, zoa1999@mail.ru

УДК 334.02

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ИСПОЛНЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ ЗАПИСОК ДЛЯ КОМПАНИИ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГ»

Д.Э. Курочкин

Рассматривается управленческая задача оптимизации механизма учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники нормативно-справочной информации, возникшая в рамках реализации Стратегии информатизации ОАО «Газпром» в процессе создания информационно-управляющей системы SAP R/3 для дочерней компании ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург». Эффективное управление нормативно-справочной информацией, являющейся информационным ядром любой информационно-управляющей системы, требует от механизма учета служебных записок на ее изменение безукоризненной реализации. Актуальность проекта обусловлена недостаточной развитостью существующего механизма учета служебных записок и множеством проблем, с которыми сталкиваются инициаторы и исполнители служебных записок в процессе выполнения своих должностных обязанностей. Для эффективного решения задачи была разработана корпоративная распределенная система учета служебных записок.

Ключевые слова: оптимизация бизнес-процессов, управление нормативно-справочной информацией, учет служебных записок, стратегия информатизации, разработка программного обеспечения.

Введение

Для эффективной работы, обеспечения конкурентоспособности и развития крупного современного предприятия важны не только правильно построенные бизнес-процессы, стратегия развития предприятия, но и способная удовлетворять их потребности информационная инфраструктура (ИТ-инфраструктура), представляющая собой комплекс технологических и программных средств, соответствующих бизнес-стратегии предприятия.

Естественное увеличение количественных и качественных требований к ИТ-инфраструктуре приводит к необходимости ее модернизации.

Конечной целью проекта модернизации, охватывающего как оборудование, так и программное обеспечение, является создание гибкой и масштабируемой инфраструктуры, позволяющей компании значительно повысить эффективность управления и получить необходимые инструменты для выхода на лидирующие позиции в своей отрасли [1].

Конкурентоспособность компаний, действующих в энергетическом секторе, также находится в прямой зависимости от эффективного использования преимуществ информационных технологий (ИТ). В связи с этим в настоящее время многие российские и зарубежные компании энергетического сектора усердно работают над проектами модернизаций своих инфраструктур. Так, на предприятии ОАО «Газпром» в 2008 г. была принята Стратегия информатизации компании. Стратегия определяет ключевые направления развития в компании ИТ, обеспечивающих достижение стратегических целей ОАО «Газпром» и его дочерних компаний [3].

В рамках реализации Стратегии информатизации ОАО «Газпром» в процессе создания информационно-управляющей системы (ИУС) SAP R/3 для дочерней компании ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург» возникает необходимость создания дополнительного программного обеспечения предназначенного для эффективной реализации бизнес-процессов инициации и исполнения служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники нормативно-справочной информации (НСИ).

Сотрудники подразделений компании ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург» работают с НСИ посредством информационных систем и в силу специфики бизнеса регулярно оформляют служебные записки с запросами на внесение изменений в справочники НСИ, которые обрабатываются администраторами справочников.

Эффективное управление НСИ, являющейся информационным ядром любой ИУС, требует от механизма учета служебных записок на ее изменение безукоризненной реализации.

Актуальность проекта обусловлена недостаточной развитостью существующего механизма учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники НСИ и множеством проблем, с которыми сталкиваются инициаторы и исполнители служебных записок в ходе выполнения своих должностных обязанностей.

Учет служебных записок осуществляется с помощью функциональных возможностей системы Helpdesk, которая выступает в роли системы регистрации служебных записок и управления их жизненным циклом. Логика данного приложения предполагает инициацию заявки с запросом на внесение изменений в справочники НСИ с прикреплением .doc файла, содержащего текст служебной записки, сформированный инициатором на основе регламентированного шаблона справочника НСИ. Однако сами шаблоны служебных записок не хранятся в системе, а расположены на различных локальных носителях информации пользователей, и, как показывает практика, многие из данных шаблонов не соответствуют регламенту. Кроме этого, служебные записки, сформированные подобным образом, не исключают вероятности неправильно заполненных реквизитов заявки ввиду отсутствия механизмов проверки на валидность.

Постановка задачи

Для обеспечения эффективной реализации бизнес-процессов инициации и исполнения служебных записок все подразделения компании должны работать в едином информационном пространстве, с едиными информационными массивами. Удовлетворить перечисленным требованиям может только распределенное приложение, возможная структура которого приведена на рис. 1.

В распределенном приложении все пользователи системы – сотрудники аппарата управления и филиалов компании – взаимодействуют с базой данных (БД) через единый пакет прикладных программ. В таком приложении необходимо максимально разгрузить рабочие станции и основную функциональность перенести на корпоративный сервер. В идеале рабочие станции должны быть «пустыми», т.е. не иметь устанавливаемых элементов прикладных программ. Поскольку инициатором служебной записки может стать практически любой сотрудник компании и вне зависимости от имеющегося у него компьютера и операционной системы, он должен получить возможность оформить служебную записку с запросом на внесение изменений в справочники НСИ, а также получить доступ к определенным массивам информации в БД данных. При этом Web-интерфейс системы должен быть предельно простым и доступным для воспроизведения с помощью максимально широкого диапазона обзревателей.



Рис. 1. Структура распределенного приложения

В результате анализа бизнес-процессов компании ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург» в области учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники НСИ были определены основные требования к разрабатываемому программному продукту:

- оперативность передачи и исполнения служебных записок;
- получение удобных средств контроля исполнения служебных записок и поиска нужных сведений;
- реализация механизма обмена информацией только посредством БД;
- исключение возможности некорректного заполнения служебной записки;
- получение возможности просмотра графических отчетов о ходе работы группы ведения НСИ.

Основной результат

На основании выявленных функциональных требований была разработана корпоративная распределенная система учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники НСИ.

Структура корпоративной распределенной системы состоит из двух частей – клиентской и административной (рис. 2). Клиентская часть приложения основана на трехзвенной архитектуре «клиент – сервер приложений – сервер БД», реализованной в виде Web-приложения с помощью технологии Microsoft .Net и Web-сервисов на языке С#. Административная часть основана на клиент-серверной архитектуре, реализованной в виде Windows-приложения на языке Delphi, с целью освобождения сервера от обработки больших массивов данных.



Рис. 2. Структура корпоративной распределенной системы учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники НСИ

Сотрудники подразделений компании (инициаторы служебных записок) взаимодействуют с группой ведения НСИ (администраторы справочников – исполнители служебных записок) через корпоративное Web-приложение. Инициатор может оформить служебную записку с запросом на внесение изменений в справочники НСИ, выбрав из списка необходимый справочник и заполнив определенные реквизиты служебной записки. После успешного оформления происходит автоматическое оповещение администратора справочника о поступлении новой служебной записки. С помощью административной части корпоративной системы администратор просматривает оформленную служебную записку и подтверждает ввод ее реквизитов в заявленную информационную систему компании.

Основные задачи, решаемые приложением:

- Автоматическая идентификация пользователей посредством анализа данных из LDAP-совместимой интеллектуальной службы каталогов Active Directory. Данная служба не только ускоряет процедуру оформления заявки, но также предоставляет информацию об объектах, позволяет организовывать объекты, управлять доступом к ним, а также устанавливает правила безопасности, исключая анонимный доступ к системе, а также запуск приложения от имени пользователя, не зарегистрированного в LDAP или не прошедшего Windows-аутентификацию;
- Предоставление пользователям списка справочников НСИ ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»;
- Формирование служебной записки с запросом на внесение изменений в справочники НСИ;
- Проверка на валидность заполняемой информации;
- Предоставление пользователям возможности контроля исполнения служебных записок путем автоматического оповещения инициатора заявки по почте и отображения информации в специальном реестре служебных записок, доступном через распределенное приложение;
- Предоставление пользователям и администраторам справочников возможности просмотра текста служебной записки в виде документа Microsoft Word с последующей возможностью печати и сохранения документа;
- Предоставление пользователям возможности передачи электронной версии документа-основания в различных форматах (.doc, .xls, .pdf, .jpg, .rar, .zip) вместе со служебной запиской с запросом на внесение изменений в справочники НСИ;
- Оперативный поиск служебных записок;
- Получение возможности просмотра графических отчетов о ходе работы группы ведения НСИ.

Использование передовых методов предметной области

Для решения задач проекта разработки и внедрения корпоративной распределенной системы использовалась современная методология системного анализа и моделирования. Цель данной методологии заключается в регламентации процесса проектирования ИС и обеспечении управления этим процессом с тем, чтобы гарантировать выполнение требований как к самой ИС, так и к этапам процесса разработки [2].

Управление проектом

В соответствии с современной методологией анализа и моделирования процесс создания системы был разделен на ряд этапов (стадий), ограниченных некоторыми временными рамками и заканчивающихся выпуском конкретного продукта (моделей, программных продуктов, документации и т.д.) [2].

Перечислим основные этапы создания корпоративной распределенной системы: формирование требований к системе, проектирование, реализация, тестирование, ввод в опытно-промышленную эксплуатацию, сопровождение.

Заключение

Корпоративная распределенная система учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники НСИ позволила компании ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург» значительно повысить эффективность управления нормативно-справочной информацией, получить удобные средства инициации и исполнения служебных записок на ее изменения, обеспечивающие снижение среднего фактического времени инициации одной служебной записки на 15 мин. и времени на исполнение служебной записки на 10 мин., поиск необходимых сведений, а также контроль работы группы ведения НСИ.

Разработанная система полностью удовлетворяет требованиям компании в области учета служебных записок с запросами на внесение изменений в справочники НСИ, требованиям инициаторов и исполнителей служебных записок, а также системным требованиям и имеет механизм взаимодействия с внедряемой на предприятии информационно-управляющей системой SAP R/3.

Система не требует высокостоймостного серверного оборудования и эффективно функционирует на виртуальной машине. Существующие каналы связи с территориально удаленными филиалами позволяют осуществлять передачу данных от клиента к серверу приложений и в обратном направлении в среднем за 15 секунд.

Корпоративная распределенная система является гибкой, эффективной по критерию использованных ресурсов и масштабируемой информационной системой. Все, что требуется для повышения пропускной способности такой системы, – это приобретение дополнительного аппаратного обеспечения.

В перспективах развития системы значится:

- увеличение количества справочников, на изменение которых можно оформить служебную записку;
- создание интерфейсов системы для приема служебных записок на доработку существующих информационных систем компании ООО «Газпром Трансгаз Санкт-Петербург».

В настоящее время в соответствии с календарным планом система внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию.

Литература

1. Официальный сайт компании Ти Ай Системс. Модернизация ИТ-инфраструктуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti-systems.ru/services/upgrade.aspx>, свободный. – Загл. с экрана.
2. Грекул В.И. Проектирование информационных систем: Курс лекций. Учебное пособие / В.И. Грекул, Г.Н. Денищенко, Н.Л. Коровкина. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – С. 18–19.
3. Литвиненко О.А. Концептуальные аспекты системы управления информатизацией предприятия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1(71). – С. 120–123.

Курочкин Дмитрий Эдуардович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, d.e.kurochkin@gmail.com

УДК 93/94:67-05

**СТАНОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
В РОССИИ В 1905–1917 г.г.**

А.В. Орлов

Рассматриваются проблемы становления оптической промышленности в дореволюционной России. Выясняются главные трудности на пути развития этой индустрии. Отмечаются особенности государственной политики в названной области, зависимость национального развития от ведомственного потребления оптических приборов и инструментов. Работа рассчитана на всех, кто интересуется историей отечественного оптического производства и связанных с ним социальных процессов.

Ключевые слова: промышленное развитие, оптическое производство, государственная политика, социальные процессы.

В рамках коллективного исследования по проблеме «Зарождение и становление в России оптической науки и промышленности (конец XIX – начало XX в.в.): государственная политика, социальные результаты, историческая репрезентация» уже опубликованы две авторские работы [1, 2].

Становление оптической индустрии происходило в дореволюционной России при весьма сложных условиях. А именно:

1. преобладающий импорт оптических изделий;
2. узковедомственный подход к развитию оптической отрасли и односторонний характер самого развития;
3. осознание допущенных ошибок и выявление проблем развития отечественного оптического производства в условиях мировой войны 1914–1918 г.г.

Проблема массового производства оптических приборов и инструментов долгое время оставалась наиболее острой. В этом вопросе сказывалась и цена производства, с точки зрения себестоимости и сбыта, и отсутствие ограничений на ввоз оптических изделий, и чрезвычайно трудная для российских производителей конкуренция с германскими фирмами.

Общее состояние оптико-механической промышленности в начале XX в. к настоящему времени выяснено благодаря работам еще советского периода [3, С. 27; 4, С. 59]. Однако именно дореволюционное состояние оптики в России оставляет еще множество невыясненных и вообще не затронутых исследованиями вопросов.

Первым среди российских производителей сравнительно крупным предприятием, которое освоило наиболее технологически проблемное оптико-механическое производство, явилась варшавская фирма «Фосс», основанная еще в 1899 г. Затем последовало образование оптико-механической мастерской Обуховского сталелитейного завода (ОСЗ) в 1905 г. в Петербурге. В 1914 г. перед самой войной было основано Российское акционерное общество оптико-механического производства (РАО ОМП) тоже в Петербурге. Уже во время войны, в конце осени 1915 г., при Императорском фарфоровом и стеклянном заводах (ИФиСЗ) было, наконец, основано первое и единственное в России оптическое отделение по производству оптического стекла. Названные предприятия являлись относительно крупными для своего времени. Кроме того, ими была открыта целая отрасль оптического производства в России.

Не стоит недооценивать производителей механических работ, прямо связанных с оптическими компонентами ряда изделий. Имеются в виду такие важные предприятия, как С.-Петербургский оружейный завод [5, С. 569–572], Петербургский трубочный завод, Сестрорецкий оружейный завод Главного артиллерийского управления (ГАУ), Общество Путиловских заводов [6, С. 57]. Если эти предприятия выполняли заказы не на оптическое стекло, а лишь на металлические (латунь, медь, алюминий, сталь) части прицельных приспособлений, дальномеров для армии, ружейных прицелов и разрабатывали прицельные приспособления для оптических панорам к артиллерийским орудиям, то их нельзя забывать при общей оценке оптико-механической промышленности России. При всем этом надо признать высокий уровень исполнения технически точных и сложных работ в оптическом приборостроении, в механической их части. Выясняется, например, и значение другого производителя оптических инструментов – Депо (мастерской) мореходных инструментов Главного гидрографического управления Морского министерства, специально оборудованной для выполнения подобных заказов [7, С. 11].

Создание в рамках Обуховского завода оптико-механического отделения в июне 1905 г. явилось важным началом в истории оптической промышленности в России [8, 9].

Это был первый не частный, а казенный завод, который занялся обработкой сырого оптического стекла для оснащения им приборов. Стекло это получали от акционерного общества «Шотт и товарищи» из Йены (Германия) [10]. Оптико-механическая мастерская Обуховского завода занималась шлифовкой

стекла, склеиванием линз, установкой стекла в прибор и, наконец, сборкой целого прибора. Первые заказы были получены заводом от своего ведомства – Главного управления кораблестроения и снабжений (ГУКиС) Морского министерства. Первыми изделиями стали оптические прицелы для корабельных орудий системы лейтенанта Перепелкина. Затем, после успешного освоения этого производства, отделение перешло к более технологически и механически сложным работам в таком порядке: производство обычных зрительных и стереотруб, производство оптических орудийных панорам, производство биноклей, производство микроскопов, попытки освоить производство дальномеров для флота. Даже эта все более расширяющаяся номенклатура изделий еще не объясняет значения оптико-механической мастерской ОСЗ.

Подобными же работами занимался и частный варшавский завод «Фосс» Александра Гинсберга, по крайней мере, с 1900 г. И вполне успешно. Хотя в российской историографии и не замалчиваются факты относительно этого предприятия, однако до сих пор нет ни одной попытки сравнить успехи «Фосса» с дальнейшей деятельностью Обуховской мастерской. Например, производство войсковых биноклей «Фосс» освоил за три года до начала массового производства биноклей Обуховского завода. А между тем производство биноклей в России имело очень большое значение, так как понятно, что биноклей требовалось и для армии, и для флота куда больше, чем стереотруб или дальномеров. Завод, называвшийся, между прочим, «первым в России оптико-механическим заводом», единственным в России изготовлял перископы для подводного флота. Варшавский завод имел хороший опыт в производстве стереотруб и других изделий, первым и единственным в России изготовлял фотографические объективы, что требовало наличия высококлассных мастеров [11; 12, С. 19; 13, С. 42]. Этот завод обрабатывал оптическое стекло и обходился дешевле Обуховского, так как был гораздо ближе к германским производителям, что позволяло ему ближе общаться с заводами Германии и быстрее и дешевле получать стекло.

Значение Обуховского завода состояло в следующем.

- Мастерская завода, будучи казенной, сразу заслужила особое внимание со стороны всех государственных ведомств и учреждений. Заказы для Обуховской мастерской со стороны этих ведомств и структур носили почти обязательный характер.
- Сюда привлекались лучшие специалисты оптического производства, некоторые из них были иностранцами.
- Организация производства с самого начала на ОСЗ получала научную методику, благодаря усилиям А.И. Гершуна и его ближайших помощников. Не просто копирование немецких приемов производства и чертежей, а внесение усовершенствований заботили организаторов Обуховского завода. Кроме того, выполняя самые разнообразные и весьма сложные требования Морского и Военного ведомств, мастерская постоянно находилась в контакте и взаимодействии с техническими органами и компетентными лицами этих ведомств. Военные же требования к оптическим изделиям были наиболее высокими и строгими в сравнении с остальными.

Таким образом, несмотря на всю скромность первых попыток организовать массовое производство оптических приборов и инструментов «на русской почве», вокруг мастерской Обуховского завода постепенно развивалась значительная деятельность всех заинтересованных учреждений, государства и профессионалов. Несмотря на все сомнения, неверие, ограниченность средств, поставленное на заводе производство имело огромные перспективы, так как потребности в оптике увеличивались лавинообразно. Перевооружение германской армии было причиной того, что и в России приходилось уделять все больше внимания этому вопросу. Ведь России приходилось идти не в ногу и не впереди, а только следом за Германией.

После Боснийского кризиса 1908 г. стало очевидным, что Германия будет не союзником России, а противником ее, причем самым сильным и опасным. 1909 г. стал поворотным в военно-экономической политике России. Собственное производство, независимое от поставок из Германии, приобретало исключительное значение. Обуховский завод при всех его несомненных успехах за такое сравнительно короткое время (1905–1914 г.г.) не успевал произвести нужное количество военной оптики, и не менее половины ее продолжали получать по-прежнему из Германии. Это полностью относилось к перевооружению армии и крепостей. Российский флот, потерянный в Цусиме, только начинал свое возрождение, поэтому потребности Морского ведомства можно было пока более или менее полно удовлетворять работой Обуховской мастерской. Но проблему производства дальномеров Барра и Струда, например, при всей ее важности ОСЗ не мог решить практически, располагая лишь собственными средствами [14; 15, С. 36–37].

Морское министерство не готово было заключить контракт с английской фирмой, не желая гарантировать ей дивиденды с приобретением лицензии на производство дальномеров в России. Необходимо иметь в виду это положение дел и принимать во внимание, что многие проблемы решались слишком медленно или не могли быть решены в сжатые сроки перед войной.

Начало 1907 г. ознаменовалось переменой в промышленной политике России, которая имела далеко идущие последствия. Совет Министров обязал ведомства производить заграничные заказы только в случае невозможности их выполнения в России, как исключение. С другой стороны, иностранные производители уведомлялись, что в конкуренции на торгах предпочтение будет оказываться тем фирмам, ко-

торые работают в России, русскими рабочими руками и из русских материалов. Такое решение серьезно затрудняло положение Военного и Морского ведомств. Эти ведомства были крупнейшими заказчиками оптики в России и крупнейшими импортерами ее. Однако именно эта мера побудила важнейших германских производителей для России, К.П. Герца и К. Цейсса, открыть в Риге свои фабрики в 1907–1908 г.г. За ними последовала и французская фирма Е. Крауса, открывшая свою мастерскую в Петербурге. Развитие оптического производства на Обуховском заводе ограничило заказы иностранным производителям, хотя они и открыли фабрики в России.

Любопытно, что в обращениях руководства Обуховского завода в ГУКиС речь шла не о недостатке квалифицированных специалистов в области оптики, а исключительно о необходимости скорейшего преодоления германской монополии Цейсса–Шотта на снабжение российских производителей оптики оптическим стеклом [16, 17].

Совещание под председательством князя Н.Д. Оболенского 9 февраля 1909 г. об изготовлении оптического стекла в России, когда впервые и был поднят этот вопрос для Империи, обнаружило трудность положения. По признанию А.Л. Гершуна «взять на себя эту работу [изготовление оптического стекла] Обуховский завод не может, так как он не имеет ни соответственного персонала, ни опыта. Вместе с тем изготовление стеклянных масс в больших размерах стало бы немедленно известно фирме Цейсс, которая может прекратить Обуховскому заводу высылку оптического стекла и тем поставить его в безвыходное положение, так как уже теперь заграничные заводы отпускают стеклянную массу в очень ограниченных размерах, и Обуховский завод имеет запас стекла вместо разрешенного ему трехгодичного всего на 4 месяца» [18].

Разочарование в возможностях казенного производства на Обуховском заводе постигло его руководителя А.И. Гершуна, видимо, еще в 1913 г., если не раньше. Еще в 1909 г. по инициативе руководства Обуховского завода было предпринято обсуждение вопроса о возможности получения оптического стекла в России, необходимого для независимой от заграничного импорта работы Обуховской оптико-механической мастерской. Однако это обсуждение сразу зашло в тупик при подсчете необходимых затрат на становление такого производства, если не считать самого опасения Обуховского завода, что любые действия в этом направлении у себя в цехах приведут к отказу от сотрудничества с К. Цейссом. Германская сторона не потерпела бы столь опасной для себя конкуренции. Инициаторы вопроса начальник ОСЗ А.П. Меллер, заведующий оптико-механической мастерской К.С. Герцык и А.Л. Гершун, вскоре сменивший Герцыка, считали самым целесообразным постановку оптико-стеклянного производства на ИФиСЗ. Начало и первая половина 1914 г. еще заметнее обнаружила тенденцию к поиску новых партнеров для России в оптическом деле. Русско-германские отношения ухудшались, о войне с Германией писали и говорили часто и открыто. Военно-техническая торговля с германскими фирмами становилась слишком хрупкой, а зависимость от германского импорта, особенно стекла, рискованной. Контакты были установлены с производителями стекла во Франции («Парра–Мантуа») и Великобритании («Братья Ченс»). Французский капитал был привлечен для нового предприятия в России – РАО ОМП. Но и это предприятие решало задачу увеличения механического производства оптических приборов в России, а не изготовления собственного оптического стекла. Не следует забывать, что ни французские, ни английские производители стекла не могли заменить преимуществ и возможностей германского. Стекло Шотта, которое выписывалось в Россию годами, господствовало повсюду и превосходило всех конкурентов более чем значительно. Это превосходство было практически неограниченным. Положение и во время войны не изменилось кардинально. Однако русские оптики Н.А. Пушкин, Д.С. Рождественский, Н.Н. Качалов в своих записках выражали полную уверенность в успехе внутрироссийского решения этой проблемы [19].

Следует отметить и то обстоятельство, что помощь английской фирмы «Братья Ченс» сыграла существенную роль в ускорении решения вопроса о получении качественного стекла в России. По технологиям этой фирмы была выстроена специальная печь для плавки стекла.

Итак, только шлифование и полирование стекла, получаемого из-за границы, было уделом российских производителей. Производство механических частей можно было расширить сравнительно легко. Тупик же вполне обнаружился в связи с катастрофической нехваткой оптического стекла. Решить эту проблему нельзя было ни в один, ни даже в 2–3 года, так как здесь требовался накопленный опыт и кадры вычислителей оптических систем. Но это обнаружилось вполне и окончательно только в ходе мировой войны. Цена этого недостатка оказалась крайне дорогой. Понадобилось 1,5 года только на налаживание массового производства стекла, но количество сортов стекла оставалось незначительным, а брак стекла все еще большим по сравнению с получаемым годным стеклом. Потребность же в оптическом стекле за время войны выросла многократно.

Таким образом, война 1914–1918 г.г. дала важнейший толчок в решении самой важной проблемы для оптической индустрии России – проблемы стекла. Именно война вынудила вплотную приступить к решению этой задачи. Во время войны выдвинулся целый коллектив физиков и химиков-консультантов, русских ученых и хозяйственников, организаторов нового производства. Большинство их останется в России и будет успешно работать и в советские годы. Императорский фарфоровый и стеклянный завод (ИФиСЗ) стал опытной базой производства стекла и одновременно решал задачу массового производства.

Работа подготовлена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г. в соответствии с государственным контрактом по проблеме «Зарождение и становление в России оптической науки и промышленности (конец XIX – начало XX в.в.): государственная политика, социальные результаты, историческая репрезентация».

Литература

1. Каменская Н.Е. Зарождение оптического производства в дореволюционной России (Фабрика оптических инструментов И.Я. Урлауба) // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4(68). – С. 109–113.
2. Кузьмина О.В. К вопросу о подготовке квалифицированных кадров для русской промышленности на рубеже XIX – XX в.в. (Съезды русских деятелей по профессиональному и техническому образованию) // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4(68). – С. 113–116.
3. Воспоминания об академике Д.С. Рождественском. – Л.: Наука, 1976. – 168 с.
4. Гуло Д.Д., Осинковский А.Н. Дмитрий Сергеевич Рождественский. 1876–1940. – М.: Наука, 1980. – 288 с.
5. Историческое описание С.-Петербургского арсенала за 200 лет его существования 1712–1912 г.г. Составил В. Родзевич. – СПб, 1914. – С. 569–572.
6. Петербург – центр промышленности и инженерного искусства: Материалы научных конференций. – СПб: Норинт, 2003. – 254 с.
7. Всеподданнейший отчет по Морскому Министерству за 1906–1909 годы. – СПб, 1911. – С.11.
8. Российский государственный архив Военно-морского флота (РГА ВМФ). Ф. 427, оп. 2, д. 1449, л. 1–1об.
9. Центральный государственный архив научно-технической документации (ЦГАНТД СПб). Ф. 264, оп. 2–1, д. 6, Лл. 162–165.
10. Российский государственный исторический архив (РГИА). Ф. 503, оп. 4, д. 181, л. 101.
11. Архив Военно-исторического музея артиллерии, инженерных войск и войск связи (ВИМАИВиВС). Ф. 6, оп. 50, д. 209, Лл. 363–365.
12. Фотографический Листок. – 1907. – № 4.
13. Забаурин Н. Я. Портретная фотографическая оптика. – Л., 1934. – 112 с.
14. ЦГАНТД СПб. Ф. 264, оп. 2–1, д. 6, Лл. 117–130 (в изложении А.М. Бахраха).
15. Иванов Н.И. Александр Львович Гершун. Л., 1976. – 136 с.
16. РГА ВМФ. Ф. 420, оп. 1, д. 76, Лл. 49–50 об.
17. РГА ВМФ. Ф. 420, оп. 1, д. 120, Лл. 16–18 об.
18. Центральный государственный исторический архив Санкт-Петербурга (ЦГИА СПб). Ф. 1267, оп. 15, д. 102, Лл. 3–4 об.
19. РГИА. Ф. 503, оп. 4, д. 207, Лл. 113–120об. Профессор Н. Пушкин. Записка об организации оптико-механического завода при Государственном фарфоровом и стеклянном заводах. Май 1917 г. Лл. 25–27, 28–32.

Орлов Алексей Викторович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат исторических наук, доцент, mobus@mail.ru

УДК 93/94

ДИСКУССИЯ ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ РУССКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НАЧАЛА XX ВЕКА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ИСТОРИОГРАФИИ ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XX ВЕКА

С.Н. Коротков

Статья посвящена истории развития русской промышленности начала XX века, в центре внимания находится раз-
вернувшаяся в отечественной историографии дискуссия об уровне развития капитализма в России. Эта дискуссия, не
исчерпав себя и испытав политическое и идеологическое влияние, содействовала формированию нового системного
подхода к истории промышленности в России, включению ее в мировой контекст. Особенно этому содействует но-
вое теоретическое обоснование концепции «нового направления». Достижения отечественной историографии второй
половины XX века актуализируются в связи с развивающимися современными исследованиями, в частности, иссле-
дованием становления оптической промышленности в России.

Ключевые слова: русская промышленность начала XX века, особенности развития капитализма в России, историо-
графия, «новое направление».

Введение

Вопрос об особенностях социально-экономического развития России на рубеже XIX–XX в.в. рассматривался русской наукой уже в начале века и являлся одним из важнейших для советской марксистской историографии, поскольку от его решения зависели выводы о путях социалистического развития и даже о самой возможности революции в России. Дискуссия о степени развития капитализма в России накануне революции 1917 г. была продолжена и в постсоветский период. Не случайно внимание ученых к истории изучения этого вопроса [1–7]. Представляется, что коренные проблемы рассматриваемой дискуссии не решены, она стимулировала и стимулирует дальнейшие исследования, и сама дискуссия весьма показательна и заслуживает изучения. Вопрос актуализируется постановкой задачи исследования зарождения российской оптической науки и промышленности, поскольку появление современной отрасли было тесно связано с развитием экономики в целом.

Начало изучения особенностей развития русской промышленности

Оценки степени развития капитализма в России на рубеже XIX–XX в.в. различались уже в начале XX в. и менялись в дальнейшем. Марксистская традиция преувеличивала степень развития капитализма в России, видела возможность его более быстрого, чем на Западе, развития и в дальнейшем, а потому, полагал Г.В. Плеханов, «наш капитализм отцветет, не успевши окончательно расцвести». Уже после революции 1905 г. В.И. Ленин признал преувеличенными свои оценки относительного уровня развития капитализма в отечественном сельском хозяйстве, что повлекло изменение аграрной программы большевиков. Формируется представление о России как стране одновременно «передовой» и «отсталой». Понимание необходимости ускоренного роста российской экономики наблюдалось и внутри правящих структур России. В частности, В.И. Ковалевский, де-факто – первый отечественный министр промышленности и торговли, был убежден: «Дабы завершить великую задачу вывода отечественного хозяйства на самостоятельный путь, русская промышленность в своем развитии должна пропустить несколько исторических ступеней», а это реально лишь при активном и всемерном содействии со стороны правительства: «Правительство должно войти в самую глубь интересов разнообразных отраслей нашего народного хозяйства и положительным воздействием возбуждать и поддерживать частную предприимчивость в желательном для страны направлении» [7].

При формировании программ социалистического преобразования России большой проблемой являлась коллизия относительной зрелости в России предпосылок для завоевания власти пролетарской революционной партией и незрелости объективных предпосылок для построения социалистического общества. Из всех социалистических партий большевики в наибольшей степени были заняты изучением предпосылок революционного переворота, «субъективных предпосылок революции». Сразу же после революции 1917 г. В.И. Ленин в полемике с К. Каутским указывал, что только социалистическая модернизация создаст необходимые предпосылки для коммунистического строительства.

Идейно-политический момент всегда оказывал (и оказывает) заметное воздействие на историографию от античности до дня сегодняшнего. Изменяется только интенсивность этого воздействия на внутренний мир науки и сфера его охвата, которые находятся в прямой зависимости от политического режима и социальной обстановки в той или иной стране. Но есть периоды в истории разных стран, когда мощь идеологического пресса оставляет только самую узкую нишу для беспристрастного летописца. Так, в XX в. идейно-политическая составляющая вышла на первый план в советской историографии. Конечно, в стране продолжали работать историки, получившие профессиональную подготовку и сформировавшиеся как зрелые ученые в дореволюционной России, но тенденция партийности и государственный контроль нарастали с каждым годом [3].

После завоевания власти большевиками изучение перспектив социалистического строительства становится важнейшей задачей советского обществознания и одновременно политически очень опасным делом. Относительная отсталость российского капитализма, рост внутренних противоречий по мере нарастания капиталистической модернизации в начале XX в. создавали, как справедливо полагали марксистские теоретики, предпосылки для революции, но, с другой стороны, необходимо было найти предпосылки для построения коммунистического общества, т.е. очень развитое капиталистическое общество. Отметим, что до середины 1930-х г. сосуществовали весьма отличающиеся друг от друга оценки социально-экономического состояния дореволюционной России. Однако с выходом академических изданий Института экономики АН СССР при решающей поддержке И.В. Сталина победила концепция об отсутствии самостоятельной системы российского монополистического капитализма, об «агентурности» находящихся на территории России монополистических объединений. Последние при этом подходе рассматривались как филиалы европейского высшего капитализма. До второй половины 1950-х г. в отечественной историографии господствовал тезис о полукOLONIALном характере российской экономики конца XIX – начала XX в.в., тезис, закрепленный «Кратким курсом» [7].

С 1920-х г. в советской историографии утвердился тезис о невозможности появления в дореволюционной России феномена государственно-монополистического капитализма, поскольку не представлялось возможным сращивание самодержавного государственного аппарата и монополистического как

классово чуждых, неоднородных явлений. Только исследования более позднего периода А.Л. Сидорова, В.В. Адамова, С.А. Залесского, К.Н. Тарновского показали: тесные и весьма многочисленные связи между государственными структурами и монополистическим капиталом, монополистическими объединениями – факт, в первую очередь, в годы Первой мировой войны.

«Новое направление»

С середины 1950-х до середины 1960-х г.г., в период «оттепели», в СССР происходит некоторое ослабление идеологического контроля со стороны партийно-государственных органов. Новые условия создают возможности методологических поисков в рамках марксистской парадигмы, которые, впрочем, были вскоре приостановлены до середины 1980-х г.г.

Начало «оттепели» привело к активному развертыванию работы вновь созданного Научного совета по комплексной проблеме «Исторические предпосылки Великой Октябрьской социалистической революции» (1957 г.), в 1958–1961 г.г. были проведены первые дискуссии об иностранном капитале в России и о сущности «военно-феодального империализма». В частности, в публикациях А.Л. Сидорова (1961 г.), прежде всего, были разведены понятия «военно-феодальный империализм» и «империализм капиталистический». Историк показал, что и то, и другое явления имели место в России конца XIX – начала XX в.в., причем речь шла об определенном переплетении этих феноменов. Расшифровывает данную коллизию концепция многоукладности российской экономики. Подробно разобрал ряд положений «Краткого курса» К.Н. Тарновский [1, 7].

В атмосфере относительной свободы конца 50-х – начала 60-х г.г. в отечественной исторической науке стало формироваться «новое направление», характерной чертой которого было применение системного подхода к анализу исторических явлений эпохи империализма. В 1957 г. П.В. Волобуев заявил о необходимости изучения «взаимодействия отсталых и передовых черт русской экономики» и определения значения и места этой взаимосвязи в победе социалистической революции. В 1962 г. К.Н. Тарновский сделал вывод о существовании в литературе двух направлений при трактовке проблем государственно-монополистического капитализма. К.Н. Тарновский же определил понятие многоукладности как исходное для анализа предреволюционной экономики [6, 8–12].

Сторонники «нового направления» трактовали многоукладность как сочетание капитализма (ведущего, определяющего уклада) с пережитками феодализма и патриархальщины, с одной стороны, и как сочетание в пределах капиталистического уклада мелких кустарных промыслов с крупной монополизированной индустрией – с другой. Кроме того, отмечалась связь многоукладности российской экономики с характером аграрных отношений и перспективами развития революции. Один из лидеров «нового направления» П.В. Волобуев писал, что оно «стало развивать идеи об отсутствии прямой связи между уровнем развития производительных сил и зрелостью страны к социалистической революции, об особом, российском стиле капиталистической эволюции и порожденном им новом типе революционно-освободительного движения, о роли многоукладности экономики, о принципиально иной расстановке классовых и политических сил в ходе Октябрьской революции, чем считалось ранее, о демократическом потенциале социалистической революции в России и т.п.» [6, С. 5]. Из других важнейших направлений исследований выделим вопрос о роли иностранного капитала и особенностях развития отечественной буржуазии.

В советской историографии вплоть до начала 1960 г.г. вопрос о роли иностранного капитала в экономике России решался однозначно. Тезис о полукOLONIALном характере отечественной экономики лишал смысла вопросы о целях иностранного капитала, о намерениях русской стороны, результатах иностранных заимствований для России. Однако конкретно-исторический материал в целом ряде случаев давал основания для сомнений в истинности данного тезиса. Исследования 1960-х г.г. со всей очевидностью доказали ошибочность выводов о полном порабощении, подчинении русских коммерческих банков и целых отраслей промышленности силою иностранного финансового капитала. Большинство исследователей сошлось в утверждении о наличии, скорее, тесного союза между русским и иностранным капиталом. Эта точка зрения нашла развитие в работах Б.В. Ананьича, С.Б. Беляева и др.

Особенности генезиса капитализма, в том числе капиталистического империализма, проявились и в специфике формирования отечественной буржуазии. В частности, разработки И.Ф. Гиндина привели к заключению об оправданности выделения в России конца XIX – начала XX в.в. двух групп крупной буржуазии. Центром притяжения первой из них являлся Петербург, второй – Москва. В связи с этим первую группу удобно обозначить как «петербургская», вторую – как «московская» группа буржуазии. Петербургская буржуазия была занята, прежде всего, в тяжелой промышленности, железнодорожном строительстве, банковском деле и сформировалась главным образом в результате насаждения капитализма сверху. Московская группа складывалась на базе органического усиленного роста отечественного капитализма снизу, т.е. являлась коренной русской буржуазией, здесь прослеживалась неразрывная связь промышленного и торгового капитала и крепкая старообрядческая родословная.

Работы И.Ф. Гиндина 60-х – начала 70-х г.г. полемически направлены против результатов исследований академика С.Г. Струмилина и В.Я. Лаверычева. С.Г. Струмилин едва ли не первым подметил, что строение капитала в хлопчатобумажной отрасли текстильной промышленности находилось пример-

но на одном уровне с металлообработкой. Он особенно и не сомневался в идентичности процессов монополизации и развития финансово-капиталистических отношений в ведущих отраслях тяжелой и легкой промышленности: «Наша промышленность издавна работала в очень солидной доле за счет чужого, т.е., главным образом, банковского или финансового капитала» [13, С. 6, 24, 26]. И.Ф. Гиндин доказывал, что благодаря запретительной таможенной политике царского правительства крупнейшие российские текстильные фабриканты сделали монополистами на внутреннем рынке, и это обнаружилось «в чрезвычайно высокой прибыли, превосходившей или не уступавшей в начале XX в. монопольной прибыли тяжелой промышленности и петербургских банков» [14, С. 61].

Пересмотрены были первоначально чрезмерно оптимистические оценки уровня экономического развития России, обозначившиеся в начале 1960-х г.г. В частности, И.Ф. Гиндин, переосмысливая данные В.Я. Лаврычева, показал, что главная масса промышленной прибыли в России вплоть до Первой мировой войны еще не была типичной для капиталистического империализма монополистической прибылью, но представляла собой старую русскую сверхприбыль, получаемую за счет самых грубых форм эксплуатации, характерных для периода первоначального накопления капитала, во всяком случае – для домонополистических стадий развития капитализма.

Попытки методологического обновления исторических исследований фактически провалились в результате выдвижения партийным руководством утопических формул о «всемирно-исторической победе социализма». Они, сформулированные в виде сбывшихся пророчеств, явились отправным моментом для постановки более высокой задачи – обеспечить «постепенное перерастание социализма в коммунизм» [15, С. 6].

С середины 1980-х г.г. идеи «нового направления» вернулись в историографию, многие современные учебники излагают концепцию об особом пути капиталистической эволюции в России, о многоукладности и т.п. Вот как излагает этот сюжет один из лучших современных специалистов по истории России начала XX в. М.Ф. Флоринский: «Представители так называемого нового направления в отечественной историографии (П.В. Волобуев, И.Ф. Гиндин, К.Н. Тарновский и др.) в своих работах, посвященных российской экономике на рубеже XIX–XX в.в., подняли вопрос о типе капиталистической эволюции России, рассматривая его в неразрывной связи со сформулированной ими же проблемой многоукладности (взаимодействия российского монополистического капитализма с до- и раннекапиталистическими общественными структурами). Результаты соответствующих изысканий оказались весьма плодотворными и, в частности, способствовали более глубокому осмыслению предпосылок и природы трех российских революций. Однако в начале 70-х г.г. «новое направление» было объявлено антимарксистским и подверглось настоящему административному разгрому. Осуществлявшееся в рамках этого направления всестороннее исследование социально-экономической истории России конца XIX – начала XX в.в. фактически прекратилось. Ситуация начала меняться лишь с середины 80-х г.г. Сейчас идеи, сформулированные в свое время сторонниками «нового направления», оставаясь, правда, до сих пор объектом острых дискуссий, все прочнее утверждаются в науке. Обогащенные новыми положениями общетеоретического и конкретно-исторического плана, они открывают широкие перспективы для дальнейшего исследования ключевых проблем развития России на рубеже двух веков» [16, С. 239].

Заключение

Изучение развития русской промышленности, особенностей капитализма в России на рубеже XIX–XX в.в. продолжается, появляются новые работы по истории отдельных отраслей и предприятий, проведены региональные исследования по истории развития промышленности в Белоруссии, Казахстане, на Урале. Достижения отечественной историографии второй половины XX века актуализируются в связи с развивающимися современными исследованиями, в частности, исследованием становления оптической промышленности в России. Важными в таком контексте являются наблюдения о большой роли царского правительства в развитии отечественной промышленности, о слабости русской буржуазии, зависимости ее от государственного заказа, сохранении самых грубых форм эксплуатации и сохранении сверхвысоких прибылей в старых отраслях экономики. Очевидно, что ни банковский, ни промышленный, русский или иностранный, капитал не был кровно, материально (денежно) заинтересован в развитии сложных, наукоемких современных отраслей экономики. Государство же подтолкнуло на создание таких отраслей, как оптическая, могли только стратегические, военно-политические соображения, что в результате, в силу негибкости правительственного вмешательства в экономику, стремлении «несмотря ни на что» добиться результата, делало его дорогостоящим, неконкурентоспособным на мировом рынке и зависимым от экспортных поставок. Дальнейшее изучение становления отечественной оптической науки и производство, в свою очередь, может внести вклад в решение капитальных вопросов, поставленных отечественной историографией русской промышленности, капиталистического развития России начала XX в.

Литература

1. Городецкий Е.Н. Историографические и источниковедческие проблемы Великого Октября. 1930–1960 г.г. – М.: Наука, 1982. –384 с.

2. Лаверычев В.Я. Военный государственно-монополистический капитализм в России. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
3. Репина Л.П., Зверева В.В., Парамонова М.Ю. История исторического знания: Пособие для вузов. – М.: Дрофа, 2006. – 288 с.
4. Сидоров А.Л. Некоторые проблемы развития российского капитализма в советской исторической науке // Вопросы истории. – 1961. – № 12. – С. 35–47.
5. Тарновский К.Н. Советская историография российского империализма. – М.: Наука, 1964. – 244 с.
6. Тарновский К.Н. Социально-экономическая история России. Начало XX века. Советская историография середины 50-х – 60-х годов. – М.: Наука, 1990. – 292 с.
7. Шепелева В.Б. Революциология. Проблема предпосылок революционного процесса 1917 года в России (по материалам отечественной и зарубежной историографии): Учебное пособие. – Омск, 2005. – 392 с.
8. Академик П.В. Волобуев. Неопубликованные работы. Воспоминания. Статьи. – М.: Наука, 2000. – 509 с.
9. Бовыкин В.И. Россия накануне великих свершений. К изучению социально-экономических предпосылок Великой Октябрьской социалистической революции. М.: Наука, 1988. – 155 с.
10. Бовыкин В.И. Французский капитал в акционерных предприятиях России накануне Октября // История СССР. – 1991. – № 4. – С. 159–181.
11. Волобуев П.В. Выбор путей общественного развития: теория, история, современность. – М.: Политиздат, 1987. – 312 с.
12. Тарновский К.Н. Советская историография российского империализма. – М.: Наука, 1964. – 244 с.
13. Струмилин С.Г. Проблемы промышленного капитала в СССР. – М.: Экономическая жизнь, 1925. – 212 с.
14. Гиндин И.Ф. О некоторых особенностях экономической и социальной структуры российского капитализма в начале XX века // История СССР. – 1966. – № 3. – С. 61.
15. Наумов В.П., Рябов В.В., Филиппов Ю.И. Об историческом пути КПСС в свете нового мышления // Вопросы истории КПСС. – 1989. – № 10. – С. 3–24.
16. История России с древнейших времен до начала XX века. Пособие для абитуриентов / Под ред. проф. И.Я. Фроянова. – СПб: СПбГУ, 1998. – 301 с.

Коротков Сергей Николаевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат исторических наук, доцент, korotkovsn@yandex.ru

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 546.711.620.18

ФТОРИДНАЯ НАНОКЕРАМИКА

А.Г. Коробейников, Ю.А. Гатчин, В.Л. Ткалич, К.В. Дукельский

Рассмотрены свойства фторидных оптических нанокерамик, даны рекомендации по их применению.

Ключевые слова: фторидная оптическая нанокерамика, оптические элементы.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и исследованию различных видов фторидной оптической нанокерамики. Это связано с тем, что анализ развития тенденций современной фотоники показал, что прогресс в области разработки устройств, обладающих высокой радиационной стойкостью и повышенной оптической однородностью, будет связан с фторидной нанокерамикой.

Основаниями для этого являются фундаментальные свойства фторидов: широкое окно прозрачности 112–1300 нм; малая протяженность фоновых спектров; легкость введения в состав фторидов значительных (вплоть до 10^{21} см⁻³) концентраций активных редкоземельных ионов; хорошая теплопроводность, высокая механическая и термическая прочность, влагостойкость [1, 2].

Структурные и некоторые другие характеристики фторидных нанокерамик изучаются методами электронной и атомной силовой спектроскопии [3].

Керамические образцы изготавливают в различных странах [4], в том числе и в России, например, в Научно-исследовательском и технологическом институте оптического материаловедения ВНИИ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Кроме того, существуют и природные залежи. Например, на территории России имеется уникальное Суранское месторождение (Южный Урал) бесцветного оптического флюорита (CaF₂), обладающего скрытокристаллической структурой и фактически представляющего из себя природный аналог фторидной оптической керамики.

Приготовление искусственной фторидной керамики оптического качества обычно осуществляется двумя методами. Первый, классический метод, заключается в спекании предварительно подготовленного порошка. Данный метод позволяет равномерно распределить примесные ионы по объему образца. Второй, метод горячего прессования, заключается в сжатии монокристаллического образца при температуре плавления вещества в контролируемой атмосфере.

Исследования показали, что фторидные нанокерамики обладают спектрально-люминесцентными свойствами, позволяющими использовать их в УФ/ВУФ-областях спектра и изготавливать на их основе оптические элементы, люминофоры, активные среды лазеров. Кроме того, фторидная нанокерамика обладает рядом улучшенных спектрально-люминесцентных и физических свойств, что позволяет рекомендовать использовать ее в коротковолновой области спектра вместо монокристаллов. В частности, интенсивность цериевой люминесценции сцинтилляционной нанокерамики ВаF₂:Ce³⁺ в два раза превышает интенсивность люминесценции монокристалла того же состава.

1. Попов П.А., Дукельский К.В., Миронов И.А., Смирнов А.Н., Смолянский П.А., Федоров П.П., Осико В.В., Басиев Т.Т. Теплопроводность оптической керамики из CaF₂ // Доклады РАН. – 2007. – Т. 412. – № 2. – С. 185–187.
2. Палашов О.В., Хазанов Е.А., Мухин И.Б., Миронов И.А., Смирнов А.Н., Дукельский К.В., Федоров П.П., Осико В.В., Басиев Т.Т. Сравнение оптических характеристик монокристалла и оптической керамики CaF₂ // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 1. – С. 27–28.
3. Басиев Т.Т., Дорошенко М.Е., Конюшкин В.А., Осико В.В., Федоров П.П., Демиденко В.А., Дукельский К.В., Миронов И.А., Смирнов А.Н. Фторидная оптическая нанокерамика // Изв. РАН. Сер. хим. – 2008. – № 5. – С. 863–873.
4. Yanagitani T., Yagi H., Yamasaki Y. // Japan Patent. 10-101411, 1998.

Коробейников Анатолий Григорьевич – Санкт-Петербургский филиал учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН», доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov_A_G@mail.ru

Гатчин Юрий Арменакович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, Gatchin@mail.ifmo.ru

Ткалич Вера Леонидовна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru

Дукельский Константин Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, KDukel@GOI.ru

УДК 536.8:621.384

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ

С.В. Михеев, А.А. Усик, Е.Н. Кулешова

Описаны схемы построения многоканальной оптико-электронной системы контроля деформаций промышленных сооружений. Система представляет собой множество телевизионных измерительных каналов с перекрывающимися угловыми полями и активными маркерами контрольных точек (КТ). В системе предусмотрено наличие перекрестных связей внутри измерительных каналов обратных связей.

Ключевые слова: оптико-электронная система для контроля деформаций сооружений.

Развитие систем связи и удешевление элементной базы позволяет создавать многоканальные оптико-электронные системы (ОЭС) долговременного контроля состояния сооружений по пространственному положению их элементов.

Структуру такой системы можно представить как совокупность измерительных каналов (ИК), объединенных обратными и перекрестными связями с единым вычислительным блоком. Существует несколько схем построения системы: разомкнутая и слабосвязанная схемы, где процесс измерения и обработки данных происходит независимо для каждого ИК; сильно связанная схема комплексирования (СК) предполагает наличие обратных связей, причем операция выработки решения осуществляется в несколько этапов; глубоко интегрированная СК (рисунок) характеризуется тем, что принятие решения об изменении параметров контроля и окончательном формировании результатов измерения производится блоком выработки окончательного решения (БВОР) на основании всей имеющейся информации от каждого ИК после комплексной обработки. Последняя схема позволяет осуществлять структурно-параметрическую адаптацию в условиях изменения параметров контроля [1].

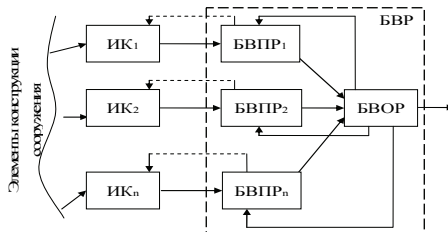


Рисунок. Структура глубоко интегрированной схемы комплексирования ИК:

ИК – измерительные каналы; БВР – блок выработки решений; БВПР – блоки выработки предварительных решений; БВОР – блок выработки окончательного решения

На основании аналитического исследования глубоко интегрированной СК был сделан вывод о том, что одной из основных составляющих погрешности является алгоритм определения положения маркера контрольных точек (КТ) [2]. После проведения математического моделирования и экспериментальных исследований алгоритмов было выявлено, что при использовании точечного источника (маркера КТ) алгоритм аппроксимации функцией Гаусса по методу наименьших квадратов обладает значительной ресурсоемкостью при малом увеличении точности, поэтому его можно рекомендовать как уточняющий к классическому алгоритму взвешенного квадратичного суммирования.

Экспериментальные исследования макета ИК в условиях, близких к эксплуатационным [3], показали, что при контроле некоторых видов отклонений элементов сооружений погрешность измерения расстояния до КТ в 3 раза выше допустимой погрешности. Однако погрешности измерения линейных смещений КТ и углового положения КТ находятся в допустимых пределах. Так как одной из основных составляющих погрешности измерения является влияние возмущения воздушного тракта, то были проведены исследования спектрально-аналитических методов, которые показали, что значения среднеквадратической погрешности определения координат изображения центра КТ в зеленом канале цветной ТВ камеры меньше, чем в синем и красном, приблизительно в 1,5 раза. Это объясняется тем, что количество зеленых пикселей матричного поля ТВ камеры в 2 раза больше, чем количество красных и синих пикселей матричного поля, что необходимо учитывать в алгоритмах работы системы. При рассогласовании величин смещений изображения КТ в разных цветовых каналах можно определить, что данное смещение вызвано регулярной рефракцией в воздушном тракте, а не происходит в результате вибраций или подвижек элементов конструкции сооружения.

Таким образом, при введении ИК с различными принципами действия и спектральными диапазонами потенциал многоканальной ОЭС увеличивается. Однако требуется разработка высокоэффективных алгоритмов определения положения КТ, поскольку существующие алгоритмы далеки от потенциально достижимой погрешности.

Проект выполнен в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными – кандидатами наук» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г.

1. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
2. Жуков Д.В., Коняхин И.А., Усик А.А. Аналитический обзор способов определения координат изображений точечных источников // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Т. 43. – С. 212.
3. Инструкция по разработке проектов и смет для промышленного строительства СН-202-76/ Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1976.

Михеев Сергей Васильевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, msv@gv.ifmo.ru

Усик Александр Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, usik.aa@gmail.com

Кулешова Екатерина Николаевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, enkuleshova@mail.ru

УДК 681.51.015

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ

А.А. Бобцов, А.А. Пыркин

Обсуждается подход к управлению по выходу линейными объектами с неизвестными параметрами и динамической размерностью математической модели. Предлагается новый закон управления в неопределенных условиях для более широкого класса допущений на объект по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: управление по выходу, параметрическая неопределенность, неизвестная динамическая размерность.

В современной научной литературе в области автоматического регулирования большое внимание уделяется разработке алгоритмов управления по выходу (т.е. без измерения переменных состояния или производных выходного сигнала) линейными объектами с неизвестными параметрами и динамической размерностью. Иными словами, рассматриваются объекты, представленные в виде обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$a(p)y(t) = b(p)u(t), \quad (1)$$

где измеряются только сигналы $y(t)$ и $u(t)$, $p = d/dt$ обозначает оператор дифференцирования; полиномы $a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_0$ и $b(p) = b_m p^m + b_{m-1}p^{m-1} + b_{m-2}p^{m-2} + \dots + b_0$ имеют не только неизвестные параметры $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$, но и неопределенные размерности n и m . Как правило, решается задача поиска такого управляющего сигнала $u(t)$, чтобы замкнутая система была устойчива, а выходная переменная $y(t)$ вела себя некоторым специально заданным образом, например, стремилась к нулю при $t \rightarrow \infty$.

Существует ряд подходов [1, 2], полученных совсем недавно и независимо разными авторами, позволяющих решать данную задачу. Однако, на взгляд авторов данной работы, подходы [1, 2] могут быть развиты за счет формулирования более сильного допущения относительно неопределенности параметров и динамической размерности. В отличие от [1, 2], будем полагать, что параметры $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$ априорно неопределенны, а известно только число ρ_{\max} – максимально возможная относительная степень математической модели объекта (1), в то время как число $\rho = n - m$, представляющее собой реальную относительную степень, неизвестно. В частности, в [1] допускается, что определена область изменения параметров и для полинома $a(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_0$ известно число \bar{n} такое, что $n \leq \bar{n}$. В [2] известны минимальное и максимальное значения относительной степени. Предлагаемый в этой работе подход будет базироваться на результате [2], но, в отличие от [2], будем полагать, что минимальная относительная степень неизвестна. Будем решать задачу поиска управляющего воздействия, обеспечивающего стремление выходной переменной $y(t)$ к нулю при $t \rightarrow \infty$. Выберем закон управления в виде

$$u(t) = -k \frac{\alpha(p)}{(Tp + 1)^{\rho_{\max} - 1}} \xi_1(t), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (3)$$

где число $k > 0$ и полином $\alpha(p)$ степени $(\rho_{\max} - 1)$ выбираются так, чтобы передаточная функция

$$H(p) = \frac{\alpha(p)b(p)}{a(p)(Tp+1)^\gamma + k\alpha(p)b(p)}$$

была строго вещественно положительной; $\gamma = \rho_{\max} - \rho > 0$; постоянная

времени T апериодического звена должна быть достаточно малой величиной; число $\sigma > T^{-1} > k$, а коэффициенты k_i рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (3) при нулевом входе $y(t)$.

Чтобы следующие далее рассуждения были понятны и имели логический смысл, авторы адресуют читателя к разделу 3 (заключение) статьи [2], где обсуждаются достаточно близкие идеи. Итак, рассмотрим два случая.

1. Пусть $\rho = \rho_{\max}$, тогда закон управления (2) примет вид

$$u(t) = -k\alpha(p)v(t), \quad v(t) = \frac{1}{(Tp+1)^{\rho_{\max}-1}} \xi_1(t),$$

где вторая система представляет собой неучтенную асимптотически устойчивую динамику, обсуждаемую в [2]. Как было показано в [2], существуют такие числа $\sigma > T^{-1} > k$, что $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0$.

2. Пусть $\rho < \rho_{\max}$, тогда закон управления (2) примет вид

$$u(t) = -k \frac{\alpha(p)}{(Tp+1)^\gamma} v(t), \quad v(t) = \frac{1}{(Tp+1)^{\rho-1}} \xi_1(t),$$

где вторая система, также как и в первом случае, представляет собой неучтенную динамику, анализируемую в [2]. Также как и в первом случае, согласно [2], найдутся такие числа $\sigma > T^{-1} > k$, что $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0$.

Чтобы рассматриваемый в данной работе результат был более конструктивным, авторы предлагают адаптивную схему настройки параметров k , T^{-1} и σ , которая близка к подобному подходу, опубликованному в [2]. Будем настраивать коэффициент k по линейному закону до тех пор, пока переменная $y(t)$ не попадет в некоторую малую область, заданную разработчиком системы. Параметры T^{-1} и σ можно рассчитывать следующим образом: $T^{-1} = k^2$ и $\sigma = (T^{-1})^{2\rho_{\max}}$. При таком расчете коэффициентов регулятора обеспечивается сходимость выходной переменной $y(t)$ в некоторую малую область, заданную разработчиком системы.

В заключение следует отметить, что, используя результаты, опубликованные в [2–5], представленный подход без труда может быть распространен на параметрически и функционально неопределенные нелинейные системы, функционирующие в условиях внешних возмущений, запаздывания и неучтенной динамики. Также на базе [6] представляет интерес распространение предлагаемого результата для доказательства экспоненциальной устойчивости на случай систем с запаздыванием.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 09-08-00139-а).

1. Фургат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 109–118.
2. Бобцов А.А., Шаветов С.В. Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтенной динамики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1. – С. 32–38.
3. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу линейными системами с неучтенной паразитной динамикой // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 6. – С. 115–122.
4. Бобцов А.А., Капитонов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу нелинейными системами с неучтенной динамикой // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 12. – С. 3–10.
5. Бобцов А.А., Фаронов М.В. Управление по выходу нелинейными системами с запаздыванием в условиях неучтенной динамики // Известия РАН. ТиСУ. – 2011. – № 3. – С. 68–76.
6. Бобцов А.А., Пыркин А.А. Новый функционал Ляпунова–Красовского для доказательства экспоненциальной устойчивости нелинейной системы с запаздыванием // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2. – С. 169.

Бобцов Алексей Алексеевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru

Пыркин Антон Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com

УДК [517.938 + 519.713/.718]: 621.398

ФОРМИРОВАНИЕ БАНКА ПРОВЕРОЧНЫХ МАТРИЦ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫХ КОДОВ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЧНОГО МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО КОМПОНЕНТА

А.В. Ушаков, Е.С. Яицкая

С помощью невырожденного матричного мультипликативного компонента формируется банк проверочных матриц систематических помехозащищенных кодов.

Ключевые слова: помехозащитное преобразование кодов, проверочная и образующая матрицы.

Помехозащитное преобразование кодов (ППК) представляет собой пятифазный процесс: помехозащитное кодирование (ПК) помехонезащищенного информационного кода (ПНЗИК); искажение помехозащищенного кода (ПЗК) при передаче по двоичному каналу связи (КС); помехозащитное декодирование (ПД) с целью формирования синдрома (опознавателя) ошибки, свидетельствующего о факте, а, возможно, и месте ошибки в коде; формирование сигнала коррекции (ФСК) и коррекция [1].

Алгоритмически ППК может быть описано тремя способами:

1. $y = aG$; $f = y \oplus \xi$; $E = fH$; $\hat{\xi} = EH^+$; $\hat{y} = f \oplus \hat{\xi}$;
2. $y(x) = \arg \{rest(y(x)g^{-1}(x) = 0)\}$; $f(x) = y(x) \oplus \xi(x)$; $E(x) = rest(f(x)g^{-1}(x))$; $\hat{\xi}(x) = \hat{\xi}(E(x))$; $\hat{y}(x) = f(x) \oplus \hat{\xi}(x)$;
3. $y(k) = Na(k)$; $x_k(k+1) = Ax_k(k) \oplus B_k a(k), k = \overline{1, k_i}$; $\bar{x}_k(k+1) = \bar{A}\bar{x}_k(k), k = \overline{1, m}$; $\bar{x}_k(0) = x_k(k_i)$; $y(k) = C\bar{x}_k(k)$; $f(k) = y(k) \oplus \xi(k)$; $x_d(k+1) = Ax_d(k) \oplus B_d f(k), k = \overline{1, n}$; $E = x'_d(n)$; $\hat{\xi} = EH^+$; $\hat{y} = \text{row}\{f(k), k = \overline{1, n}\} \oplus \hat{\xi}$,

где $a(*)$ – ПНЗИК; $y(*)$ – ПЗК; $\xi(*)$ – код помехи в КС, искажающей код $y(*)$ в аддитивной форме; $f(*)$ – искаженный в КС ПЗК; $E(*)$ – код синдрома факта или места искажения; $\hat{\xi}(*)$ – код коррекции; $\hat{y}(*)$ – откорректированный принятый из КС код, удовлетворяющий условию $\hat{y}(*) = \arg \min_{\xi(*)} \{\|y(*) - \hat{y}(*)\|\}$;

x_k, \bar{x}_k – векторы состояния кодирующего устройства (КУ), размерности $\dim x_k = \dim \bar{x}_k = m$; B_k – $(m \times 1)$ -матрица входа КУ; $C = [1 \ O_{1 \times (n-1)}]$ – матрица выхода КУ [2]; $N = [1]$ – матрица вход-выход КУ; \bar{A} – нильпотентная матрица с индексом $v = m$; x_d – вектор состояния декодирующего устройства (ДКУ), размерности $\dim x_d = m$; A – $(m \times m)$ -матрица состояния КУ и ДКУ; B_d – $(m \times 1)$ -матрица входа ДКУ [2]; G – $(k_i \times n)$ -образующая матрица ПЗК; H – $(n \times m)$ -проверочная матрица ПЗК.

Символ «*» опускается, если все коды, задействованные в процедуре ППК, рассматриваются как вектора-строки; принимает значение переменной x , если коды рассматриваются как модулярные многочлены (ММ) над полем Галуа $GF(p)_{p=2}$; принимает смысл дискретного времени k , выраженного в числе тактов длительности Δt , если все коды рассматриваются как кодовые последовательности, преобразование которых осуществляется рекуррентным образом в силу векторно-матричных соотношений, параметризованных дискретным временем k .

Примечание 1. Помехозащитное ДКУ формирует:

1. нулевой код синдрома $E = 0$ в случае отсутствия искажений в принятом коде ($\xi = 0$);
2. ненулевой код синдрома $E \neq 0$ в случае наличия искажений в принятом коде ($\xi \neq 0$).

Выясним, каким свойством должна обладать пара матриц (G, H) с тем, чтобы она порождала ПЗК. С этой целью сформулируем утверждение.

Утверждение 1 (У.1). Пара (G, H) порождает ПЗК при необходимом условии $GH = O$. □ (1)

Доказательство строится на использовании системы соотношений

$$y = aG; f = y \oplus \xi; E = fH = (y \oplus \xi)H = (aG \oplus \xi)H = aGH \oplus \xi H|_{\xi=0} = aGH = O \rightarrow GH = O. \quad \blacksquare$$

Ставится задача формирования банка проверочных матриц систематических ПЗК с помощью невырожденного матричного мультипликативного компонента.

Основным результатом исследования является следующее утверждение.

Утверждение 2 (У.2). Умножение проверочной матрицы H справа на невырожденную произвольную $(m \times m)$ -матрицу P порождает матрицу $\tilde{H} = \arg\{G\tilde{H} = O\}$, при этом \tilde{H} также является проверочной матрицей ПЗК. □

Доказательство. Подстановка $\tilde{H} = HP$ в (1) дает: $G\tilde{H} = GHP = (GH)P = (O)P = O$. ■

Примечание 2. Максимальная мощность банка проверочных матриц \tilde{H} достигается при $P = A^l$, $l = 0, n-1$, если $(m \times m)$ -матрица A имеет неприводимый характеристический ММ и принадлежит показателю $\mu = 2^m - 1$.

Для подтверждения основного результата приведем иллюстративный пример.

Рассмотрим ПЗК, задаваемый неприводимым ММ $g(x) = x^3 + x + 1$. Тогда ППК характеризуется следующими компонентами:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

причем условие (1) выполняется, и матрица A принадлежит показателю $\mu = 2^3 - 1 = 2^3 - 1 = 7$.

Сформируем проверочную матрицу \tilde{H} согласно утверждению У.2, приняв $P = A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$:

$$\tilde{H} = HP = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

при этом выполняется условие утверждения У.1 $G\tilde{H} = O$, т.е. пара матриц (G, \tilde{H}) порождает ПЗК.

Полученный банк проверочных матриц позволяет обеспечить скрытность процесса ППК.

1. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 17–25.
2. Ушаков А.В., Яицкая Е.С. Динамическое наблюдение нелинейных двоичных динамических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – Т. 68. – № 4. – С. 38–44.

Ушаков Анатолий Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ushakov-AVG@yandex.ru

Яицкая Елена Сергеевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yaitskayaes@mail.ru

УДК 535.374

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЭРБИЕВЫХ МИКРОЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

И.Н. Дубинкин, М.В. Иночкин, Н.И. Лонцакова, В.В. Назаров, Д.Ю. Сачков, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов

Впервые реализована генерация малогабаритного Er:YLF-лазера с диодной накачкой в режиме пассивной модуляции добротности резонатора, осуществляемой при помощи кристалла $Fe^{2+}:ZnSe$, получены моноимпульсы с энергией 2,9 мДж и длительностью 30 нс на длине волны 2,81 мкм.

Ключевые слова: эрбий, лазер, селективная накачка, $Fe^{2+}:ZnSe$, пассивная модуляция добротности.

Исследование процессов генерации эрбиевых кристаллов в области 3 мкм представляет интерес в связи с перспективностью использования излучения данного спектрального диапазона в области медицины. В рамках настоящей работы продолжены исследования параметров генерации малогабаритного лазера на кристалле Er:YLF с диодной накачкой, работающего в режиме пассивной модуляции добротности [1]. В качестве пассивного затвора использован перспективный кристалл $Fe^{2+}:ZnSe$. В экспериментах достигнуто значение импульсной мощности 100 кВт, что, по сведениям авторов, на данный момент является наилучшим результатом времени для малогабаритных Er:YLF с диодной накачкой.

Для экспериментов с диодной накачкой был выбран кристалл Er:YLF, так как время жизни мультиплетта $^4I_{11/2}$, являющегося верхним лазерным уровнем трехмикронного перехода иона Er^{3+} , в данном кристалле (4 мс) существенно превышает соответствующие времена жизни в кристаллах YAG (0,1 мс) и YSGG (2 мс). Схема экспериментального лазера приведена на рис. 1. В качестве источника накачки использовалась матрица лазерных диодов 1, рассчитанная на работу в импульсно-периодическом режиме при длительности импульса до 1 мс. Импульсная мощность излучения матрицы при максимальном токе накачки составляла 700 Вт, средняя длина волны излучения – 975 нм при температуре корпуса матрицы 25°C, ширина спектра в рабочем режиме была порядка 6 нм.

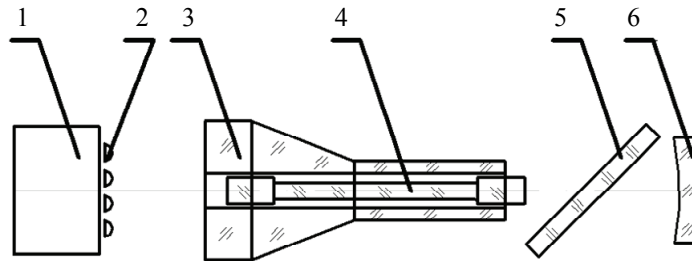


Рис. 1. Схема экспериментального Er:YLF-лазера с системой продольно-поперечной накачки активной среды: 1 – матрица лазерных диодов; 2 – микролинзы; 3 – призма полного внутреннего отражения; 4 – активный элемент (Er:YLF); 5 – Fe^{2+} :ZnSe-затвор; 6 – выходное зеркало

Активный элемент лазера 4 (Er:YLF) имел форму цилиндра с размерами $\varnothing 2 \times 35$ мм. Концентрация активатора составляла 15% ат. На один из торцов активного элемента было нанесено диэлектрическое покрытие, выполняющее роль глухого зеркала для излучения генерации и просветляющего покрытия для излучения накачки. На второй торец было нанесено просветляющее покрытие.

Ввод излучения накачки в активный элемент осуществлялся по продольно-поперечной схеме, реализованной при помощи системы призм полного внутреннего отражения 3. Для наилучшего согласования диаграммы направленности излучения матрицы диодов накачки с геометрией осветительной призмы на выходном окне матрицы 1 были установлены микролинзы 2, коллимирующие излучение вдоль быстрой оси излучения лазерных диодов. Согласно результатам численного моделирования эффективность данной схемы осветителя составляла не менее 70%. Охлаждение активного элемента и диодной матрицы осуществлялось проточной водой.

Резонатор лазера был образован плоским глухим зеркалом, напыленным на торце активного элемента, и внешним сферическим выходным зеркалом 6. Длина резонатора составляла 10 см. В экспериментах использовался пассивный затвор, выполненный в виде плоскопараллельной пластины толщиной 1,85 мм. Начальное пропускание излучения π -полязации, падающего на затвор под углом Брюстера (68°), составляло 0,88 (на длине волны 2,81 мкм). Материалом затворов служили монокристаллы Fe^{2+} :ZnSe, выращенные из паровой фазы методом свободного роста на монокристаллическую затравку с использованием химического транспорта в водороде [2]. Легирование ионами Fe^{2+} осуществлялось непосредственно в процессе роста.

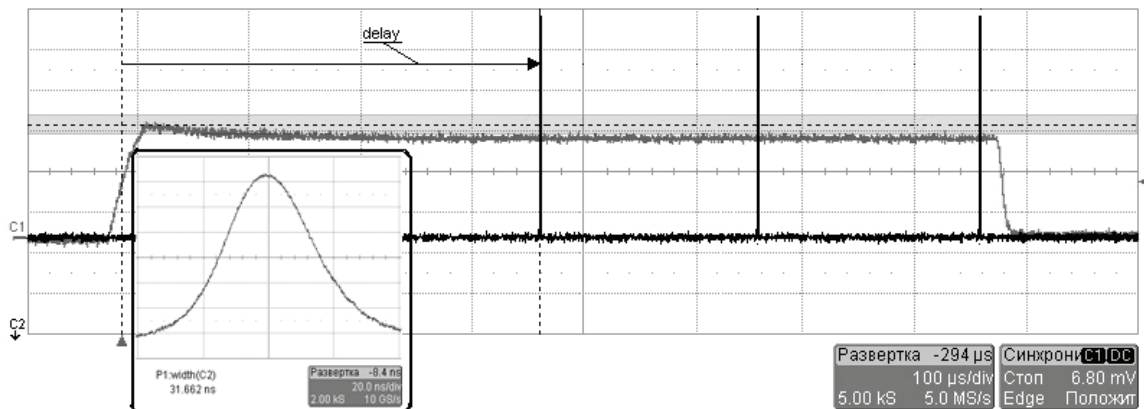


Рис. 2. Осциллограмма импульса генерации Er:YLF-лазера в режиме пассивной модуляции добротности резонатора затвором на кристалле Fe^{2+} :ZnSe

Предварительные эксперименты показали, что применение неселективного выходного зеркала 6 с близкими коэффициентами отражения в области 2,6–2,9 мкм приводит к последовательной генерации импульсов излучения на трех длинах волн: 2,66 мкм, 2,71 мкм и 2,81 мкм. Для получения импульсов ге-

нерации лазера только на длине волны 2,81 мкм, наиболее близкой к центру пика поглощения воды в составе биотканей [3], в резонатор лазера должен быть установлен спектрально-селективный элемент, увеличивающий потери для длин волн, лежащих в коротковолновой области контура усиления. В качестве такого элемента может быть использовано выходное зеркало β с селективным коэффициентом отражения в требуемой области спектра. Коэффициент отражения селективного зеркала β , примененного в данной работе, на рабочей длине волны 2,81 мкм составлял 0,92, монотонно убывая в коротковолновой области спектра до значения 0,5 на длине волны 2,66 мкм.

В эксперименте были получены моноимпульсы с энергией 2,9 мДж, длительностью 30 нс (рис. 2) и пиковой мощностью 96 кВт. Длина волны генерации составляла 2,81 мкм. Время задержки начала генерации относительно начала импульса накачки составляло 450 мкс. При увеличении длительности импульса накачки до 800 мкс наблюдалась генерация серии из трех моноимпульсов общей энергией 6,7 мДж.

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», грант № РНП 2.1.2/4302.

1. Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A. Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers // Phys.Stat.Sol. (c). – 2006. – V. 3. – № 4. – P. 1213–1216.
2. Shori R.K., Walston A.A., Stafsudd O.M., Fried D., Walsh J.T. Quantification and Modeling of the Dynamic Changes in the Absorption Coefficient of Water at $\lambda = 2,94 \mu\text{m}$ // IEEE J. on selected topics in quant. electron. – 2001. – V. 7(6). – P. 959–970.
3. Жилина В.С., Сачков Д.Ю., Храмов В.Ю. О многочастотной генерации Er:YLF-лазера с диодной накачкой и пассивным Fe:ZnSe-затвором // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – Т. 66. – № 2. – С. 124.

Дубинкин Илья Николаевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ilyadubinkin@mail.ru

Иночкин Михаил Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, m_inochkin@mail.ru

Лонцакова Наталья Игоревна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Tasha271264@yandex.ru

Назаров Вячеслав Валерьевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, v_v_nazarov@mail.ru

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

Хлопонин Леонид Викторович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com

Храмов Валерий Юрьевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, vkhramov@gmail.com

УДК 531.383.001.4

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОГО УДАРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Д.П. Елисеев, В.П. Серебряков, А.П. Чапурский

Обоснована возможность создания малогабаритного ударного стенда для испытаний микромеханических датчиков на ударные импульсы высоких уровней (тысячи g), разработаны методики выбора принципиальных и схемных решений. Рассчитаны основные параметры разрабатываемого стенда, показана возможность достижения ускорения более 10000 g при сравнительно небольших скоростях соударения и допустимой длительности удара. Предварительные расчеты показали, что при расширении пределов изменения параметров стенда и оптимизации конструкции, можно повысить уровень воспроизводимых ускорений в 3–4 раза.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, удар, стенд, ускорение.

В настоящее время микромеханические инерциальные датчики (гироскопы и акселерометры) выпускаются серийно и нашли широкое применение. Малые массы и габариты, низкое энергопотребление и невысокая стоимость микромеханических датчиков создают возможности их использования в широком классе систем навигации и управлении движением [1]. Расширение областей их применения требует повышения их ударопрочности и ударостойкости. Реальные уровни этих показателей должны подтверждаться испытаниями. Испытания обычно требуются на многих этапах обработки опытных образцов.

Существующее испытательное оборудование, стенды для испытаний не приспособлены для оперативных испытаний микромеханических приборов, их громоздкие конструкции создавались для испытаний крупногабаритных приборов и комплексов. Эти установки занимают большие площади и потребляют много электроэнергии, проведение испытаний на них требует значительных временных и финансовых затрат. Такое оборудование не позволяет оперативно, на последовательных этапах разработки, осуществлять испытания вновь создаваемых или усовершенствованных вариантов микромеханических при-

боров. Вследствие значительных габаритов и необходимости обеспечения большой грузоподъемности стенды не позволяют получать ударные ускорения выше 2000 g. Дополнительно серьезные трудности возникают и при полунатурном моделировании, когда часть функций преобразования сигналов от собственной электроники прибора передается компьютеру.

Для отечественного приборостроения актуальной является необходимость создания испытательного оборудования, которое давало бы возможность оперативно проводить механические испытания миниатюрных приборов в любых помещениях, на малых площадях, без привлечения специального персонала. На основе проведенных предварительных исследований в работе будет показано, что для испытаний на короткие удары имеются реальные возможности создания и разработки таких малогабаритных стендов для испытаний, например, однокомпонентных микромеханических микроскопов (ММГ) [2], которые могли бы устанавливаться на столе, но при этом позволяли бы воспроизводить ударные ускорения более 10000 g.

Ударные воздействия с большими пиковыми значениями перегрузок ($10^3 g$ – $10^5 g$ и более) характерны для подвижных объектов, быстро набирающих большие скорости (порядка 10^3 м/с). На всех известных ударных стендах ударный импульс создается при торможении на коротком расстоянии от существенно меньшей набранной скорости. Выполнение при испытаниях на стендах обоих указанных условий (большие ускорения и большие приращения скорости), для чего необходимы большие длительности ударных импульсов (секунда или десятые доли секунды), практически невозможно. Однако длительность ударных импульсов на малогабаритные датчики с высокими собственными частотами можно значительно сокращать, сохраняя количественную меру воздействия. При представлении механических свойств микромеханического прибора, как колебательной системы с низшей собственной частотой ω_0 показано [3], что условие эквивалентности по деформациям при воздействии ударных импульсов длительности T имеет вид $\omega_0 T < M$, где M – безразмерное число порядка десяти. Иначе говоря, при сохранении того же эффекта ударного воздействия, длительность импульса может быть сокращена в десятки раз, до десятых миллисекунды. При этом соответствующее приращение скорости должно быть порядка десятков метров в секунду, что возможно получить на малогабаритных стендах. Для воспроизведения необходимых ударных импульсов предложено использовать в конструкции стенда энергию сжатых пружин (рисунок).

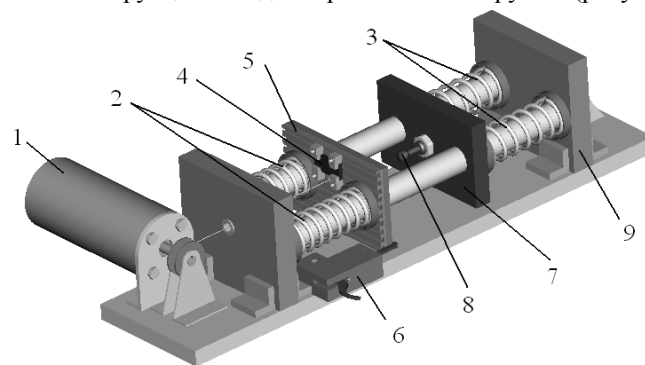


Рисунок. Модель конструкции ударного стенда: 1 – привод; 2 – пружины запуска; 3 – пружины торможения; 4 – ММГ; 5 – стол; 6 – задвижка; 7 – наковальня; 8 – подушка; 9 – основание

В представленной схеме приводом 1 при помощи троса подтягивается стол 5 с установленными микромеханическими датчиками 4. Тем самым максимально сжимаются пружины 2, которые являются механизмом запуска. Для фиксации стола во взведенном состоянии служит задвижка 6, освобождающая энергию пружин при готовности к эксперименту. При ударе стол контактирует с наковальней 7 через подушку 8, вся система дополнительно амортизируется пружинами 3. Очевидно, что стол будет совершать несколько движений и отскоков, что, в свою очередь, сильно исказит задаваемую форму ударного импульса. Для исключения этого эффекта необходимо предусмотреть запорный механизм. В предложенной схеме эту роль играет задвижка.

Требуемый ударный импульс создается при торможении на коротком пути с помощью специальных средств, таких как регулируемая подушка, пружины запуска и амортизационные пружины.

Для моделирования ударного воздействия рассчитаны отталкивающие пружины, основные параметры которых представлены в таблице. При сравнительно небольших размерах пружин можно получить скорость подвижной части перед ударом около 40 м/с.

Моделирование посредством модуля Mechanism программы Pro/ENGINEER показало, что при допустимой длительности удара 0,5 мс представляется возможным получить максимальное значение ударного ускорения в несколько раз больше 5000 g. Можно предполагать, что при расширении пределов изменения задаваемых параметров и за счет оптимизации конструкции можно значительно повысить уровень воспроизводимых ускорений. Подлежащие разработке настольные стенды с такими характеристиками при хорошей конструктивной проработке позволят удовлетворить потребности испытаний на удар

малогабаритных датчиков и микроэлектронных устройств и превзойти характеристики отечественных и зарубежных ударных стенов.

№	Параметр пружины	№ варианта		
		1	2	3
1	Наружный диаметр пружины, мм	55	50	50
2	Диаметр проволоки, мм	10,0	6,5	6,0
3	Полное число витков	18	18	18
4	Макс. усилие сжатия, Н	8222	2500	1870
5	Макс. касат. напряжение, МПа	1270	1233	1170
6	Масса пружины, кг	1,6	0,67	0,55
7	Жесткость пружины, Н/мм	65	12,5	10
8	Скорость перед ударом, м/с	43	31	20
9	Максимально возможное ускорение при «длинном» ударе, g (m/c^2)	15000 g (150000)	10500 g (105000)	17000 g (170000)
10	Тормозной путь, мм	21	16	14

Таблица. Параметры конструкции стенов

Для проектировщиков и наладчиков микромеханических датчиков, в первую очередь ММГ, необходимо иметь малогабаритные стенов, на которых можно было бы оперативно проводить испытания вновь изобретаемых или усовершенствованных датчиков. Показана реальная возможность создания таких стенов для исследования ударостойкости.

Разработана конструкция ударного стенов, рассчитаны характеристики стенов, включая параметры пружин, скорость перемещения стенов, достигаемое линейное ускорение, массогабаритные характеристики. Выполнено моделирование движения стенов, которое показало достижимость заявленных параметров. Приведенные данные свидетельствуют о реализуемости выдвинутых положений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 10-08-00153-а.

1. Евстифеев М.И. Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 1. – С. 27–39.
2. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
3. Челпанов И.Б. Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин. – СПб: СПбГПУ, 2008. – 296 с.

Елисеев Даниил Павлович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор, eliseev.dp@gmail.com
Серебряков Валентин Павлович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор, new2006box@rambler.ru

Чатурский Алексей Петрович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор, alexchap3@yandex.ru

УДК 658.5.011

СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ В СРЕДЕ САД-СИСТЕМЫ

Д.Д. Куликов, В.С. Бабанин

Рассматриваются возможности использования САД-систем при проектировании параметрических моделей деталей. Представлен макрос, позволяющий разрабатывать параметрические модели в системе САТИА V5. Описан способ сохранения информации о параметрической модели из САД-системы в систему автоматизированного проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: конструктивный элемент, параметрическая модель детали, комплексный элемент, трехмерная аннотация, XML-документ.

Одной из важнейших задач, связанных с повышением уровня автоматизации систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), является задача интеграции САПР ТП с САД-системой, в среде которой создается 3D-модель детали. Сложность задачи вызвана сложностью распознавания конструктивных элементов (КЭ), к которым привык технолог (канавки, пазы, уступы, отверстия и т.д.), причем использование нейтральных форматов типа STEP и IGES практически не облегчает задачу распознавания КЭ [1]. Ввод в САПР ТП информации о КЭ детали позволяет использовать типовые планы разработки (ТПО) для этих КЭ и, следовательно, автоматически определять содержание технологических переходов. Использование ТПО позволяет на 30–40% уменьшить трудоемкость проектирования технологии изготовления деталей приборов и машин.

Один из возможных подходов заключается в параметрическом моделировании деталей. В этом случае создается параметрическая модель детали (ПМД), содержащая ее описание, включая КЭ детали. На базе такого подхода на кафедре технологии приборостроения была создана система «ТИС-Деталь», в которой описание детали выражается в виде иерархии фреймов, позволяющих создавать ПМД с любой степенью детализации [2]. Синтаксически ПМД представляет собой XML-документ, хранение которого может выполняться в удаленной базе знаний. Программное ядро системы «ТИС-Деталь» – это web-

сервис, доступ к которому осуществляется через удаленный сервер. Работа с системой заключается в анализе технологом чертежа детали и вводе в ПМД КЭ детали. Кроме того, в ПМД вводится информация об общих характеристиках детали, о заготовке, о наличии покрытий, термообработке и т.д. Однако трудоемкость создания ПМД остается достаточно высокой, особенно для сложных деталей. В связи с этим был проведен комплекс научных исследований, направленных на совмещение процесса создания 3D-моделей деталей в САД-системе и получение параметрических моделей деталей в среде этой же системы. В качестве САД-системы была выбрана CATIA V5 как система высокого уровня, обладающая большим набором функциональных возможностей, необходимых для решения поставленной задачи.

В первую очередь в рамках CATIA V5 была создана библиотека комплексных элементов, взятых из системы «ТИС-Деталь». Комплексный элемент – это конструктивный элемент, форма которого в определенных пределах зависит от параметров элемента.

Конструктивные элементы делятся на две категории. К первой относят элементы соединения (выпуклые элементарные тела) – цилиндр, конус, сфера. Элементы первой категории соединяются между собой в более сложные тела, при этом могут использоваться переходные элементарные поверхности (фаски, галтели, скругления). Например, комплексный элемент «цилиндр» имеет определенный набор параметров, показанный на рис. 1. Задавая те или иные параметры, можно получить различные по форме варианты элемента. В данном случае для этого задаются различные переходные элементы (фаски, скругления и галтели). Ко второй категории относят элементы отсечения – канавки, пазы, уступы, отверстия. При использовании элементов второй категории элементы отсечения вычитаются из формируемого объекта.

В среде CATIA V5 был разработан макрос, который обладает следующими возможностями:

- выбирать нужные комплексные элементы и выводить их графические образы на экран;
- выводить форму для выбранного элемента и вводить нужные параметры элемента в форму;
- настраивать графический образ на заданные параметры и выводить его на экран;
- формировать XML-фрагмент с описанием элемента и помещать его в ПМД детали.

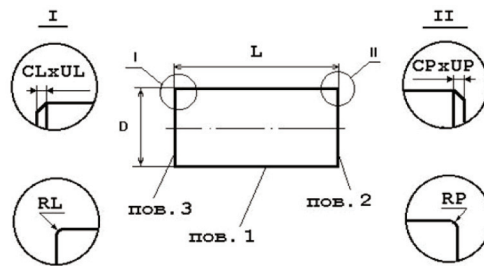


Рис. 1. Комплексный элемент «Цилиндр открытый» (нотация системы «ТИС-Деталь»)

Рассмотрим работу макроса на примере для цилиндра, открытого слева. В рабочем окне макроса в выпадающем списке выбираем необходимую группу элементов, в данном случае это цилиндр, далее выбираем тип элемента – цилиндр, открытый слева. После выбора типа элемента на экран выводится модель элемента и форма, в которой пользователь может задавать значения необходимых параметров (рис. 2). Здесь же для удобства располагается схематическое изображение элемента. Для каждого параметра, кроме номинального значения, может быть введена и точность размера. Все размеры, а также параметры, характеризующие качество обрабатываемых поверхностей КЭ, показываются с помощью аннотаций [3].

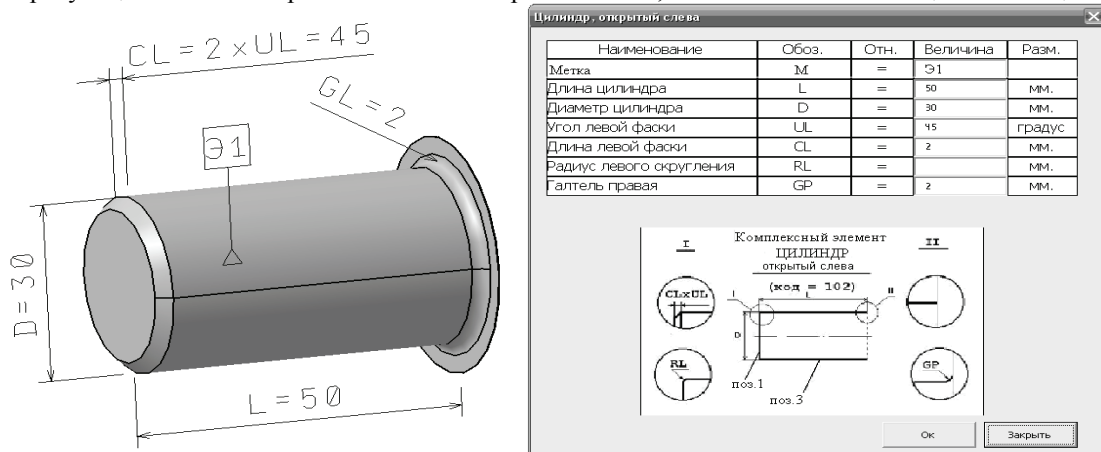


Рис. 2. Окно редактирования для комплексного элемента «Цилиндр, открытый слева» после ввода параметров (нотация системы «ТИС-Деталь»)

Кроме макросов на элементы, разработаны макросы для ввода информация о заготовке, о наличии покрытий, о термообработке и т.д. При необходимости эта информация может быть выведена на экран в виде аннотаций.

С системных позиций деталь представляет собой иерархический объект с переменной структурой. По этой причине параметрическая модель детали может быть выражена как иерархия фреймов, слоты которых отражают параметры детали. Фреймовый подход позволяет описывать ПМД с любой необходимой степенью ее детализации. Формой выражения фреймов выбран XML-формат как удобный для передачи и обработки информации при решении технологических задач. В качестве примера ниже приведена запись двух слотов, выражающих параметры L и D (в таблице) для цилиндра, показанного на рис. 2.

<pre><par> <lev1>3</lev1> <lev2>Э1</lev2> <lev3>102</lev3> <name>Длина цилиндра</name> <oboz>L</oboz> <otn>=</otn> <vel>200</vel> <razm>мм</razm> </par></pre>	<pre><par> <lev1>3</lev1> <lev2>Э1</lev2> <lev3>102</lev3> <name>Диаметр цилиндра</name> <oboz>D</oboz> <otn>=</otn> <vel>100</vel> <razm>мм</razm> </par></pre>
--	--

После завершения конструирования детали графическая и параметрическая модель (в виде XML-документа) могут быть зарегистрированы в PDM-системе «SMARTTEAM» и сохранены в ее электронном архиве. Перед записью в архив ПМД сжимается. Для этого с помощью словаря метаданных из слотов удаляются атрибуты параметров и заменяются системным обозначением параметра. В любой момент параметрическая модель детали может быть вызвана из архива, дополнена атрибутами параметров и передана в систему «ТИС-Деталь» для ее просмотра и редактирования. В этой системе вывод на экран информации о КЭ выполняется в форме, аналогичной той, которая показана на рис. 2.

Совместное использование систем «ТИС-Деталь» и «ТИС-Процесс» дает возможность для каждого КЭ выбирать из базы знаний их типовые планы обработки и, следовательно, автоматически определять те технологические переходы, которые необходимы для получения заданного КЭ, и применяемый инструмент. В результате проведенных исследований можно сделать вывод о возможности интеграции САПР ТП с CAD-системой на основе параметрического моделирования деталей. В дальнейшем предполагается провести комплекс исследований, аналогичный рассмотренным выше, применительно к операционным заготовкам.

1. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч. 1. Общие представления и основополагающие принципы. – Введ. 01.07.2000. – М.: Госстандарт России, 2000. – 16 с.
2. Куликов Д.Д., Гусельников В.С., Бабанин В.С., Шувал-Сергеев Н.А. Проектирование операционных заготовок в среде CAD-систем. Методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 60 с.
3. Комисаренко А.Л. Методические рекомендации по лабораторному практикуму «Создание 3D-аннотаций на виртуальной модели изделия». Методическое пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 30 с.

Куликов Дмитрий Дмитриевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ddkulikov@rambler.ru

Бабанин Виктор Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, vsbabanin@mail.ru

SUMMARY

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES OPTIMIZATION WAYS FOR CCD LINE SENSORS

I. Perl

This article describes internal architecture of CCD line sensor. Dependencies between main sensor parameters are analyzed and the major direction for optimization of this kind of sensors is highlighted.

Keywords: remote sensing of the Earth (RSE), charge-coupled device (CCD), optimization, analysis.

Ivan Pearl – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, j-pearl@mail.ru

RANDOM ERROR EXPERIMENTAL RESEARCH OF OPTICAL ELECTRONIC DOCK FLEXURE METER

A. Aleev, A. Gorbachev, V. Korotaev, A. Pantyushin

The article deals with the scheme and operating principle of optical electronic dock flexure meter intended for continuous automated control of floating dock longitudinal flexure. The results of random error experimental research are presented.

Keywords: floating dock, flexure, optical electronic flexure meter.

Alexey Aleev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, lexmaister@yandex.ru

Alexey Gorbachev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, gorbachev@grv.ifmo.ru

Valery Korotaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, korotaev@grv.ifmo.ru

Anton Pantyushin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pantyushin@ya.ru

ALGORITHM FOR SPACE-TIME SELECTION OF SIGNALS IN ADAPTIVE OBSERVATION SYSTEMS OF MOVING OBJECTS

A. Andreev, N. Burdova, V. Korotaev

The article deals with an algorithm, combining procedures of interframe and intraframe signal processing in automated observation systems of moving objects in complicated background.

The analysis of interconnected factors is given predetermining detection features. Dependencies are given on the basis of which control operational organization of decision rule is possible in the system with the ability of optimization and self-adaptation for algorithm parameters under varying conditions of observation in detection and the following observation regimes.

Keywords: interframe difference signal, spatial filtering, signal accumulation over the area range of variation, detection characteristics, parameters optimization.

Andrey Andreev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, and-andr@yandex.ru

Natalya Burdova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Bagira_koshara@mail.ru

Valery Korotaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, korotaev@grv.ifmo.ru

THE INFLUENCE OF INTEGRATING SPHERE CONFIGURATION ON PHOTOMETRIC MEASUREMENT ERROR OF REFLECTANCE FACTORS

A. Sherstobitova

The analysis of photometer measurement error of reflectance factors for different integrating sphere design is done. The calculation of illuminance inside these spheres and on the sample surface is accomplished. Factors affecting on measurement error are considered. It is established that illuminance on the sample remains practically uniform for all considered sphere designs. The main photometric error is associated with a difference of samples reflection factors. The baffle usage doesn't create the additional photometric error.

Keywords: photometric error, integrating sphere, illuminance, reflectance factor, baffle.

Alexandra Sherstobitova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, ashev87@mail.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

TASK PATTERN CHARACTERISTICS INFLUENCE ON THE HYPOTHESES ADEQUACY, GENERATED BY THE NEURAL NETWORK WITH THE CONNECTIONS BASED ON THE FOURIER-HOLOGRAPHY SCHEME

Z. Bekyasheva, V. Vasilev, A. Vostrikov, A. Pavlov

Influence of task pattern on the inner representation size and its spectral characteristics on the hypotheses adequacy, generated by the neural network with the connections based on the Fourier-holography scheme is considered. It is shown that hypotheses adequacy increases with the growth of generalized pattern frequency.

Keywords: holography, neural network, artificial intelligence, cognitive system.

Zoya Bekyasheva – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, zoya.bekyasheva@phoi.ifmo.ru

Vladimir Vasilev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, D.Sc., Professor, vasilev@mail.ifmo.ru

Alexey Vostrikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, lehav@inbox.ru

Alexander Pavlov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior staff scientist, pavlov@phoi.ifmo.ru

PHOTOINDUCED BRAGG DIFFRACTIVE STRUCTURES CREATION IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL USING ULTRAVIOLET NANOSECOND EXCIMER PULSE LASER

V. Brunov, S. Varzhel, N. Nikonorov, V. Strigalev

The article deals with holographic Bragg gratings creation method in lithium niobate crystals by excimer laser pulse illumination and the possibility of its recording in different modes. The main parameters dependencies of obtained phase holographic elements from power and number of pulses are researched.

Keywords: Bragg gratings, lithium niobate, photorefractive materials, holographic phase gratings.

Vyacheslav Brunov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, brunov@oi.ifmo.ru

Sergey Varzhel – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, vsv187@gmail.com

Nikolay Nikonorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Vladimir Strigalev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Associate professor, vstrglv@mail.ru

RESONANT MEDIUM RADIATION EXCITED BY ULTRA-SHORT LIGHT PULSE

R. Arkhipov, M. Arkhipov, Yu. Tolmachev

Resonant medium radiation, initiated by an ultra-short light is considered. It is shown that under such superluminal excitation in the spectrum of medium radiation there are new frequencies, in addition to the resonance frequency of the medium oscillator. They depend on the spatial frequency oscillator distribution of and the angle of observation.

Keywords: superlight excitation, diffraction, ultra-short light pulse.

Rostislav Arkhipov – Saint Petersburg State University, Postgraduate, arkhpm@mail.wplus.net

Mikhail Arkhipov – Saint Petersburg State University, Head of school laboratory, PhD, wplus.net

Yuri Tolmachev – Saint Petersburg State University, Physics faculty, Professor, D.Sc., Professor, Yurii.Tolmach@rambler.ru

COMPONENTRY AND APPLIANCIES OF TECHNICAL SYSTEMS

POROUS SILICON THIN FILM EFFECT ON SPECTRAL CHARACTERISTIC OF SILICON PHOTODIODE

V. Sokolov, Huynh Cong Tu

Effect of porous silicon thin film formed by anode electrochemical etching of p-type area on spectral characteristic of silicon photodiode has been examined. It is shown that generated porous silicon layer results in significant increase of spectral sensitivity in the whole spectrum. Time modification of photodiode spectral sensitivity has been observed.

Keywords: porous silicon, spectral characteristic, photodiode.

Vladimir Sokolov – Ioffe Physical Technical Institute, D.Sc., Professor

Huynh Cong Tu – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Picochip912@yahoo.com

THE NEMATIC LIQUID CRYSTALS APPLICATION TO QUARTZ RESONATORS STRUCTURAL DEFECTS DETECTING

O. Gabaraev, Yu. Kuporosov, M. Tomilin

The nematic liquid crystals (NLCs) application to quartz resonators structural defects detecting at industrial conditions is described. Natural and artificial quartz structural heterogeneities appearing at technological processing were the subject of investigation. NLCs technique was compared with etching, x-ray and acoustic methods. It was demonstrated that suggested NLC technique is non-destructive in comparison with etching; more accurate in comparison with acoustic method, and as opposed to it, gives the possibility of integrated picture of examined surface parameters; and more expressive and cheap in comparison with x-ray method. NLC technique can be considered as an independent method that gives additional information about the characteristics of objects under investigation.

Keywords: liquid crystals, defectoscopy, surface, structural heterogeneities, non-destructive testing, crystalline quartz.

Oleg Gabaraev – Morion, Inc., process engineer, gabaraev@morion.com.ru

Yury Kuporosov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, i.jadded@gmail.com

Maxim Tomilin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, mgtomilin@mail.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

ANALYSIS OF STATE SPACE STRUCTURE FOR LINEAR BINARY DYNAMIC SYSTEMS BASED ON THEIR RECURRENT MODEL REPRESENTATION

A. Ushakov, E. Yaitskaya

The article deals with problems concerning state space structure of linear binary dynamic systems (LBDS) with stationary positions and closed circles with or without exogenous set sequence on the LBDS enter. The solving task appeared to be connected with specificity of algebraic LBDS state matrix eigenvalue spectrum state, geometric matrix eigenvector spectrum state and depends on index μ which this matrix belongs. The algorithm of LBDS state space structure analysis is offered. The example is given.

Keywords: binary dynamic system, state space structure, eigenvector, index accessory, stationary states, closed cycles.

Anatoly Ushakov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ushakov-AVG@yandex.ru

Elena Yaitskaya – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, yaitskayaes@mail.ru

SIMULATION OF CURRENT SOURCE CIRCUIT FOR PUMPING OF SOLID-STATE LASERS

V. Togatov, E. Solozhina, R. Sidorov

Discharge maintenance circuit in solid-state lasers pump lamps is proposed. Mathematical model of electrical processes in circuit is developed. As a result, calculation technique of circuit components values was presented and its volt-ampere characteristic was created. Condition for getting maximal switching frequency value in the circuit was formulated.

Keywords: current source, laser pump lamp, discharge maintenance, volt-ampere characteristic, condition of maximal switching frequency.

Vyacheslav Togatov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc, v.togatov@mail.ru

Elena Solozhina – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, elena.solojina@yandex.ru

Rostislav Sidorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, girmpo@yandex.ru

MOBILE DIRECTIONAL SURVEY STATION FOR OPERATIVE SPATIAL BINDING OF THE UNDERGROUND OPENING BLASTING BOREHOLE GROUP

Ya. Binder, V. Denisov, A. Eliseenkov, V. Rozentsvein

The paper describes the structure of the mobile directional survey station, algorithms and software used for continuous directional survey of the relative position of shaft trajectories of the underground opening blasting borehole group. New engineering solutions obtained at the station design are presented and analyzed. The results of the station field tests in ore excavation environment are presented.

Keywords: geodesic binding, underground opening, directional survey station, trajectory, borehole.

Yakov Binder – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, vrozensvein@eprib.ru

Victor Denisov – JSCo "Electromechanica", Deputy General Director, D.Sc., Associate professor, denvm@elmech.ru

Alexander Eliseenkov – Concern CSRI Elektropribor, JSC, senior staff scientist, PhD, Associate professor, sasha0103@mail.ru

Vladimir Rozentsvein – Concern CSRI Elektropribor, JSC, group head, PhD, vrozentsvein@eprib.ru

MECHANICS AND MECHATRONICS

RESEARCH OF NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS WITH THREE DEGREES OF FREEDOM

S. Ivanov

The mathematical model of dynamic system with three degrees of freedom, with nonlinear right members in the form of polynomials to the fourth degree from phase variables with constant and periodic parameters is considered. The system movement equations are reduced to an autonomous form by the method of polynomial transformations. The essential constants characterizing transient and determined oscillation modes are defined. The algorithm of a polynomial transformations method and algorithmic formulas of program realization are given.

Keywords: nonlinear system with three degrees of freedom, methods of nonlinear systems research, determined oscillation mode.

Sergey Ivanov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, SIvanov@mail.ifmo.ru

DESIGN FEATURES OF THE LARGE-SIZED ELECTRIC DRIVE ON THE BASIS OF WAVE GEARINGS

S. Prokshin, E. Shalobaev

Reducer design with wave gearing and flexible bearings which allows reducing additionally mass dimensions of electric drive parameters of shut-off pipeline armature is offered.

Keywords: electric drive, reducer, wave gearings, flexible bearings, crosspiece.

Sergey Prokshin – Ufa State Aviation Technical University (USATU), Associate professor, PhD, Associate professor, okmim@ugatu.ac.ru

Evgeniy Shalobaev – **Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics**, Head of Academy for Management Methods and Technologies (LIMTU), Professor, PhD, Associate professor, shalobaev47@mail.ru

DIFFERENTIAL CAPACITIVE DISPLACEMENT PICKUP WITH ADDITIONAL OUTPUT FOR THE GAP CHANGE DATA

R. Lyukshonkov, N. Moiseev

Differential capacitive displacement pickup block diagram of a micromechanical gyroscope moving mass is considered. The problem of the gap between pickup electrodes and moving mass changes under the external influence is analyzed. The distinguishing feature of the pickup diagram is an additional signal which compensates changes of the gap. Experimental results of the displacement pickup model are presented.

Keywords: differential capacitive displacement pickup, micromechanical inertial sensors, external influence compensation, gap between electrodes.

Roman Lyukshonkov – Concern CSRI Elektropribor, JSC, engineer, lukroma@yandex.ru

Nikolay Moiseev – Concern CSRI Elektropribor, JSC, engineer, elmon@nwgsm.ru

RESEARCH OF THE MEMS GYRO DYNAMICS UNDER THE MECHANICAL IMPACTS

M. Evstifeev, D. Eliseev, D. Rozentsveyn, A. Kovalev

Investigation results of the MEMS gyro sensing element dynamics are given. The dependence of device characteristics due to the inertial impacts and the value of instrumental errors, including static and dynamic unbalance and unequal stiffness are shown. Experimental tests of MEMS gyro on the centrifuge and the vibrating table have been executed and obtained analytical dependences have been confirmed.

Keywords: micromechanical gyroscope, elastic suspension, unbalance, unequal stiffness, vibration.

Mikhail Evstifeev – Concern CSRI Elektropribor, JSC, Head of Design Department, D.Sc.,

Associate Professor, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru, mevstifeev@eprib.ru

Daniil Eliseev – Concern CSRI Elektropribor, JSC, design engineer, eliseev.dp@gmail.com

Dmitry Rozentsvein – Concern CSRI Elektropribor, JSC, research engineer, Rosenzwein@mail.ru, office@eprib.ru

Andrey Kovalev – Concern CSRI Elektropribor, JSC, senior researcher, PhD, askovalev@gmail.com

MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

ANALYSIS AND ACCOUNTING OF COLLIMATION DISTORTIONS AT SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING INTENSITIES ON ORIENTED HOMOGENEOUS CYLINDERS. INFLUENCE ESTIMATION OF AN EXPERIMENTAL ERROR ON COLLIMATION RECALCULATION QUALITY

A. Smirnov, D. Zakharov, B. Fedorov

Intensities of small-angle X-ray scattering on oriented homogeneous cylinders have been obtained and collimation distortions were put into them. Initial scattering intensities have been reconstructed based on

previously developed collimation converting methods and these intensities were compared with unaltered ones. It has been shown that relative error found in this case is a few percent that indicates the high quality of the collimation conversion. It has also been shown that introduction of statistical noise of 1% and 4% into distorted scattering intensity - which corresponds to real conditions of X-ray experiment - only slightly worsens coincidence between the original and reconstructed scattering intensities.

Keywords: small-angle X-ray scattering, oriented homogeneous cylinders, method of the basic functions, iterative Friedman method.

Alexander Smirnov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD., Associate Professor, smirnav@phd.ifmo.ru

Denis Zakharov – Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, denzakharov@gmail.com

Boris Fedorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, borfedorov@rambler.ru

NEAR-FIELD TERAHERTZ PROBES BASED ON POINTED METAL GUARDS WITH DIFFRACTION GRATINGS

M. Tinskaya, A. Denisyuk

We propose new design of a near-field terahertz probes based on pointed metal guards with diffraction gratings. Diffraction grating application allows enhancing efficiency of a near-field probe. The effect is based on the constructive interference of the wave diffracted on the grating and the wave directed to the tip of the probe. Design parameters analytical calculations of the terahertz probe with a diffraction grating and numerical modeling of electrodynamics by finite difference method are presented in the paper. The possibility of such probes fabrication based on electrochemical etching is experimentally considered.

Keywords: near-field terahertz microscopy, near-field terahertz probes, surface electromagnetic waves.

Maria Tinskaya – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, mashulik1@gmail.com

Andrey Denisyuk – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, aidenisyuk@gmail.com

OPTICAL ANTENNA-PROBES BASED ON METALLIC NANOSHELLS

A. Karaev, A. Denisyuk

We investigate the possibility of using complex metallic nanostructures based on metallic nanoshells as near-field optical probes. Due to the effect of plasmon resonance such structures are able to effectively concentrate the energy of incident optical radiation to a subwavelength area. We present the results of numerical modeling of optical antennas electrodynamics performed by finite difference time-domain method. Also we investigate the ways of experimental fabrication of such nanostructures.

Keywords: near-field optical microscopy, optical antennas, metallic nanoparticles.

Alexander Karaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, golden_sand@mail.ru

Andrey Denisyuk – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, aidenisyuk@gmail.com

ON TUNGSTEN PROBES STABILITY UNDER SPM OPERATION IN THE MODES OF DYNAMIC FORCE LITHOGRAPHY AND NANOINDENTATION

A. Golubok, A. Pinaev, A. Feklistov, S. Chivilikhin

Stability of tungsten probe under the influence of longitudinal mechanical stress arising while scanning probe microscope operation in the modes of dynamic force lithography and nanoindentation is studied. Within the proposed theoretical model the expression for critical force of longitudinal compression is obtained, which exceeding leads to stability loss and probe bending. Experimental data obtained in the SPM with force interaction piezoresonance sensor, showing stable and unstable behavior of the W probe for NI and DSL surface of polycarbonate.

Keywords: scanning probe microscopy, dynamic force lithography, nanoindentation, piezoresonance probe sensor.

Alexander Golubok – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, Professor, D.Sc., golubok@ntspb.ru

Alexander Pinaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, pinaich@mail.ru

Andrey Feklistov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, feklstoff@yandex.ru

Sergey Chivilikhin - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, D.Sc., Professor, chivilikhin@gmail.com

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

MULTI-AGENT APPROACH TO THE UNINFORMED SEARCH TASK SOLUTION

I. Bessmertny, K. Bulygin

The paper proposes an approach to search on decision tree, based on using a set of traffickers (agents), having swarm intelligence. The experience of each agent's trip is to be stored and the best solutions build the route database, available for all agents. In contrary to the traditional search methods this approach gives satisfactory solutions pretty quickly. The proposed method could be useful if the traffickers are able to get and share the reached experience from/to the common online database.

Keywords: search task, agents, swarm intelligence.

Igor Bessmertny – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, igor_bessmertny@hotmail.com

Kirill Bulygin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kirill.bulygin@gmail.com

GENETIC ALGORITHMS IN TEST DATA GENERATION FOR PROGRAMS CONTAINING EXCEPTION HANDLING

A. Karpushinsky, T. Pavlovskaya

The paper describes the problem of automatic test data generation for programs written in object-oriented language and containing exception handling structures. Advantages of genetic algorithms for searching the input data are described. An algorithm adapted for integration testing of object-oriented code is offered.

Keywords: automated test data generation, exception handling, genetic algorithms.

Anton Karpushinsky – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, nochnik@inbox.ru

Tatiana Pavlovskaya – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Professor, pta-ipm@yandex.ru

LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES

INVESTIGATION OF OPTICAL RADIATION IMPACT ON BIOLOGICAL TISSUES AND LASER SYSTEMS ELEMENTS

A. Belikov, A. Skripnik, T. Strunina, K. Shatilova

The results of hard human teeth tissues treatment by YLF: Er diode-pumped laser pulses are presented for the first time. The pulse duration of YLF: Er laser with wavelength of 2,81 μm was 1,4 ms. The removal efficiency of enamel and dentin of human tooth, diameter, depth and aspect ratio of craters formed in the hard tissues of human tooth under the influence of this laser radiation are measured for the first time *in vitro*.

Keywords: YLF: Er laser, dentine, enamel, human tooth, laser texturing, microdrilling, removal efficiency, aspect ratio.

Andrey Belikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, meddv@grv.ifmo.ru

Alexey Skripnik – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, alesch_skripnik@mail.ru

Tatiana Strunina – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, struninatatiana@mail.ru

Ksenia Shatilova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, kshatilova@mail.ru

LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES

INVESTIGATION OF MULTIFREQUENCY LASING OF COMPACT DIODE PUMPED SOLID STATE LASERS IN MID-IR WAVELENGTH REGION

M. Inochkin, V. Nazarov, D. Sachkov, L. Khloponin, V. Khramov, N. Fedorov

The results of investigation of lasing at wavelengths 2,66, 2,71 and 2,81 μm in Er:YLF with pulse-periodical diode pumping at wavelength 0,98 μm are presented. The strong dependence of lasing delays at separate lasing wavelengths from pumping pulse repetition rate was observed. Also the lasing termination at wavelengths 2,66 and 2,71 μm with rising of pumping pulse repetition rate was observed. The new way of lasing spectrum variation was suggested.

Keywords: erbium, laser, diode pumping, multifrequency lasing, pulse-periodical mode.

Mikhail Inochkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, m_inochkin@mail.ru

Vyacheslav Nazarov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, v_v_nazarov@mail.ru

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

Leonid Khloponin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, l_khloponin@yahoo.com

Valery Khramov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, vkhrarov@gmail.com

Nikita Fedorov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, nikifedorov@mail.ru

COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

GRAPH-ANALYTICAL MODELS FOR CAD COMPUTING PROCESSES

A. Zykov, A. Bezroukov, O. Nemolochnov, V. Polyakov, A. Andronov

The article deals with graph-analytical models (GAM) for verification of computing processes in CAD. An example of complex cubic covering generation based on GAM for acyclic computing process is given; a task for test sets synthesis based on cubic coverings has been formulated.

Keywords: graph-analytical models, verification of computing processes, cubic coverings, testing.

Anatoly Zykov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Associate Professor, PhD, zykov_a_g@mail.ru

Alexander Bezroukov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Postgraduate, versus1945@list.ru

Oleg Nemolochnov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Department head, Professor, D.Sc., Professor, nemolochnov_o_f@mail.ru

Vladimir Polyakov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, v_i_polyakov@mail.ru

Alexey Andronov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Postgraduate, starsabre@mail.ru

PARALLEL STRUCTURES FOR COMPUTING PROCESSES CONTROL IN CAD

O. Nemolochnov, A. Zykov, V. Polyakov, A. Makedonskiy

The report deals with computing processes defined by a set of parallel structures, generated by suggested structuring method for software verification in CAD.

Keywords: computing processes structuring, graph-analytical models.

Oleg Nemolochnov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Department head, Professor, D.Sc., Professor, nemolochnov_o_f@mail.ru

Anatoly Zykov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Associate Professor, PhD, zykov_a_g@mail.ru

Vladimir Polyakov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, v_i_polyakov@mail.ru

Alexey Makedonskiy – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Postgraduate, alexeymakedonskiy@gmail.com

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

DIGITAL CERTIFICATES AND SSL/TLS PROTOCOLS FOR DATA ENCRYPTION IN CLOUD COMPUTING

M. Becker, A. Terentiev, Yu. Gatchin, N. Karmanovsky

Application of digital certificates and SSL/TLS protocols for data encryption in cloud computing is described in the article. Basic methods and features of digital certificates use for encryption of network connections are described. Approach to suitable method choice for different cloud computing systems is given.

Keywords: cloud computing, cloud computing security, digital certificate, encryption, SSL, TLS, PKI.

Michael Becker – Microsoft Deutschland GmbH, Principal Consultant, mbecker@microsoft.com

Andrey Terentiev – Legislative Assembly of Saint Petersburg, Senior Deputy Assistant, 9444828@mail.ru

Yuri Gatchin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, gatchin@mail.ifmo.ru

Nikolay Karmanovsky – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, karmanov50@mail.ru

SPECIAL FEATURES OF THE THREATS DETECTORS STRUCTURE FOR PROTECTED OBJECT

V. Volkhonskiy, A. Krupnov

Possible influences and impacts on detection tools are analyzed. Approach is proposed for taking into account the mentioned influences and impacts for correct choice of detectors structure parameters. Limitations of multi loops method are shown. Recommendations for organization of detectors structure are formulated.

Keywords: treats, detection tools, security system, protected object.

Vladimir Volkhonskiy – ZAO Honeywell, Security systems sector leader, PhD, volkhonski@mail.ru

Aleksey Krupnov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, krupnov@list.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

INTERACTIVE TRAINING TECHNOLOGIES FOR THE SOCIAL AND HUMANIST DISCIPLINES OF THE UNIVERSITY

T. Novolodskaya

The article considers formation problems of the communicative space on the basis of interactive learning technologies in the system of socio-humanitarian knowledge. The interest here is focused on the search of effective ways for both training and educational processes. Some types of educational activities with the use of Internet-resources and the opportunities of virtual space are analyzed. Their role in the development of creative potential of students and teachers is explained. It is shown that their use in the educational discourse helps to solve the most important problems the higher school is faced with.

Keywords: social and humanist knowledge, interactive technologies, virtual space, business games, simulation exercises, metaphor, intentional explanation, existential truth.

Tatiana Novolodskaya – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate Professor, PhD, Associate Professor, m_nov_Lodn@mail.ru

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

APPLICATION FEATURES OF DIFFERENT SERVICE PROMOTION TOOLS IN THE MARKET

O. Tsukanova

The article is dedicated to the problem of publicity-publishing service promotion. The main effective promotion tools for given types of business service are described, practical recommendations for their better use are given. The emphasis is made on the improving of the enterprise image in the society.

Keywords: personal sale, advertising, publicity-publishing services, promotion, sales promotion.

Olga Tsukanova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, zoa1999@mail.ru

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR BUSINESS PROCESSES EXECUTION OF THE SERVICE NOTES FOR “GAZPROM TRANSGAZ ST. PETERSBURG” LIMITED COMPANY

D. Kurochkin

The article deals with management task of mechanism optimization for accounting of service notes with request for modification of referenced data directories, arisen within the limits of realization of “Gazprom” Informatization strategy in the course of creation of information-operating system (IOS) SAP R/3 for subsidiary company “Gazprom transgas St. Petersburg”. Referenced data efficient control, being an information kernel of any IOS, demands from the accounting mechanism of service notes an irreproachable realization. The project urgency is caused by insufficient development of the existing accounting mechanism of service notes and a set of problems which initiators and executors of service notes during their official duties are faced with. The corporate distributed system of the service notes accounting has been developed for the effective task decision.

Keywords: optimization of business processes, referenced data management, service notes accounting, informatization strategy, software development.

Dmitry Kurochkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, d.e.kurochkin@gmail.com

FROM THE HISTORY OF SCIENCE AND TECHNIQUE FORMATION OF OPTICAL INDUSTRY IN RUSSIA IN 1905-1917 YEARS

A. Orlov

The article contains formation problems of the optical industry in pre-revolutionary Russia. Principal difficulties of this industry development are investigated. State policy features in this area, dependence of national development from local needs in optical devices are stated. The article is aimed for everyone who is interested in history of national optical production and related social processes.

Keywords: industrial development, optical production, state policy, social processes.

Alexey Orlov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, mobus@mail.ru

DISCUSSION ABOUT THE PECULIARITIES OF THE RUSSIAN INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE EARLY TWENTIETH CENTURY IN NATIONAL HISTORIOGRAPHY OF THE SECOND HALF OF THE TWENTIETH CENTURY

S. Korotkov

The article is devoted to the history of the Russian industry in the beginning of the twentieth century; the focus is unfolded in national historiography of the debate about the level of capitalism development in Russia. This discussion, not exhausted itself and experienced a political and ideological influence, helped to create a new system approach to the history of industry in Russia, the inclusion in the global context. Especially this contributes to a new theoretical basis for the concept of a "new direction". Achievements of the national

historiography of the second half of the twentieth century are updated in connection with developing the modern research, in particular, the study of optical industry formation in Russia.

Keywords: the Russian industry in the beginning of the twentieth century, development features of capitalism in Russia, historiography, "a new direction."

Sergey Korotkov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, korotkovsn@yandex.ru

BRIEF REPORTS

FLUORIDE OF NANOCERAMICS

A. Korobeynikov, Yu. Gatchin, V. Tklich, K. Dukel'sky

Properties of fluoride optical nanoceramics are considered and recommendations about their application are made.

Keywords: fluoride optical nanoceramics, optical elements.

Anatoly Korobeynikov – Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SPbRC RAS), Deputy director for science, Professor, D.Sc., Professor, Korobeynikov_A_G@mail.ru

Yuri Gatchin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, Gatchin@mail.ifmo.ru

Vera Tklich – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, Vera_Leonidovna_Tklich@mail.ru

Konstantin Dukel'sky – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, KDukel@GOI.ru

MULTICHANNEL OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR BUILDING DEFORMATION MONITORING

S. Mikheev, A Usik, E.Kuleshova

Design of the multichannel optical-electronic deformation control system (OES) of industrial buildings is described. This system is a set of measuring television channels with overlapping angled fields and active marker control points (CP). The system provides for cross-linkages within the measuring feedback channels.

Keywords: optical-electronic system for building deformation monitoring.

Sergey Mikheev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, msv@grv.ifmo.ru

Alexander Usik – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, usik.aa@gmail.com

Ekaterina Kuleshova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, enkuleshova@mail.ru

OUTPUT CONTROL FOR LINEAR PLANT WITH UNKNOWN PARAMETERS AND DYNAMICAL ORDER

A. Bobtsov, A. Pyrkin

Output control approach for linear plants with unknown parameters and dynamical order of mathematical model is discussed. The new control law is proposed for uncertain systems that belong to more general class of assumptions compared with analogs.

Keywords: output control, parametric uncertainty, unknown dynamical order.

Alexey Bobtsov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

Anton Pyrkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, PhD, a.pyrkin@gmail.com

BANK FORMATION OF CHECK MATRICES FOR SYSTEMATIC NOISE-IMMUNE CODE BY A MATRIX MULTIPLICATIVE COMPONENT

A.Ushakov, E. Yaitskaya

Bank of check matrices for systematic noise-immune code is formed with the help of a nondegenerate matrix multiplicative component.

Keywords: anti-interference code conversion, check and generator matrix.

Anatoly Ushakov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ushakov-AVG@yandex.ru

Elena Yaitskaya – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, yaitskayaes@mail.ru

INVESTIGATION OF LASING PARAMETERS OF DIODE PUMPED SOLID STATE ERBIUM MICROLASERS**I. Dubinkin, M. Inochkin, N.Lonschakova, V. Nazarov, D. Sachkov, L. Khloponin, V. Khramov**

The passive Q-switching of diode-pumped Er:YLF microlaser was realized for the first time in the current work. With f Fe²⁺:ZnSe crystal use the giant pulses with energy 2.9 mJ and duration 30 ns at wavelength 2.81 um were observed.

Keywords: erbium, laser, selective pumping, Fe²⁺:ZnSe, passive Q-switching.

Il'ya Dubinkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ilyadubinkin@mail.ru

Mikhail Inochkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, m_inochkin@mail.ru

Nataliya Lonschakova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Tasha271264@yandex.ru

Vyacheslav Nazarov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, v_v_nazarov@mail.ru

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

Leonid Khloponin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, l_khloponin@yahoo.com

Valery Khramov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, vkhramov@gmail.com

DEVELOPMENT OF SMALL-SIZE SHOCK BENCH FOR MEMS TESTING**D. Eliseev, V. Serebryakov, A. Chapurskiy**

Development capability of small-size shock bench for MEMS testing on resistance to high impacts (thousands of G's) has been justified; selection methods of fundamental and structural solutions have been designed. General features of developed bench have been calculated and ability to reach acceleration over than 10000 G on relatively low-speed collisions with acceptable impulse duration has been proved. Preliminary computations have shown that limits expansion of measured bench parameters and structure optimization could sufficiently increase level of reproduced acceleration in 3-4 times.

Keywords: micromechanical gyro, impact, bench, acceleration.

Daniil Eliseev – Concern CSRI Elektropribor, JSC, design engineer, eliseev.dp@gmail.com

Valentin Serebryakov – Concern CSRI Elektropribor, JSC, design engineer, new2006box@rambler.ru

Aleksey Chapurskiy – Concern CSRI Elektropribor, JSC, design engineer, alexchap3@yandex.ru

DETAIL PARAMETRIC MODEL CREATION IN CAD-SYSTEM MEDIUM**D. Kulikov, V. Babanin**

The article deals with the possibility of CAD-systems use in the design of details parametric models. Macro is presented and allow developing the parametric models in CATIA V5 system. A method of saving information about the parametric model of the CAD-system in an automated design process is described.

Keywords: constructive element, detail parametric model, complex element, 3D-annotation, XML-document.

Dmitry Kulikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ddkulikov@rambler.ru

Victor Babanin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, vsbabanin@mail.ru

Уважаемые читатели!

«Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» 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 - 120 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 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

На журнал «Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» 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/>