

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КРУГОВОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ФОТОШАБЛОНОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

© 2016 г. А. В. Кирьянов*, канд. техн. наук; В. П. Кирьянов*, доктор техн. наук;
И. В. Волохов**, канд. техн. наук; А. В. Бобков***, канд. техн. наук

*Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск

**Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза

***Научно-производственное предприятие “Геофизика-Космос”, Москва

E-mail: alexey@iae.nsk.su

Проанализированы результаты формирования и контроля топологии фотошаблонов интегральных датчиков давления и угла поворота, полученные с помощью технологического и измерительного оборудования, работающего в полярной и декартовой системах координат. Показано, что для повышения точности изготовления и контроля данных изделий целесообразно использовать оборудование, реализующее метод кругового сканирования.

Ключевые слова: лазерный генератор изображений, метод кругового сканирования, фотошаблон, интегральный датчик.

Коды OCIS: 230.4000, 230.0250, 230.0040, 120.5475

Поступила в редакцию 16.02.2016

Введение

Интегральные датчики физических величин (ИДФВ) являются важнейшими элементами высокоточных систем управления и контроля в ракетно-космической, авиационной технике и других отраслях промышленности. К ИДФВ относятся датчики давления, расхода, ускорения, угла поворота и др.

Одним из основных технологических этапов производства ИДФВ является процесс изготовления прецизионных фотошаблонов (ПФШ), используемых для формирования топологии чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков. Известно, что погрешность изготовления ЧЭ вносит основной вклад в результирующую погрешность ИДФВ. Поэтому создание ПФШ является актуальной задачей технологического процесса изготовления ИДФВ.

В настоящее время для формирования топологии ПФШ большинство производителей ИДФВ, в их числе и ОАО “НИИ физических измерений” (НИИФИ), используют технологии и оборудо-

вание, созданное для нужд микроэлектронной промышленности и работающее в декартовой системе координат [1, 2]. В то же время топология ИДФВ характеризуется наличием большого числа элементов, ориентированных в пространстве в широком диапазоне углов. К точности взаимного расположения элементов на всей поверхности ЧЭ предъявляются более высокие требования, чем в случае чипов интегральных схем. Кроме того, в большинстве случаев ИДФВ отличаются большими размерами самого ЧЭ. Но, как правило, им характерна существенно меньшая насыщенность элементами топологии на единицу площади ЧЭ. Эти особенности создают реальные предпосылки для использования иных подходов к решению проблемы повышения точности ИДФВ.

В статье на примере формирования топологии ПФШ-датчиков давления и угла поворота и последующего контроля точности их изготовления показана перспективность использования метода кругового сканирования в целях снижения погрешности ИДФВ.

1. Использование метода кругового сканирования для формирования топологии фотошаблонов датчиков давления

Оценка перспективности использования этого метода проверялась на примере создания тензорезисторных тонкопленочных датчиков модели ЭДДВ-303. На рис. 1 приведены топология и характеристические размеры ЧЭ интегрального датчика. Размеры тензорезисторов, используемых в ЧЭ, составляют $0,2 \times 0,4$ мм. Расчетная допустимая погрешность формирования элементов топологии $\delta \approx 0,5$ мкм. Для создания ЭДДВ-303 необходим комплект из двух фотошаблонов. На первом этапе формируется топология резистивного слоя, на другом – контактного. После последовательного формирования на подложке обоих слоев получается ЧЭ датчика.

Традиционно фотошаблоны для датчиков давления в НИИФИ изготавливаются на оборудовании, работающем в декартовой системе координат. До недавнего прошлого это был координатограф КПА-1200, формирующий фотошаблоны с 10^{\times} увеличением, а сейчас – лазерный генератор изображений (ЛГИ) модели DWL66fs фирмы *Heidelberg Instruments* (Германия), формирующий фотошаблоны в натуральную величину. Для сравнительных испытаний использовались комплекты фотошаблонов, изготовленных в натуральную величину с помощью ЛГИ CLWS-300/C [3, 4], работающего в полярной системе координат.

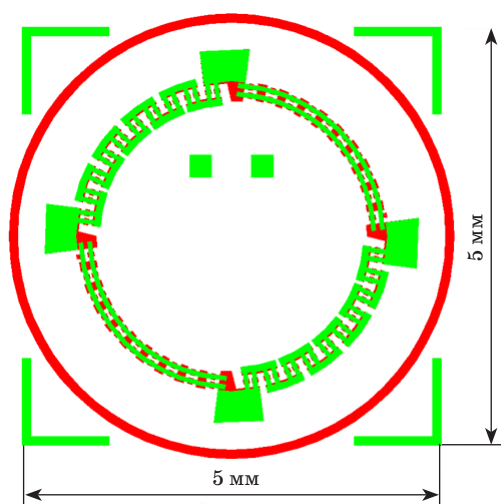


Рис. 1. Топология ЧЭ интегрального датчика давления. Габаритные размеры тензорезисторов – $0,2 \times 0,4$ мм.

Эффективность технологического оборудования, используемого в испытаниях, определялась путем оценки разброса значений сопротивлений (номиналов) получаемых тензорезисторов, входящих в измерительные плечи моста датчика ЭДДВ-303. Данная методика традиционно используется в НИИФИ, так как экспериментально выявлено, что повышение точности изготовления тензорезисторов позволяет снизить дестабилизирующий вклад технологического оборудования в аддитивную составляющую температурной погрешности датчиков давления.

В таблице представлены результаты контроля тензорезисторов ЧЭ. Анализ результатов показал, что среднее значение разброса номиналов тензорезисторов, изготовленных с помощью координатографа КПА-1200, составляет 19,2 Ом (около 2,83% от номинала), а с использованием ЛГИ CLWS-300/C – 10,9 Ом (около 1,7%), т.е. в 1,8 раза меньше, а с использованием ЛГИ DWL66fs – 8,93 Ом (около 1,3%), т.е. в 2,1 раза меньше.

Причины разброса номиналов тензорезисторов могут быть разные. Во-первых, каждая технологическая установка имеет присущую ей погрешность формирования границ топологических элементов. Так, неопределенность границ элементов на ПФШ, сформированных с помощью КПА-1200, составляет порядка ± 10 мкм. При переносе изображения фотошаблона на подложку с уменьшением в 10^{\times} в идеале можно ожидать снижение неопределенности положения границ топологических элементов до ± 1 мкм. В то же время неопределенность границ топологических элементов на фотошаблонах, сформированных с помощью CLWS-300/C, составляет $\pm 0,144$ мкм. Нельзя не учитывать

Результаты измерений сопротивлений тензорезисторов экспериментальных образцов датчиков давления ЭДДВ-303

Объект контроля	R_{av} , Ом	$ R $, Ом	R/R , %
Тензорезисторы, изготовленные на КПА-1200	678,3	19,2	2,83
Тензорезисторы, изготовленные на ЛГИ CLWS-300/C	641,9	10,9	1,7
Тензорезисторы, изготовленные на ЛГИ DWL-66fs	686,6	8,93	1,3

Примечание. R_{av} – среднее значение сопротивлений тензорезисторов, $|R|$ – среднее значение разброса значений сопротивлений тензорезисторов, R/R – относительный разброс значений сопротивлений терморезисторов.

искажения, связанные со сбоями оборудования, при формировании топологии ЧЭ. На рис. 2 приведены в масштабе $150\times$ фотографии фрагментов топологии ЧЭ, изготовленных на упомянутом выше технологическом оборудовании. На рис. 2а стрелкой указано одно из искажений топологии ЧЭ, сформированного с помощью КПА-1200, приводящих к изменению размеров тензорезисторов, входящих в измерительные плечи моста. На фрагменте топологии ЧЭ, сформированного по методу кругового сканирования (рис. 2б), таких явных искажений формы элементов схемы не наблюдалось. Однако послеоперационный анализ процесса синтеза микроструктуры ЧЭ датчика давления выявил отклонения в совмещении фотошаблонов резистивного и контактного слоев на 15–25 мкм, которые возникли из-за неточности масштабирования рисунков при изготовлении каждого слоя. Ошибка оператора, естественно, привела к искажению топологии ЧЭ. По мнению технологов, без этой ошибки можно было ожидать получение более совершенной топологии ЧЭ и меньший разброс значений сопротивлений тензорезисторов в измерительных плечах моста.

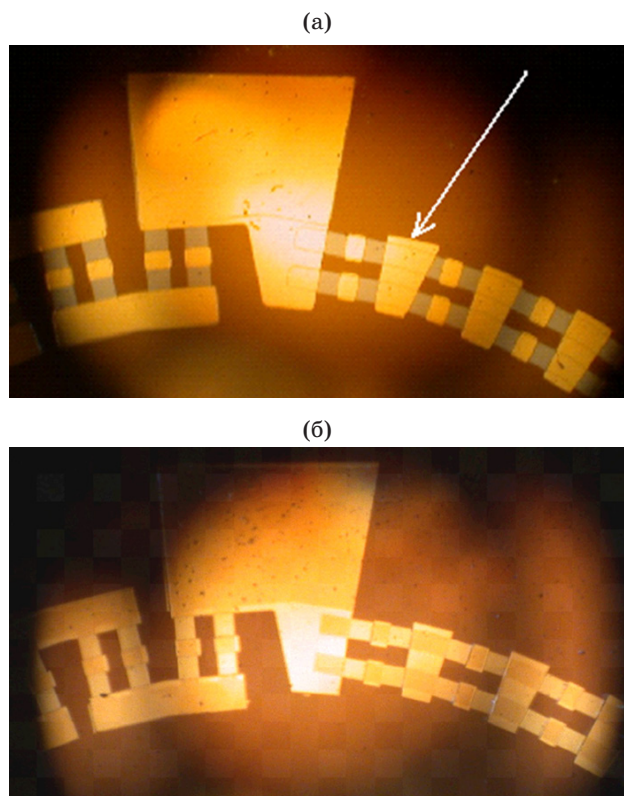


Рис. 2. Фрагменты топологии ЧЭ, изготовленных с использованием КПА-1200 (а) и ЛГИ CLWS-300/С (б). Стрелкой указано искажение топологии ЧЭ.

Лучшие результаты в настоящее время получены при использовании ЛГИ DWL66fs. Это оборудование позволяет при формировании топологии фотошаблонов ИДФВ иметь неопределенность положения границ топологических элементов порядка $\pm 0,12$ мкм, что определяет разброс номиналов сформированных тензорезисторов в пределах 1,3%. По мнению авторов статьи, подобный результат достигается в ЛГИ DWL66fs за счет развитой системы коррекции положения луча лазерных интерферометров, работающей в реальном времени. Благодаря ей обеспечивается более высокая точность позиционирования рабочего столика с обрабатываемой подложкой. В ЛГИ CLWS-300/С, работающем в полярной системе координат, такой системы нет, и реализация подобной функции может стать дополнительным резервом повышения точности формирования микроструктур.

2. Использование метода кругового сканирования при формировании и контроле топологии фотошаблонов прецизионных датчиков угла поворота

Как и в предыдущем разделе статьи, перспективность использования данного метода в целях создания высокоточных угловых датчиков проверялась путем сравнения погрешности синтеза радиальных растров с одинаковыми параметрами (среднее значение сопротивлений тензорезисторов $R_{av} = 40,5$ мкОм, число штрихов $n = 6000$, период штрихов $W = 40,2$ мкм), но изготовленных по альтернативным технологиям: с помощью ЛГИ CLWS-300/С [3, 4], работающего в полярной системе координат и реализующего принцип кругового сканирования, и с помощью комплекса ЭМ-589 (разработка ГНПО «Планар», Минск, Беларусь), работающего в декартовой системе координат и реализующего принцип микрофотонабора изображений.

Изготовленные образцы кодирующих узлов датчика контролировались с помощью углоизмерительной установки АС-700 (УОМЗ, Екатеринбург). На рис. 3 приведена упрощенная структурная схема этой установки.

На рабочей поверхности лимба 3 нанесена метка начала оборота и измерительный растр, имеющий 28800 штрихов. Оптико-электронная система 4 состоит из пяти считывающих головок, из которых четыре используются для считывания данных с измерительного растра, а одна – с метки начала оборота. Измерение по-

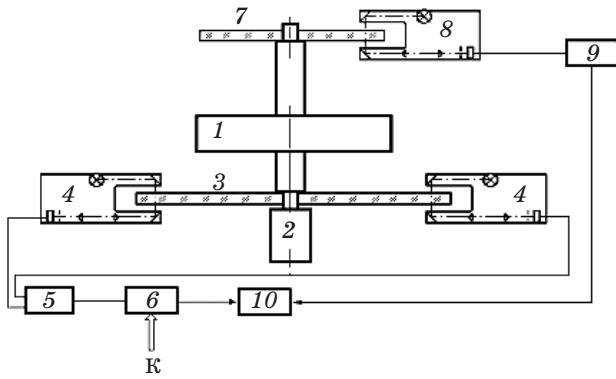


Рис. 3. Схема установки контроля лимбов АС-700. 1 – аэростатический шпиндель, 2 – двигатель вращения, 3 – эталонный лимб, 4 – оптико-электронная система считывания данных, 5 – электронный блок формирования опорной сетки частот, 6 – блок формирования виртуальной опорной шкалы, 7 – контролируемый лимб, 8 – подвижная оптическая система считывания данных, 9 – электронный блок формирования счетных импульсов из выходных сигналов системы 8, 10 – компьютер.

грешности лимба 7 происходит при непрерывном вращении шпинделя 1. Априорная информация о числе штрихов контролируемого лимба вносится в блок 6. На основе этой информации блок синтезирует выходные импульсы виртуальной прецизионной шкалы, число которых точно равно числу формируемых в блоке 9 импульсов контролируемого лимба. Выходные сигналы из блоков 6 и 9 поступают в управляющий компьютер 10, который формирует результат измерения [5].

Для повышения точности измерений за счет устранения из результатов измерений вклада, вносимого самой установкой АС-700, использовался фазо-статистический метод [6]. Суть метода состоит в том, что у двух шкал измеряют $\Delta\Phi_i$ – смещение штрихов одной шкалы относительно штрихов другой. Результат измерения запоминают в виде файла данных F_1

$$F_1 = \{\Delta\Phi_1, \dots, \Delta\Phi_i, \dots, \Delta\Phi_n\}, \quad (1)$$

где порядок размещения измеренных данных привязан к некоторому реперу, например, метке начала оборота одной из шкал.

Фазовый сдвиг $\Delta\Phi_i$ между соответствующими штрихами обеих шкал может быть представлен тремя слагаемыми

$$\Delta\Phi_i = \Delta\Phi_0 + \delta\varphi_{i1} + \delta\varphi_{i2}, \quad (2)$$

где $\Delta\Phi_0$ – постоянный сдвиг, обусловленный случайным взаимным положением лимбов 3 и 7 при установке последнего на шпиндель 1

(в дальнейшем эта составляющая не берется во внимание), $\delta\varphi_{i1}$ и $\delta\varphi_{i2}$ – случайные разбросы регистрируемого положения i -х штрихов референтной (первой) и контролируемой (второй) шкал относительно их идеального положения соответственно.

После того, как файл данных F_1 о взаимном сдвиге всех n штрихов контролируемой шкалы относительно исходного положения соответствующих n штрихов референтной шкалы зарегистрирован, одну шкалу смещают на некоторый угол $\Delta\varphi = 2\pi/m$ и повторяют цикл измерения. Результат измерения запоминают в виде нового файла данных F_2 . Затем шкалу смещают еще раз на угол $\Delta\varphi$ и повторяют цикл измерений. Результат измерения запоминают в виде нового файла данных F_3 . И так далее, пока одна шкала не провернется относительно другой на целый оборот. К этому времени в памяти компьютера образуется матрица данных размерности $[m \times n]$.

Затем полученные данные с одинаковыми номерами складывают построчно и усредняют на число строк матрицы. В результате формируется новый файл данных F . При этом, если, как условились выше, первая шкала – контролируемая, вторая – референтная шкала установки АС-700, а данные измерений регистрировались с “привязкой” к началу оборота контролируемой шкалы, то сформированный файл будет характеризовать отклонение каждого штриха контролируемой шкалы относительно их идеального положения, а искажающий вклад референтной шкалы в результат измерений будет минимизирован. В основе минимизации лежит известный постулат – для замкнутого контура сумма погрешностей $\Delta\varphi_j$ штрихов круговой шкалы равна нулю.

Покажем, что для любого i -го штриха контролируемой шкалы происходит подавление дестабилизирующего вклада шкалы, используемой для сравнения, после построчного сложения и деления результата сложения на количество строк матрицы. Для этого итоговый результат контроля погрешности i -го штриха ($\Delta\varphi_i$) запишем в виде выражения

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta\varphi_{\text{ref}(i+j\frac{n}{m})} + \Delta\varphi_{\text{mes}(i)}) = \\ &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta\varphi_{\text{ref}(i+j\frac{n}{m})} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta\varphi_{\text{mes}(i)} = \quad (3) \\ &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta\varphi_{\text{ref}(i+j\frac{n}{m})} + \frac{1}{m} (m\Delta_{\text{mes}(i)}) = 0 + \delta + \Delta_{\text{mes}(i)}, \end{aligned}$$

представляющего собой сумму из m слагаемых, каждое из которых, в свою очередь, состоит из двух составляющих – текущей погрешности i -го штриха контролируемой шкалы ($\Delta\varphi_{mes}$) и погрешности одного из j -х штрихов референтной шкалы ($\Delta\varphi_{ref}$). Здесь $i = 1, \dots, n$ – текущий номер штриха контролируемой (mes) и референтной (ref) шкал, $j = 1, \dots, m$ – текущий номер сдвига по фазе взаимного расположения шкал.

В выражении (3) результат контроля представлен слагаемыми в круглых скобках под знаком Σ . Раскрытие круглых скобок дает два набора новых слагаемых, из которых первое – сумма погрешностей m штрихов референтной шкалы, взятых по замкнутому контуру, а второе – усредненное за m сложений значение искомой погрешности i -го штриха контролируемой шкалы. В соответствии с упомянутым постулатом первое слагаемое должно быть равным нулю. Однако из-за ограниченного числа смещений m этот результат выполняется не точно, а с некоторой погрешностью δ .

Реализация этого режима на установке АС-700 была осуществлена программной привязкой данных к началу контролируемой шкалы за счет искусственного уширения одного штриха.

Результаты контроля двух шкал представлены на рис. 4 в виде кривых погрешности углового положения штрихов обоих растров и спектров гармоник полученных кривых.

Из графиков следует, что результирующая погрешность раstra, изготовленного с помощью ЛГИ CLWS-300/С, составляет $\pm 0,65''$, а погрешность раstra, изготовленного с помощью ЛГИ ЭМ-589, составляет $\pm 6,0''$, что на порядок хуже, чем в случае альтернативной технологии. При этом основной вклад в результирующую погрешность растров, синтезированных по технологии микрофотонабора изображения, вносит вторая гармоника. Для технологических установок, работающих в декартовых координатах и не имеющих узла вращения, происхождение второй гармоники может быть объяснено различием параметров систем управления движением стола по координатам X и Y (прежде всего, в реализованной жесткости систем по каждой координате), которое проявляется при формировании сложных (криволинейных) траекторий движения и предопределяет возникающие отклонения от идеальной траектории записи топологических элементов датчика.

Для подавления различия параметров систем управления по обеим координатам и повышения точности лазерного генератора изображений, работающего в декартовой системе координат, специалисты фирмы *Tamagawa Seiko* (Япония) выделили 16 параметров, корректируя которые, им удалось снизить погрешность формирования топологии раstra датчика угла поворота не менее чем на порядок [7]. По абсолютному значению погрешность формирования топологии рисунка с помощью данного ЛГИ составляет порядка 0,1 мкм.

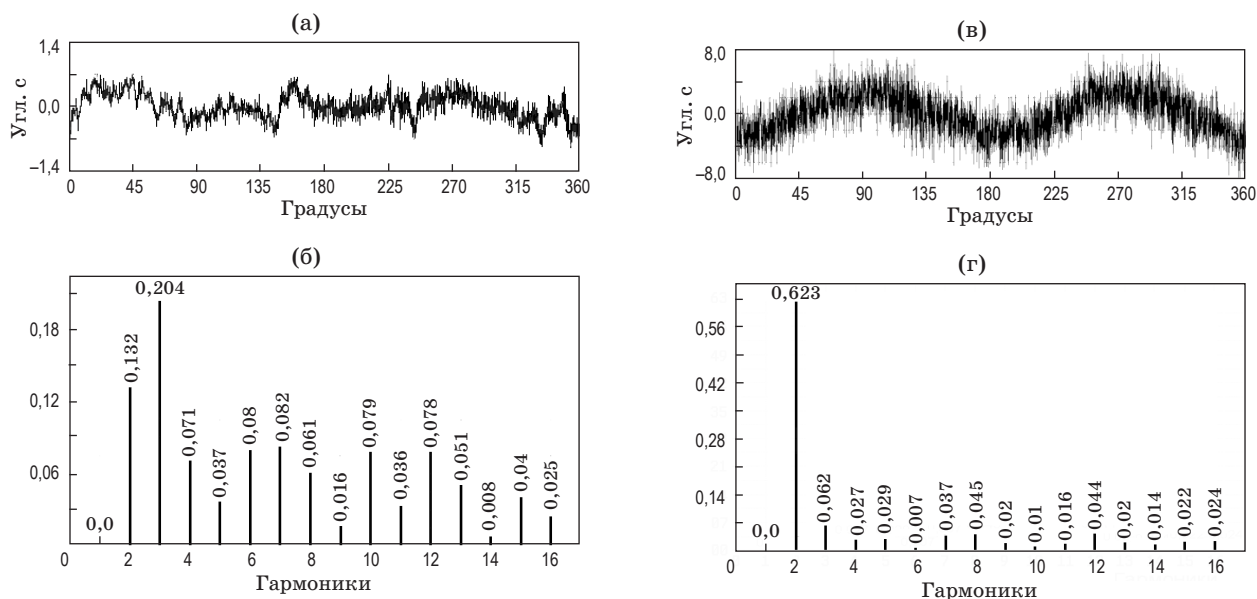


Рис. 4. Погрешности растров, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300/С (а, б) и ЛГИ ЭМ-5109 (в, г). Накопленная погрешность шкалы (а, в), ее спектральный состав (б, г).

Заключение

Проведено исследование точностных параметров формирования тензорезисторов, входящих в состав тонкопленочного датчика давления, изготовленных на двух типах технологических комплексов, работающих в декартовой и полярной системах координат. Показано, что относительный разброс значений сопротивлений сформированных тензорезисторов в измерительных плечах моста интегрального датчика давления с габаритами 5×5 мм не превышает 1,3–1,7%, если технологическое оборудование обеспечивает неопределенность формирования границ топологических элементов датчика в пределах 0,12–0,144 мкм.

Проведено исследование точностных параметров изготовления радиальных растров для датчиков угла поворота. Показано, что точность

растров, синтезированных по технологии кругового растрового сканирования, на порядок выше точности растров, синтезированных по технологии микрофотонабора изображения.

Проанализированы возможности использования метода кругового растрового сканирования для выполнения процедуры контроля топологии ИДФВ. Показано, что применение данной технологии позволяет на порядок снизить погрешность контроля при существенно меньших затратах времени на измерения.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Уральского оптико-механического завода (Екатеринбург) О.Б. Яковлеву и Д.Ю. Кручинину за помощь в проведении измерений на установке АС-700.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ №13-07-00081).

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Специальное технологическое оптико-механическое оборудование для производства изделий микроэлектроники «КБТЭМ – ОМО» [Electronic resours]. – Electronic date. – [s.l.: s.n., 2010]. – Access free: <http://kb-omo.by/content/view>. – Title from screen.
2. Heidelberg instruments mikrotechnik GmbH [Electronic resource]. – Electronic date. – [s.l.: s.n., 2013]. – Access free: <http://www.himt.de/en/products>. – Title from screen.
3. *Абрамов Ю.Ф., Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кокарев С.А., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б.* Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // *Оптический журнал*. 2006. Т. 73. № 8. С. 61–65.
4. *Кирьянов А.В., Кирьянов В.П.* Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием // *Автометрия*. 2010. Т. 46. № 5. С. 77–93.
5. *Bartik S.A., Frizin S.E., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Kruchinin D.Yu., Nikitin V.G., Yakovlev O.B.* Development of a technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesis of high precision angular measuring structures // *AMS'04. Proc. 10th IMEKO TC7 Intern. Symp. Advances of Measurement Science*. June 30–July 2, 2004, Saint-Petersburg, Russia. V. 2. P. 316–320.
6. *Portman V., Peschansky B.* Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements // *Precision Engineering*. 2001. V. 25. P. 309–315.
7. *Kojima T., Kikuchi Y., Seki S., Wakiwaka H.* Study on high precision angle measuring technology // *The 30th Annual Conf. IEEE Industrial Electron. Soc.* 2004, Busan, Korea. P. 1530–1535.