

УДК 535.4 : 621.317

УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КРУГОВЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

А. В. Кирьянов, В. П. Кирьянов

*Учреждение Российской академии наук
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: kiryanov@tdisie.nsc.ru*

Проанализированы пути совершенствования лазерных генераторов изображений, реализующих принцип кругового сканирования. Исследованы важнейшие источники погрешностей, вносимых системой радиальных перемещений и узлом вращения. Изложены принципы уменьшения основных составляющих нестабильности в работе генераторов изображений с круговым сканированием. Показано, что использование некоторых принципов позволило вывести опытный образец подобного генератора на второе место в мире в рейтинге комплексов, применяемых различными фирмами для формирования высокоточных углоизмерительных структур (шкал, лимбов, растров и т. д.).

Ключевые слова: лазерный генератор изображений, растровое сканирование, дифференциальный интерферометр, аэростатический шпиндель, фактор нестабильности.

Введение. Конструкторско-технологический институт научного приборостроения (КТИ НП) СО РАН разработал и начиная с 1995 г. поставляет заказчикам, в том числе и зарубежным, лазерные генераторы изображений (ЛГИ) с круговым сканированием модели CLWS-300 (Circular Laser Writing System, 300 — диаметр рабочего поля в миллиметрах) [1], конструкция которых была создана на основе целого цикла научно-исследовательских работ [2, 3], выполненных в Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

Отличительной особенностью ЛГИ модели CLWS-300 является использование шпиндельного узла с вертикальной осью вращения и каретки линейных перемещений на основе круглой и плоской аэростатических направляющих. Для удобства в работе шпиндельный узел установлен ближе к оператору, а плоская направляющая отдалена несколько назад. При этом головка записи крепится на ближней кромке портала. Эти основные конструктивные отличия представлены на рис. 1.

Опыт эксплуатации таких ЛГИ показал, что разработанные конструкторские решения оптико-механического блока (ОМБ) ЛГИ действительно обеспечивают максимум удобств оператору при работе, но отрицательно сказываются на точности синтезируемых элементов в тех случаях, когда во время формирования топологии элементов происходит изменение температуры окружающей среды.

За прошедшие годы накопилось достаточно много экспериментальных данных, касающихся нестабильности ряда параметров ЛГИ этой модели. Они были получены как пользователями [4], так и разработчиками комплекса [5–8].

Целью предлагаемой работы является анализ основных источников нестабильности ЛГИ данной модели и технических решений по модернизации базовых элементов комплекса, обеспечивающих улучшение его метрологических характеристик.



Рис. 1. Общий вид лазерного генератора изображений CLWS-300: 1 — круглая направляющая, 2 — портал, 3 — плоская направляющая, 4 — головка записи, 5 — шпиндельный узел

Специфические источники погрешностей оптико-механического блока ЛГИ CLWS-300. В состав ОМБ ЛГИ входят четыре важных узла:

— оптический канал записи (аргоновый лазер, элементы транспортировки излучения и управления лучом лазера, головка записи с системой автоматической фокусировки микрообъектива);

— система радиальных перемещений головки записи (каретка линейных перемещений порталного типа, два линейных двигателя и лазерно-интерферометрический преобразователь, включённый в обратную связь системы управления);

— шпиндельный узел (аэростатический шпиндель, встроенный датчик угла поворота, система пространственной ориентации оси вращения шпинделя, двигатель вращения и планшайба с вакуумным присосом);

— система виброзащиты (стол с аэростатическими виброизоляторами и массивная гранитная плита, на которой смонтирована вся прецизионная механика).

Каждый узел характеризуется специфической для него нестабильностью. По аналогии с [5] выделим следующие источники погрешностей, приводящие к искажению координат записываемых структур:

1) дрейф взаимного расположения оси оптического канала записи и оси вращения ротора шпиндельного узла;

2) погрешность позиционирования записываемого пятна в радиальном направлении;

3) погрешность положения записываемого луча, вносимая системой автоматической фокусировки при неточной пространственной ориентации последней;

4) погрешность позиционирования в угловом направлении, обусловленная ограниченной точностью датчика углового положения;

5) отклонение траектории движения записываемого луча от идеальной круговой траектории.

Данная классификация будет использована для анализа технических решений, положенных в основу кинематической схемы ОМБ ЛГИ модели CLWS-300.

Дрейф взаимного расположения оси (ВРО) оптического канала записи и оси вращения ротора шпиндельного узла в лазерных генераторах, работающих в полярной системе координат, приводит к специфическому и довольно значительному искажению синтезируемой топологии оптических элементов (рис. 2). Текущее значение этого фактора может определяться как начальной разбюстировкой ВРО, так и возможными в ходе записи уходами (дрейфом) от заданных в пространстве положений оптической оси микрообъек-

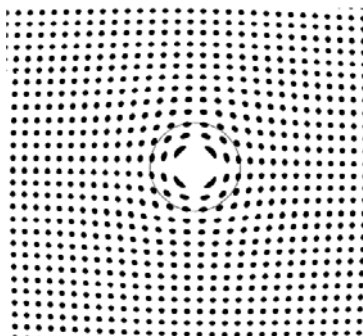


Рис. 2. Пример искажения регулярной сетки точек из-за несовмещённости оси оптического канала и оси вращения шпинделя

тива канала записи и оси вращения ротора. Эти три причины искажений имеют разную природу и требуют различных мер их ликвидации.

Компенсация начальной разъюстировки взаимного расположения осей канала записи и ротора шпинделя производится отдельно для двух направлений: радиального (вдоль оси перемещения портала) и тангенциального (перпендикулярно оси перемещения портала). В радиальном направлении предварительный выход точно в центр вращения осуществляется путём коррекции расстояния от репера до центра вращения. В первых образцах ЛГИ модели CLWS-300, выпущенных до 2000 г., совмещение оптической оси канала записи и оси вращения ротора в тангенциальном направлении производилось только при сборке генератора. В образцах ЛГИ, поставленных заказчиком после 2000 г., компенсация начальной разъюстировки в тангенциальном направлении осуществляется с помощью специального узла, состоящего из упорной призмы, винта со сферической головкой и рычага, перемещающего шпиндельный узел в тангенциальном направлении [9]. Точность начальной юстировки проверяется путём записи на пробной заготовке специальной тестовой структуры (рис. 3, *b*), у которой перекрестие совмещено с осью вращения. При минимальной толщине линий тестовой структуры, равной 0,8–1,0 мкм, удаётся уверенно регистрировать несовмещённость осей порядка 0,3–0,4 мкм (рис. 3, *a*, *c*).

Дрейф в пространстве оптической оси микрообъектива канала записи в основном зависит от нестабильности температуры окружающей среды. При этом дрейф может происходить как в радиальном, так и тангенциальном направлении. Упрощённая схема системы радиальных перемещений показана на рис. 4. Рассмотрим ситуацию, когда портал удерживается системой управления на так называемом физическом репере. В радиальном направлении дрейф взаимного расположения микрообъектива канала записи относительно оси вращения ротора обусловлен изменениями размеров базы D_{\max} (участка гранитной плиты от центра вращения ротора шпинделя до «нуля» интерферометрического преобразователя системы управлением перемещением каретки ЛГИ в радиальном направлении),

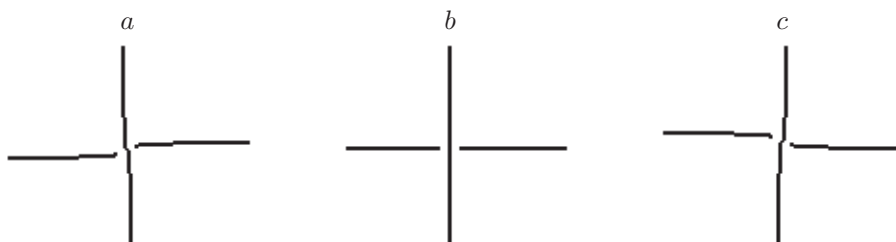


Рис. 3. Тестовая структура для анализа совмещённости осей

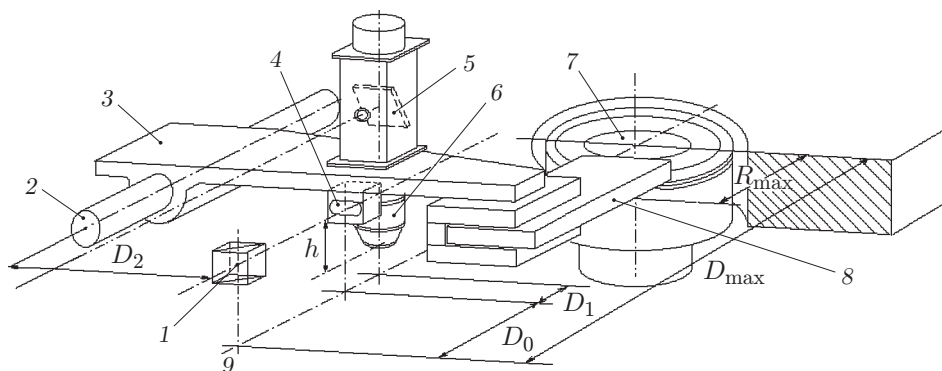


Рис. 4. Упрощённая схема компоновки узлов системы радиальных перемещений: 1 — светоделительный кубик интерферометра, 2 — круглая направляющая, 3 — портал, 4 — световозвращатель измерительного плеча интерферометра, 5 — поворотное зеркало головки записи, 6 — микрообъектив головки записи, 7 — ротор шпиндельного узла, 8 — плоская направляющая, 9 — нуль интерферометра

показателя преломления воздуха на трассе прохождения излучения He—Ne-лазера от интерферометра до отражателя («мёртвый» ход лучей D_0), размера участка портала от оптического центра отражателя измерительного плеча интерферометра до оптической оси микрообъектива канала записи D_1 . В соответствии со схемой результирующий дрейф оптической оси микрообъектива канала записи $\delta_{КЗ}$ можно представить как

$$\delta_{КЗ} = \delta_1 - \delta_2 + \delta_3, \quad (1)$$

где δ_1 — погрешность от температурного расширения базы D_{\max} ; δ_2 — погрешность от температурного расширения участка портала D_1 ; δ_3 — погрешность, вносимая изменениями показателя преломления воздуха. В свою очередь, δ_1 запишем в виде

$$\delta_1 = \alpha_{гр} D_{\max} \Delta T_1, \quad (2)$$

где $\alpha_{гр}$ — коэффициент линейного расширения гранита; ΔT_1 — изменение температуры гранитной плиты. Погрешность δ_2 может быть определена аналогично:

$$\delta_2 = \alpha_{Al} D_1 \Delta T_2, \quad (3)$$

где α_{Al} — коэффициент линейного расширения алюминия (материала, из которого изготовлен портал); ΔT_2 — изменение температуры материала портала. И, наконец, погрешность δ_3 может быть выражена как

$$\delta_3 = \Delta n_v D_0. \quad (4)$$

Здесь Δn_v — изменение показателя преломления воздуха относительно начального значения; Δn_v зависит от изменения параметров воздуха: температуры ΔT_v , давления Δp_v и влажности Δh :

$$\Delta n_v = f(\Delta T_v, \Delta p_v, \Delta h) D_0. \quad (5)$$

Удельный вклад каждой из компонент определяется основными характеристическими размерами установки. Для базовой конструкции CLWS-300 удельные вклады составляют: $\delta_1 \leq 3,3$ мкм/°С; $\delta_2 \leq 2,2$ мкм/°С; $\delta_3(\Delta T_v) \leq 0,4$ мкм/°С; $\delta_3(\Delta p_v) \leq 0,14$ мкм/мм рт. ст.; $\delta_3(\Delta h) \leq 0,02$ мкм/мм рт. ст.

Так как установка CLWS-300 должна эксплуатироваться в термостатированных помещениях, где изменение температуры воздуха ΔT_b активно стабилизируется и поддерживается на заданном уровне с погрешностью не хуже чем $\pm 1^\circ\text{C}$, то суммарный вклад компонент δ_2 и $\delta_3(\Delta T)$ составляет $\sim 1,8$ мкм/ $^\circ\text{C}$.

Пределы изменения Δp и Δh не поддаются регулированию, а определяются исключительно внешними факторами и достигают $\Delta p = \pm 30$ мм рт. ст. и $\Delta h = \pm 10$ мм рт. ст. Предельные оценки удельного вклада компонент $\delta_3(\Delta p) = \pm 4,2$ мкм и $\delta_3(\Delta h) = \pm 0,2$ мкм.

В тангенциальном направлении дрейф положения микрообъектива канала записи обусловлен изменением размеров базы D_2 (участка портала от центра круглой аэростатической направляющей до оптической оси микрообъектива). Величина дрейфа в тангенциальном направлении может быть определена аналогично:

$$\delta_4 = \alpha_{Al} D_2 \Delta T_2. \quad (6)$$

Удельный вклад составляющей $\delta_4 \leq 4,4$ мкм/ $^\circ\text{C}$.

Если с необходимой точностью непрерывно измерять параметры воздуха, гранитной плиты и портала, то для радиальных перемещений, зная линейные размеры этих отрезков, можно учесть дестабилизирующее действие источников нестабильности и скомпенсировать их с помощью штатной системы перемещения портала. Что же касается дрейфа в тангенциальном направлении, то в анализируемой конструкции портала не предусмотрено оперативных средств компенсации температурного уширения базы D_2 , в результате чего при изменении температуры узлов системы в ней наблюдаются непрерывные дрейфы взаимного расположения осей оптического канала и ротора шпинделя.

Пространственный дрейф оси вращения ротора обусловлен температурной нестабильностью системы пространственной юстировки корпуса шпинделя, вызванной, как показали исследования, разогревом корпуса встроенного двигателя вращения шпинделя в ходе работы.

Основанием для подобного утверждения послужили экспериментальные данные, полученные при анализе величины дрейфа ВРО во времени в [5] и динамики разогрева корпуса двигателя вращения шпиндельного узла лазерного генератора изображений CLWS-300 в [10]. Эти результаты в согласованном временном масштабе приведены на рис. 5, *a, b*. Здесь T_1 — температура воздуха (стабилизируется специальной системой регулирования), T_2 — температура корпуса двигателя вращения, T_3 — температура гранитной плиты, T_4 — температура портала. Корреляция между динамикой дрейфа ВРО (канала записи и вращения ротора) и разогревом базовых элементов конструкции ЛГИ достаточно сильная. Так как узел пространственной юстировки шпинделя расположен наиболее близко к двигателю вращения, то имеются все основания считать причиной дрейфа температурные изменения именно в этом узле. Поскольку расстояние от него до апекса ротора (верхней точки оси вращения, лежащей в плоскости планшайбы) составляет более 300 мм, то возможны достаточно большие колебания (≈ 200 –300 нм) пространственного положения апекса.

Погрешность позиционирования в радиальном направлении записывающего пятна на поверхности фоточувствительного слоя заготовки является следствием действия двух составляющих: температурного дрейфа материала заготовки и изменения оптического хода лучей в рабочем плече интерферометра. Будем считать, что, благодаря высокой концентрации присасывающих отверстий в центре планшайбы ротора, область заготовки, расположенной около оси вращения ротора, сцепляется с поверхностью планшайбы достаточно сильно, и по этой причине её положение остаётся фиксированным, а периферийные области заготовки из-за различия коэффициентов линейного расширения в случае изменения температуры могут проскальзывать по поверхности планшайбы.

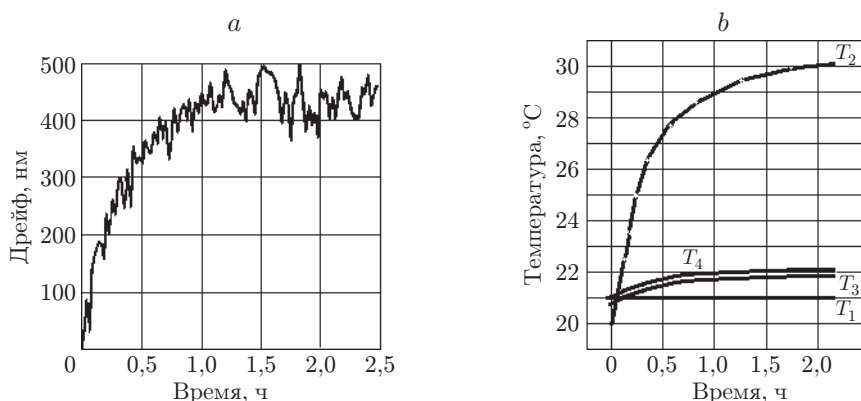


Рис. 5. Взаимосвязь дрейфа ВРО и разогрева корпуса: зарегистрированный дрейф (а), разогрев корпуса двигателя вращения с момента включения систем управления (б)

Если фокус микрообъектива находится в координате r_i , то изменение положения топологического элемента на заготовке, обусловленное изменением температуры планшайбы (а следовательно, и заготовки), можно представить выражением

$$\delta_5 = \alpha_{ст} r_i \Delta T_i, \quad (7)$$

где $\alpha_{ст}$ — коэффициент линейного расширения заготовки (стекла); ΔT_i — изменение температуры планшайбы.

В свою очередь, изменение оптического хода лучей в рабочем плече интерферометра запишем как

$$\delta_6 = \Delta n_B (D_{\max} - r_i). \quad (8)$$

Приращения оптического хода лучей имеют различный знак для температурной составляющей $\delta_6(T)$ и составляющей от изменения атмосферного давления $\delta_6(P)$. Суммарный дрейф положения записывающего пятна лазера в этом случае можно представить в виде

$$\delta_{\Sigma} = \delta_5 + \delta_6(T) - \delta_6(P). \quad (9)$$

Удельный вклад температурной составляющей δ_{Σ} при нахождении головки записи в центре вращения ротора будет равен $0,485 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$, а при нахождении на периферии планшайбы — $1,385 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$.

В конечном итоге здесь имеем классическую для интерферометрии ситуацию — наличие мёртвого хода лучей в рабочем плече интерферометра.

Снижение составляющей погрешности формирования структур, обусловленной изменениями оптической разности хода лучей при наличии в рабочем плече интерферометра мёртвого хода лучей, целесообразно осуществить на основе так называемых дифференциальных интерферометров [11]. Известно, что, размещая отражатель референтного плеча дифференциального интерферометра в крайней позиции динамического диапазона перемещений отражателя измерительного плеча, можно полностью скомпенсировать влияние мёртвого хода лучей. Для анализируемой ситуации это означает устранение дестабилизирующего действия атмосферного фактора на отрезке D_0 .

Однако современные схемы дифференциальных интерферометров, построенные на базе поляризационных светоделителей, позволяют решить проблему повышения стабильности характеристик системы позиционирования портала более радикально, благодаря возможности размещать отражатели референтного плеча внутри динамического диапазона

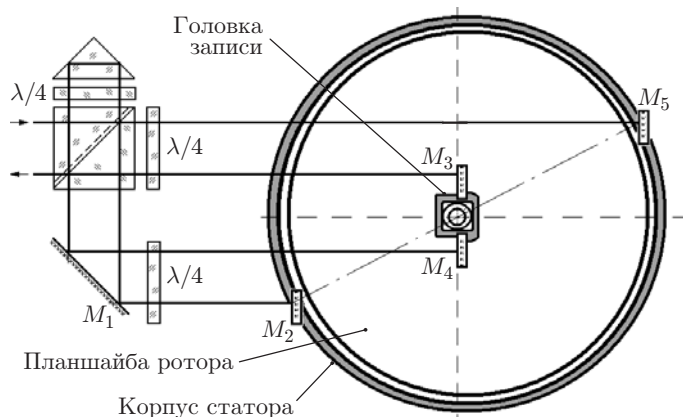


Рис. 6. Модифицированная схема измерительной части системы радиальных перемещений ЛГИ

перемещений отражателей измерительного плеча. Используя данную особенность современных схем дифференциальных интерферометров, можно также скомпенсировать одну из основных составляющих дрейфа: $\delta_1 = \alpha_{\text{гр}} D_{\text{max}} \Delta T_1$. Для этого необходимо отражатели референтного плеча разместить в плоскости, проходящей через ось вращения ротора. Схема дифференциального интерферометра, предложенная фирмой "Excel Precision" (США) [12], допускает произвольное изменение расстояния между отражателями, входящими в состав референтного и измерительного плеч. Эта дополнительная возможность позволяет совместить оптические центры обоих плеч интерферометра с точками кинематической схемы, до которых физически невозможно добраться. Например, в случае кинематической схемы ОМБ ЛГИ CLWS-300 такими точками являются оптическая ось канала записи (её нельзя перекрывать) и ось вращения ротора шпинделя. Если отражатели измерительного плеча интерферометра разместить в плоскости, совпадающей с оптической осью записи, прикрепив их к корпусу головки записи симметрично относительно данной оси, то оптический центр измерительного плеча совпадёт с оптической осью канала записи и кроме компенсации дестабилизирующего действия атмосферного фактора на трассе от светоделителя до центра вращения ротора также будет полностью устранён вклад составляющей дрейфа: $\delta_2 = \alpha_{\text{Al}} D_1 \Delta T_2$.

На рис. 6 представлена схема измерительной части системы радиальных перемещений ЛГИ [10, 13] на базе дифференциального интерферометра фирмы "Excel Precision", отличающегося от базового варианта использованием отдельных отражателей в обоих плечах интерферометра. Здесь зеркала M_3 и M_4 , образующие измерительное плечо интерферометра, закреплены на корпусе головки записи ЛГИ симметрично относительно оптической оси интерферометра. В результате эквивалентный оптический центр отражателя измерительного плеча совмещается с оптической осью канала записи. А отражатели M_2 и M_5 референтного плеча интерферометра установлены на корпусных деталях статора шпинделя так, что эквивалентный оптический центр отражателя референтного плеча совмещается с осью вращения ротора, а в исходном состоянии — и с оптической осью канала записи.

Температурная стабилизация размеров базы D_2 осуществляется путём установки головки записи (рис. 7) на подвижном основании, положение которого в пространстве стабилизируется с помощью стержня из материала с почти нулевым коэффициентом теплового расширения, например инвара. Головка канала записи 1 установлена на площадке 2, благодаря наличию плоских пружин 3 головка записи может перемещаться относительно точек их фиксации с порталом в направлении, перпендикулярном основному

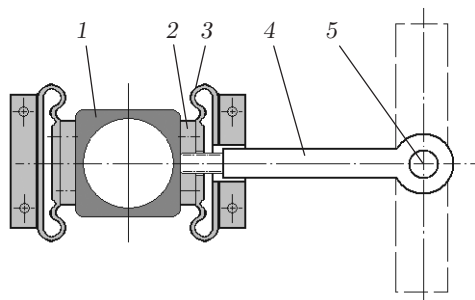


Рис. 7. Пример стабилизации пространственного положения головки записи

движению. Один конец тяги 4 вкручен в толщу площадки 2, другой закреплён на корпусе аэростатического подшипника круглой направляющей 5 в точке плоскости, проходящей через её ось. Для более полного подавления дрейфа оси канала записи в тангенциальном направлении необходимо, чтобы и площадка 2, и тяга 4 были изготовлены из материала, коэффициент температурного расширения которого близок к нулю. Возникающее же в этом случае смещение в тангенциальном направлении оси микрообъектива относительно оси лазерного пучка не приводит к появлению дополнительных дрейфов записывающего пятна на поверхности материала, так как фокальная плоскость микрообъектива совмещена с поверхностью материала записи.

Погрешность позиционирования в угловом направлении, обусловленная ограниченной точностью датчика углового положения, является специфической, характерной только для генераторов изображений, которые имеют в своём составе узел вращения. Датчик углового положения шпинделя состоит из фотоэлектрического преобразователя угла и умножителя частоты следования импульсов на основе схемы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). Базовая модель ЛГИ CLWS-300 была спроектирована на основе фотоэлектрического преобразователя ERO 815 фирмы "Heidenhain" (Германия). Датчик имел 36000 штрихов и обеспечивал разрешающую способность $\Delta\varphi = 36''$. Фирма гарантирует погрешность датчика $\delta\varphi$ не хуже $2''$. Управляемый делитель, входящий в состав схемы ФАПЧ, обеспечивает умножение частоты в реальном времени на коэффициент K , который выбирается от 1 до 128. Это позволяет повысить разрешающую способность по угловой координате до $0,28''$. Абсолютная величина δ_l -погрешности формирования топологии дифракционных оптических элементов (ДОЭ) в тангенциальном направлении (в микрометрах), обусловленная погрешностью датчика углового положения $\delta\varphi$, может быть представлена как

$$\delta_l = 4,84 \cdot 10^{-6} r \Delta\varphi, \quad (10)$$

где r — радиус записи (в метрах), $\Delta\varphi$ — погрешность датчика углового положения (в угловых секундах). Эта составляющая имеет особое значение при формировании топологии углоизмерительных структур (УИС), таких как угловые растры, лимбы, шкалы или многозарядные кодовые диски, а также при синтезе топологии ДОЭ произвольной формы особенно на больших радиусах. Например, на радиусах записи порядка 100 мм удаётся создать структуры с минимальной дискретностью в тангенциальном направлении, равной $0,13$ мкм, в то время как взаимная неопределённость элементов топологии на этих радиусах записи достигает $1,0$ мкм. По этой причине снижение погрешности углового преобразователя до значений порядка $0,2-0,3''$ является актуальной задачей для высокоточных ЛГИ с круговым сканированием.

Отклонение траектории движения записывающего луча от идеальной круговой траектории. В ходе приёмосдаточных испытаний одного из образцов генератора изображений модели CLWS-300 на Уральском оптико-механическом заводе экспериментально зарегистрирована достаточно жёсткая зависимость между уменьшением второй гармоники в спектрах погрешности синтезированных структур и уменьшением дисбаланса ротора шпиндельного узла [14]. Эта закономерность явилась важной отправной точкой в исследованиях источников искажений, происходящих при записи структур. До последнего времени в ряде работ (например, [15, 16]) утверждалось, что дисбаланс ротора шпиндельного узла приводит к появлению первой гармоники в спектре погрешности формирования элементов. Применительно к проблеме точного формирования топологии УИС её появление является достаточно рядовым событием, так как она легко устраняется юстировкой УИС относительно оси вращения. Устранение же второй гармоники требует соответствующей конструкции системы считывания данных с такой УИС, обеспечивающей подавление второй и ряда других чётных гармоник. Поэтому понимание природы возникновения дестабилизирующих факторов в шпиндельном узле является важнейшей частью процесса улучшения характеристик ЛГИ с круговым сканированием.

Влияние дисбаланса ротора на характер искажений траектории движения луча. Связь между дисбалансом ротора и сложным характером траектории движения записывающего луча по поверхности фоточувствительного слоя заготовки, закреплённой на планшайбе ротора, можно представить следующим образом.

При вращении ротора массой M с угловой скоростью ω центробежная сила его инерции запишется как [17]

$$F = Mr\omega^2 = M(e + z)\omega^2, \quad (11)$$

где $r = e + z$ — радиус инерции; e — эксцентриситет; z — смещение оси вращения ротора под действием дисбаланса и противодействия упругих опор.

В этом случае реакция опор

$$R = kz = F, \quad (12)$$

где k — жёсткость опоры.

Система дифференциальных уравнений движения оси ротора при действии силы F имеет вид

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + 2k_x x &= F \cos \omega t; \\ M\ddot{y} + 2k_y y &= F \sin \omega t. \end{aligned} \quad (13)$$

Частные решения системы уравнений (13) могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} x &= \frac{M(e + z)\omega^2}{2k_x - M\omega^2} \cos(\omega t - \varphi); \\ y &= \frac{M(e + z)\omega^2}{2k_y - M\omega^2} \sin(\omega t - \varphi). \end{aligned} \quad (14)$$

В соответствии с уравнениями (14) траектория движения центра вращения ротора представляет собой эллипс, который описывается каноническим уравнением

$$\frac{X^2}{\left(\frac{M(e+z)\omega^2}{2k_x - M\omega^2}\right)^2} + \frac{Y^2}{\left(\frac{M(e+z)\omega^2}{2k_y - M\omega^2}\right)^2} = 1. \quad (15)$$

В результате каждая точка носителя, закреплённого на роторе, совершает поступательное и вращательное движения относительно нового центра, смещённого на величину z по отношению к исходной оси ротора.

При анализе поведения ротора на малых скоростях вращения принимают, что он является абсолютно жёстким, а аэростатические опоры — гибкими. Считается также, что на таких скоростях вращения характеристики аэростатических опор изотропные, т. е. $k_x \approx k_y$. В результате лазерный след на фоточувствительном слое должен представлять собой окружность со смещённым по отношению к оси ротора центром. Это вызывает появление первой гармоники в спектре искажений топологии. Отсюда следует вывод, что дисбаланс ротора будет вносить только первую гармонику в погрешность синтеза. Подобный вывод совпадает с устоявшимися взглядами на вклад дисбаланса ротора, но расходится с экспериментальными результатами, полученными в ходе приёмосдаточных испытаний установки CLWS-300 на Уральском оптико-механическом заводе. Данное противоречие снимается, если в уравнениях, описывающих движение оси ротора, использовать не собственные коэффициенты жёсткости аэростатического подшипника, а обобщённые, учитывающие также вклад системы закрепления узла вращения:

$$k = \frac{k_0 k_i}{k_0 + k_i}, \quad (16)$$

где k_0 — жёсткость аэростатического подшипника для всех направлений (изотропный параметр); k_i — жёсткость системы закрепления шпинделя для выбранных направлений (анизотропный параметр).

В данном случае нас интересует жёсткость системы «шпиндель—гранитная плита—виброизолирующие опоры». Положение шпинделя на гранитной плите в ЛГИ показано на рис. 8. Из приведённой схемы видно, что положение шпинделя асимметрично по отношению ко всем четырём виброизолирующим опорам. Следствием этого является различие реакций виброизолирующих опор на возмущающее воздействие шпинделя и соответственно анизотропия обобщённого коэффициента жёсткости.

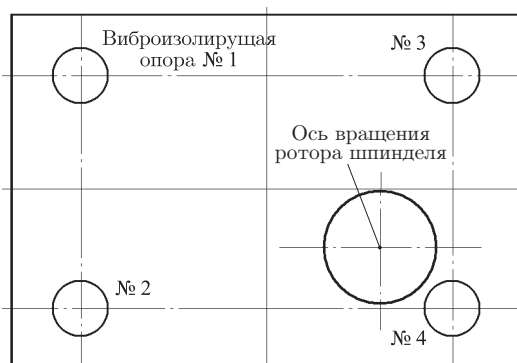


Рис. 8. Положение шпинделя и виброизолирующих опор на гранитной плите

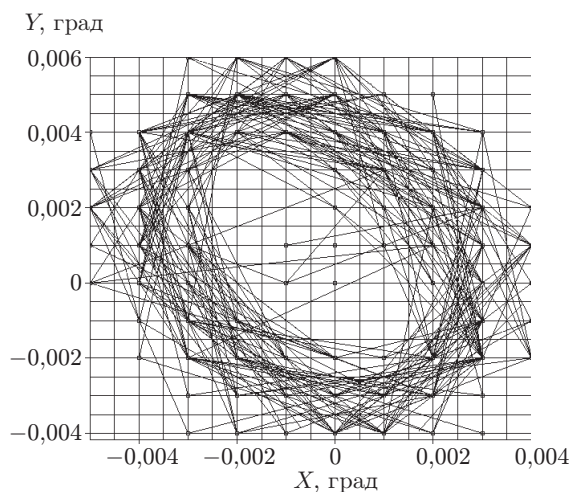


Рис. 9. Траектории результирующего вектора на фазовой плоскости

Тезис о том, что система «шпиндель—гранитная плита—виброизолирующие опоры» по-разному реагирует на возмущающее воздействие несбалансированного вращающегося ротора шпиндельного узла установки, был экспериментально подтверждён с помощью высокочувствительного двухкоординатного инклинометра, установленного на гранитной плите. Зафиксировано, что гранитная плита массой 1200 кг наклоняется в пространстве на разные углы при вращении несбалансированного ротора с частотой 3 Гц. В этих экспериментах регистрировалась податливость системы q (величина, обратная жёсткости k : $q = 1/k$). На рис. 9 на фазовой плоскости представлен годограф результирующего вектора данной системы (имеются в виду траектории движения конца вектора, ортогонального плоскости гранитной плиты). Здесь по одной координате фазовой плоскости отложены углы наклона плиты по оси X , а по другой — по оси Y . Видно, что совокупность зарегистрированных траекторий образует эллипс. Для изотропных параметров жёсткости (податливости) годограф системы должен быть кругом. Если имеет место анизотропия параметров жёсткости хотя бы по одной из координат, то годограф системы будет представлять собой эллипс с полуосями, ориентированными вдоль координатных осей. А то, что экспериментально полученный эллипс при этом ещё и наклонён, указывает на различие реакций каждой из четырёх виброизолирующих опор на возмущающее воздействие.

Таким образом, несимметричность расположения шпинделя относительно опор системы виброизоляции в сочетании с имеющимся дисбалансом ротора приводит к искажениям траектории движения записывающего луча.

Влияние гироскопических составляющих на характер искажений траектории движения луча. Рассмотренные выше искажения траектории вносятся так называемой регулярной прецессией ротора. Принципиальное изменение в результат анализа вносит учёт гироскопических составляющих в уравнениях движения оси. След, оставляемый лазерным излучением на поверхности фоточувствительного слоя, формируется сложным движением поверхности этого слоя, обусловленным поступательным и вращательным движением центра масс ротора. Дополнительное движение оси ротора под действием гироскопических составляющих (т. е. под действием кориолисовой силы) называют нутацией. Направление действия этой составляющей определяется текущим произведением векторов момента инерции и угловой скорости. Суммарное действие прецессии и нутации приводит к сложным петлеобразным траекториям движения верхнего конца (апекса) оси ротора [18] (рис. 10).

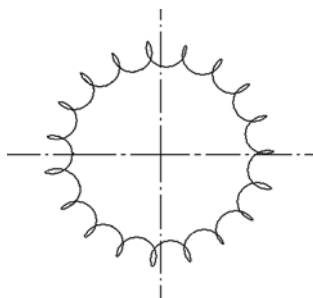


Рис. 10. Траектории движения апекса ротора при суммарном действии прецессии и нутации

Надо отметить, что полученные выводы о сложном характере движения апекса ротора шпинделя имеют далеко не чисто академический интерес. Немецкий исследователь Р. Фрайман [19], анализируя абберации ДОО, синтезированного с помощью установки CLWS-300, которая была изготовлена в КТИ НП СО РАН для Института технической оптики (г. Штутгарт, Германия), обратил внимание на то, что кроме зарегистрированных им искажений абсолютных значений радиусов границ зон Френеля, достигающих 0,3–1,0 мкм, наблюдаются также локальные искажения границ зон, распределённые по угловой координате. Фрайман обнаружил до 25 локальных искажений краёв границ зон на каждом обороте шпинделя и связывал их с биениями оси ротора. Авторы данной работы соотносят их, кроме того, и с проявлением нутационных движений ротора, возникающих вследствие его неточной балансировки.

Температурная стабилизация пространственного положения оси вращения ротора повышается путём изменения компоновки узла так, чтобы, с одной стороны, разогрев двигателя вносил минимальный нагрев юстировочных элементов, а с другой — оставшийся температурный градиент приводил к смещению шпинделя в чётко детерминированном направлении (рис. 11).

Эти изменения можно полностью учесть и скомпенсировать, например, с помощью дифференциального интерферометра за счёт того, что отражатели референтного плеча данного интерферометра будут размещены на корпусных деталях шпинделя и будут смещаться в одном направлении с ним. Такая детерминированность теплового дрейфа обеспечивается тем, что в целом шпиндельный узел жёстко фиксируется на гранитной плите

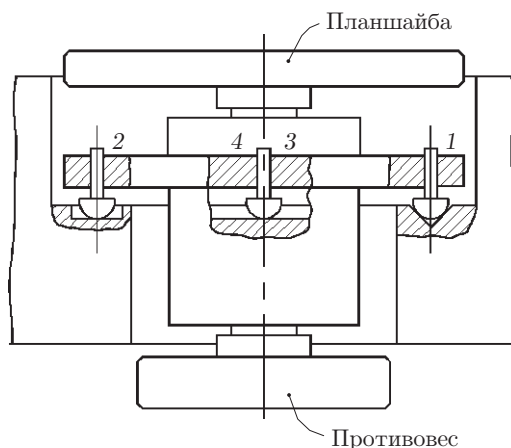


Рис. 11. Предложенная компоновка шпиндельного узла

только в точке 1, лежащей в плоскости, которая проходит через центр вращения ротора шпинделя и оптический центр интерферометра. Эту плоскость иногда называют главной плоскостью установки [9, 18]. Точка 2 фиксации пространственного положения шпиндельного узла определяет разрешённое направление температурного расширения. Она расположена диаметрально противоположно опоре 1 и обеспечивает указанную свободу перемещения. Точки 3 и 4, находящиеся в плоскости, ориентированной под углом 90° к плоскости, которая проходит через первую и вторую точки, получают уже по две степени свободы.

При такой компоновке тепловое расширение деталей шпиндельного узла становится «канализованным» исключительно по ходу каретки линейных перемещений. По абсолютной величине это температурное воздействие уменьшается за счёт более эффективного охлаждения двигателя вращения и удаления его на максимально возможное расстояние от системы пространственной ориентации оси шпинделя.

Минимизация искажений круговой траектории сканирования. Наиболее дешёвым техническим приёмом, позволяющим уменьшить искажения круговой траектории сканирования лазерным лучом поверхности фоточувствительного слоя, является симметризация распределения вращающихся масс шпиндельного узла, например, с помощью противовеса, как показано на рис. 11. Параметры противовеса рассчитываются из условия равенства полярных моментов вращающихся масс, расположенных по обеим сторонам от центра симметрии аэростатического подшипника:

$$\sum_{j=1}^m \mu_j r_j^2 = \sum_{i=1}^n \mu_i r_i^2, \quad (17)$$

где μ_j — масса каждой j -материальной точки узлов и деталей, находящихся над центром симметрии; r_j — расстояние от j -материальной точки до центра симметрии; μ_i — масса каждой i -материальной точки узлов и деталей, находящихся под центром симметрии; r_i — расстояние от i -материальной точки до центра симметрии.

Используя теорему Гюйгенса — Шнайдера, можно перейти от континуума материальных точек к конкретным узлам и деталям, прикреплённым к верхнему и нижнему торцам ротора шпинделя:

$$\sum_{j=1}^m (I_j + M_j r_j^2) = \sum_{i=1}^n (I_i + M_i r_i^2), \quad (18)$$

где I_j — полярный момент детали или узла, прикреплённого к верхнему торцу ротора, рассчитываемый относительно оси, перпендикулярной оси вращения ротора и проходящей через центр масс j -й детали или узла; M_j — масса j -й детали или узла; r_j — расстояние от центра симметрии аэростатического подшипника до центра масс j -й детали или узла; I_i, M_i, r_i — те же значения, но для деталей или узлов, прикреплённых к нижнему торцу ротора. В соответствии с данным предложением была разработана и создана конструкция шпиндельного узла, в котором осуществлена симметризация вращающихся масс ротора, улучшены условия охлаждения двигателя вращения и разнесены на максимальное расстояние система пространственной ориентации шпинделя и двигатель вращения. Проверка реакции гранитной плиты на возмущающее воздействие ротора модернизированного шпиндельного узла, выполненная с помощью ранее упомянутого высокоразрешающего двухкоординатного инклинометра, не выявила наличия устойчивых траекторий движения результирующего вектора на фазовой плоскости (рис. 12).

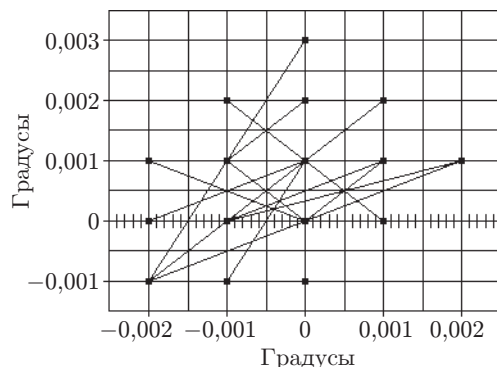


Рис. 12. Случайные траектории движения результирующего вектора на фазовой плоскости при вращении ротора модернизированного шпиндельного узла

Повышение точности позиционирования в угловом направлении. С использованием возможностей ЛГИ модели CLWS-300 выпуска 2001 г. изготовлен угловой растр с 36000 штрихов и на его основе собран угловой преобразователь для шпиндельного узла ЛГИ выпуска 2007 г., метрологические характеристики которого были исследованы с помощью измерительного стенда, реализующего принцип фазостатистических измерений [20, 21]. Результаты экспериментов показали, что зарегистрированная погрешность изготовленного преобразователя составила $\pm 0,35$ угл. с. Этот результат можно считать достаточно успешным, поскольку в отечественном приборостроении для датчиков диаметром 180 мм данное значение погрешности получено впервые, и притом без дополнительной электронной коррекции.

Технологические возможности модифицированного ЛГИ оценивались путём записи тестового растра диаметром 85 мм с количеством штрихов $N = 6000$. Результаты контроля накопленной погрешности изготовленного растра показаны на рис. 13. Из приведённого графика следует, что накопленное значение погрешности не превышает $\pm 0,7$ угл. с. Для установок этого типа подобный результат также получен впервые.

И хотя не все технические решения, рассмотренные в данной работе, к настоящему времени используются в действующих образцах ЛГИ, эффективность реализованных решений можно проиллюстрировать с помощью таблицы, в которой выполнено ранжирование известных комплексов, применяемых для формирования эталонных образцов УИС, и модернизированного ЛГИ модели CLWS-300 (2007 г.).

Ранжирование метрологических характеристик комплексов производилось на основе так называемого «фактора нестабильности» F [22, 23]. Этот параметр вычисляется для каждого анализируемого комплекса с учётом данных о размерах УИС, изготовленной с его

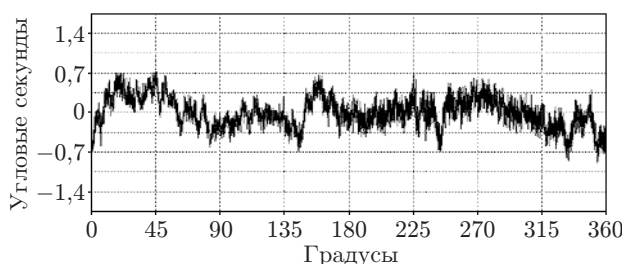


Рис. 13. График погрешности углового положения штрихов растра

Ранжирование известных технологических комплексов

| № п/п | Тип комплекса, фирма-изготовитель, страна, технология | Диаметр раstra D , мм | Погрешность раstra $\Delta\varphi$, угл. с | Фактор нестабильности F , мкм |
|-------|--|-------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | Лазерный генератор изображений, "Tamagawa Seiki Co." (Япония), растровое сканирование в $(X - Y)$ -координатах | 150 | 0,3 | 0,109 |
| 2 | Лазерный генератор изображений CLWS-300 (2007 г.), КТИ НП СО РАН (Россия), растровое сканирование в полярных координатах | 85 | 0,7 | 0,144 |
| 3 | Лазерный генератор изображений, "Sony" (Япония), растровое сканирование в полярных координатах | 132 | 0,6 | 0,191 |
| 4 | Лазерный генератор изображений CLWS-300 (2001 г.), КТИ НП СО РАН (Россия), растровое сканирование в полярных координатах | 90 | 1,0 | 0,218 |
| 5 | Генератор изображений, "Heidenhain" (Германия), Diadur-технология | 110,7 | 1,1 | 0,293 |
| 6 | Делительная машина ТКФ-100 "Feinmess" (Германия), гравирование | 90 | 1,6 | 0,350 |
| 7 | Лазерный генератор изображений, СКБ ИС (Россия), растровое сканирование в полярных координатах | 66 | 2,5 | 0,399 |
| 8 | Лазерный генератор изображений CLWS-300 (1995 г.), КТИ НП СО РАН (Россия), растровое сканирование в полярных координатах | 91 | 2,1 | 0,463 |
| 9 | Генератор изображений, "Renishaw" (Англия), синтез структур на цилиндрической поверхности | 52-413 | 4,0-0,5 | 0,502 |
| 10 | Генератор изображений, "Heidenhain" (Германия), Diadur-технология | 700 | 0,3 | 0,509 |
| 11 | Лазерный генератор изображений, УРАЛ-ГОИ (Россия), синтез структур в $(X - Y)$ -координатах | 55 | 6,0 | 0,800 |
| 12 | Генератор изображений, ВФ ЭНИМС (СССР), проекционная фотолитография | 106 | 3,3 | 0,847 |
| 13 | Генератор изображений, "Brown @ Sharp-Precizika" (Литва), проекционная фотолитография | 200 | 2,0 | 0,969 |

помощью (диаметре D в метрах и измеренной погрешности $\Delta\varphi$ в угловых секундах):

$$F = 2,42\Delta\varphi D, \quad (19)$$

где F получается в микрометрах.

Из приведённых данных следует, что метрологические характеристики установки CLWS-300 (образца 2007 г.) превышают аналогичные характеристики всех ранее созданных ЛГИ этой модели и, более того, претендуют на второе место в мире по точности формирования УИС.

По нашему мнению, предложенный критерий сравнения генераторов изображений (имеется в виду фактор нестабильности F) достаточно объективно характеризует метрологический потенциал этих комплексов, по крайней мере по их возможности формировать прецизионные углоизмерительные структуры, причём вне зависимости от принципа их построения.

Заключение. В данной работе показано, что применение специальной схемы дифференциального интерферометра в системе радиальных перемещений ЛГИ позволит компенсировать дестабилизирующее действие нестационарных температурных полей. Предложена схема компенсации дрейфа головки записи ЛГИ в боковом направлении за счёт установки её на подвижном основании. Симметризация вращающихся масс, соединённых с ротором шпинделя, позволила снизить фактор нестабильности ЛГИ модели CLWS-300 (2007 г.) до значения, равного 0,144 мкм, что гарантирует высокую точность формирования УИС с помощью данного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiryanov V. P. Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution // Proc. SPIE. 1997. **3091**. P. 66–70.
2. Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др. Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // Автометрия. 1981. № 3. С. 3–16.
3. Kiryanov V. P., Koronkevich V. P., Kokoulin F. I. et al. Fabrication of kinoform optical elements // Optik. 1984. **67**, N 3. P. 257–266.
4. Guhr J. Test results of the circular laser writing system CLWS-300 // Diffractive Optics: EOS Topical Meeting Digest Serial. 1997. Vol. 12. P. 206–207.
5. Полещук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их измерение // Автометрия. 1997. № 6. С. 42–56.
6. Кирьянов В. П., Анциферов А. П., Ведерников В. М. и др. Анализ и экспериментальное исследование системы радиальных перемещений лазерного фотопостроителя субмикронного разрешения // Автометрия. 1994. № 3. С. 31–37.
7. Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др. Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2002. **38**, № 3. С. 3–19.
8. Полещук А. Г. Погрешности формирования дифракционных структур лазерным термохимическим методом записи // Автометрия. 2003. **39**, № 6. С. 39–45.
9. Пат. 17473 РФ. Лазерный генератор изображений /В. М. Ведерников, А. Г. Верхогляд, Л. Б. Касторский и др. Заявл. 03.30.2000. Опубл. 03.10.2000, Бюл. № 10.
10. Kiryanov V. P., Kastorsky L. B., Kokarev S. A. Peculiarities of the construction of a positioning system with subnanometer resolution in laser image generators with circular scanning // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Positioning Technology (ICPT 2004). Tokyo, Japan, 2004. P. 83–88.

11. **Sommargren G. E.** A new laser measurement system for precision metrology // Precision Eng. 1987. **9**, N 4. P. 179–184.
12. **Pat. 5379115 US.** Differential interferometer /J. C. Tsai. Publ. Jan. 3, 1995.
13. **Кирьянов В. П.** Лазерная наноинтерферометрия перемещений: методы и средства повышения точности измерений // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1999. **63**, № 6. С. 1110–1116.
14. **Кирьянов А. В.** Снижение погрешности формирования прецизионных углоизмерительных структур: Автореф. дис. ... канд. техн. наук /СО РАН. КТИ НП. Новосибирск, 2009. 20 с.
15. **Whitehouse D. J.** Handbook of surface metrology. Bristol: IOP Publishing, 1994. 350 p.
16. **Полещук А. Г.** Дифракционные оптические элементы: методы синтеза и применение: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2003. 38 с.
17. **Гусаров А. А.** Балансировка роторов машин. М.: Наука, 2004. Кн. 1. 267 с.
18. **Жилин П. А., Сорокин С. А.** Динамика гиростата на упругом основании // Дифференциальные уравнения и процессы управления [Электронный журнал]. 1997. № 1. URL: <http://www.neva.ru/journal/pdf/1997/j007.pdf>
19. **Freimann R.** Aberrations of axially symmetric diffractive optical elements in relation to their fabrication inaccuracies // Optik. 2000. **111**, N 11. P. 485–492.
20. **Portman V., Peschansky V.** Phase-statistical method and device for high precise and high-efficiency angular measurements // Precision Eng. 2001. **25**, N 4. P. 309–315.
21. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Клисторин И. Ф.** Высокоточный угловой преобразователь встраиваемого типа и экспериментальная оценка его класса точности // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 11–15.
22. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Трофимов А. А., Чугуй Ю. В.** Ключевые аспекты миниатюризации суперточных преобразователей угла поворота для ракетно-космических комплексов // Сб. тр. Всерос. науч.-практич. конф. «Датчики и системы-2006». Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИ физических измерений», 2006. С. 106–115.
23. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б.** Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) // Оптический журнал. 2007. **74**, № 12. С. 40–49.

Поступила в редакцию 9 марта 2010 г.
