

УДК 535.4 : 521.317

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЙ ТРАЕКТОРИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАПИСЫВАЮЩЕГО ЛУЧА В ЛАЗЕРНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КРУГОВЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

© А. В. Кирьянов<sup>1,2</sup>, В. П. Кирьянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: alexey@iae.nsk.su  
kiryanov@iae.nsk.su

Анализируются предложения по компенсации искажений круговых траекторий, реализуемые в лазерных генераторах изображений с круговым сканированием в целях повышения точности синтеза топологии формируемых оптических элементов. Оценивается ожидаемый выигрыш в точности формирования топологии элементов при использовании фотоэлектрического метода регистрации биений оси вращения ротора шпинделя лазерного генератора.

*Ключевые слова:* лазерный генератор изображений, шпиндельный узел, датчик биений оси вращения, оптический дефлектор, погрешность формирования, лазерный интерферометр.

DOI: 10.15372/AUT20190311

**Введение.** Погрешность формирования топологии дифракционных оптических элементов (ДОО) с помощью лазерных генераторов изображений с круговым сканированием (ЛГИ КС) зависит от многих причин [1]. Среди них весьма значимыми являются искажения, обусловленные отклонениями траекторий сканирования записывающего луча ЛГИ КС от идеально круговых. Для их устранения предложены различные подходы, в том числе основанные на использовании в канале записи ЛГИ КС однокоординатного оптического дефлектора [2, 3], отклоняющего лазерное излучение записи на поверхности фоточувствительного слоя в соответствии с результатами контроля тестовых объектов.

Целью данной работы являются обоснование иного подхода к процедуре компенсации отклонений траекторий сканирования записывающего луча ЛГИ КС от круговой с помощью двухкоординатного дефлектора, оценка его возможностей и перспектив выполнения предлагаемой процедуры, реализуемой в реальном времени.

**Анализ известного алгоритма компенсации искажений траекторий сканирования.** В [2] анализируется метод повышения точности синтеза топологии элементов при их формировании с помощью ЛГИ КС, согласно которому по результатам измерений поперечных сечений следа взаимодействия лазерного излучения с фоточувствительным материалом, полученного при записи тестовой окружности, в выбранных угловых направлениях находят величину линейных искажений координат тестовой окружности, вносимых лазерным генератором изображений, а затем, определив положение центров следа, вычисляют величины поправок, которые потребуется внести в значения текущих радиальных координат. Эти значения вносят в блок памяти процессора. В последующей записи топологии элемента с помощью однокоординатного дефлектора, установленного в оптическом

тракте ЛГИ КС, производят коррекцию радиальных координат точки взаимодействия излучения с фоточувствительным слоем. Данный метод позволил снизить искажения топологии ДОО с 220 до 42 нм, т. е. в пять раз повысил точность синтеза топологии элементов.

Несмотря на достигнутые положительные результаты, можно выделить, по крайней мере, два важных недостатка анализируемого метода. Первый недостаток был указан в [2] самим же разработчиком метода, а именно необходимость поворота пластины после записи теста на  $180^\circ$  и повторной тщательной юстировки. К другому недостатку метода следует отнести то, что в анализируемой ситуации по следу, оставленному в регистрирующей среде, в принципе, невозможно полностью оценить возмущающий фактор. Здесь искажения траектории относительного движения записывающего лазерного луча в основном вносятся биениями оси ротора аэростатического шпинделя. В целом биения любого подшипника, в том числе и аэростатического, характеризуются синхронной и асинхронной составляющими [4]. При этом асинхронные биения меняются от оборота к обороту, т. е. по существу являются случайными величинами. Соответственно след, оставленный в фоточувствительном материале при записи тестовой структуры, представляет собой  $i$ -ю реализацию случайного процесса движения в пространстве оси вращения ротора аэростатического шпинделя. В лучшем случае после оценки следа тестовой записи можно полностью компенсировать систематическую (синхронную) составляющую биений оси ротора. Асинхронная составляющая будет компенсироваться лишь частично. Однако для анализируемого случая характерно то, что и параметры синхронной составляющей биений не всегда могут быть точно определены по следу взаимодействия, оставленному при записи тестовой окружности, так как при вращении планшайбы с подложкой на разных радиусах поверхности фоточувствительного слоя один и тот же дестабилизирующий фактор проявляет себя по-разному. Данное утверждение базируется на следующих экспериментальных результатах.

В [5] показано, что дисбаланс ротора приводит к появлению сложных паразитных движений его оси. Так, если центр масс ротора не совпадает с центром симметрии аэростатического подшипника, то при вращении ротора возникают угловые качания его оси, которые порождают её регулярную прецессию. Образующиеся при этом гироскопические ускорения порождают ещё один вид вынужденных движений оси ротора — нутацию. Совместное действие трёх движений: вращения ротора вокруг оси, прецессии и нутации — приводит к тому, что каждая точка на поверхности пластины с фоточувствительным материалом, установленной на предметном столике ротора, совершает движение по сложным траекториям. Например в [6] было показано, что на некотором выбранном радиусе возможно проявление траекторий движения апекса оси ротора в виде эпициклоид. Из-за разной линейной скорости вращения на каждом радиусе поверхности материала следует ожидать, что и результирующие траектории движения точек поверхности относительно неподвижной головки записи на разных радиусах могут быть различными. Данное предположение было промоделировано. При этом задавалась постоянная скорость вращения заготовки с фоточувствительным материалом и дополнительные круговые движения с малой амплитудой и частотой в 25 раз выше, чем частота вращения. Результат компьютерного моделирования представлен на рис. 1, а. Здесь в полярной системе координат представлен ансамбль точек, взятых через одинаковые промежутки времени и отображающих мгновенные положения конца вектора — суммы двух вышеуказанных векторов движений.

Фактически расстояния между точками ансамбля характеризуют текущие модули скорости смещения поверхности под воздействием двух движений: равномерного вращения оси ротора и круговых качаний оси из-за гироскопических сил. Как видно из муаровой картины, образовавшейся из-за модуляции расстояний между точками, формируемыми через равные промежутки времени, на рис. 1, а два круговых движения с разными частотой и амплитудой вместе дали эффект достаточно сложного характера распределения скоростей

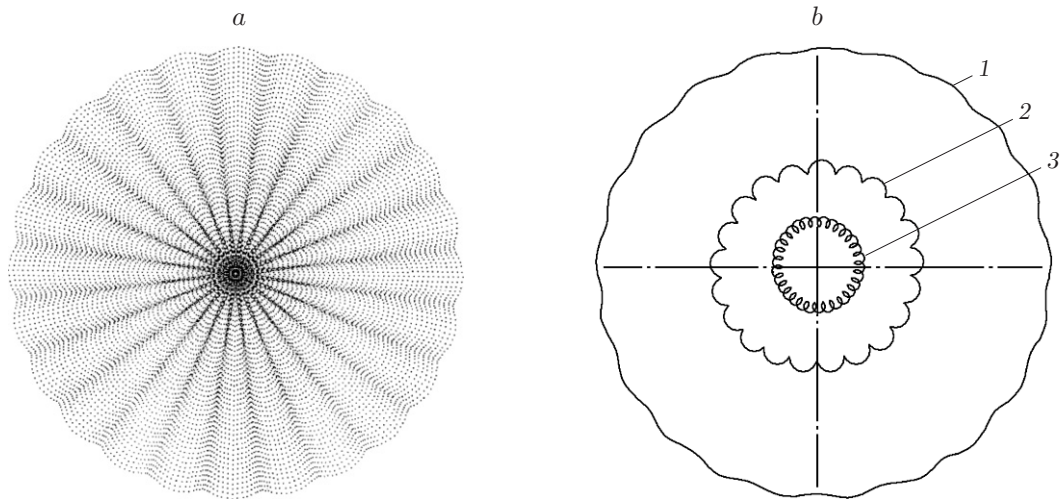


Рис. 1. Результаты моделирования: *a* — поле скоростей точек поверхности планшайбы при одновременном вращении и качании оси ротора; *b* — типы траекторий (1 — удлинённая эпитрохоида, 2 — эпициклоида, 3 — укороченная эпитрохоида)

движения точек поверхности фоточувствительного материала, зависящего от угла поворота и текущего значения радиуса сканирования. Так, в области центра вращения пластины имеют место петлеобразные траектории движения точек поверхности (со всевозможными взаимными пересечениями). В математике подобные траектории известны как укороченные эпитрохоиды [7]. С ростом радиуса сканирования возникает узкая область значений радиусов, в которой укороченные эпитрохоиды вырождаются в эпициклоиды, возможность появления которых прогнозировалась в [6]. Далее с ростом радиуса сканирования эпициклоиды, в свою очередь, вырождаются в так называемые удлинённые эпитрохоиды. На рис. 1, *b* данные типы траекторий приведены в явном виде, но не в точном масштабе. Причём чем больше радиус сканирования, тем меньше крутизна волнистости кривых, и на периферии траектории сканирования поверхности стремятся к обычным окружностям. Отметим, что полученные результаты моделирования имеют не только академический интерес.

Известно, что при прямой лазерной записи топологии оптических элементов изменения скорости движения фоточувствительной поверхности относительно неподвижного записывающего лазерного пучка приводят к изменениям поглощённой мощности излучения и соответственно к изменениям экспозиции фоточувствительного материала. Поэтому паразитная модуляция скорости относительного движения поверхности фоточувствительного материала неизбежно проявляется в виде изменений экспозиции последнего в виде паразитного изменения профиля или топологии формируемых элементов.

В [8] опубликованы результаты анализа искажений волновых фронтов, вносимых дифракционным оптическим элементом, сформированным с помощью ЛГИ КС модели CLWS-300, созданного специалистами Института автоматки и электрометрии и Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Среди обнаруженных искажений обращается внимание на характерные аберрации, подобные 25 спицам в колесе. В [8] зарегистрированные искажения связывают с вибрациями оси вращения ротора шпинделя, которые оценены на уровне 50 нм. В [8] однозначно не указываются причины, вызывающие вибрации оси, но сделано предположение, что они обусловлены дефектами изготовления элементов аэростатического подшипника.

Известно, что у аэростатических подшипников катушечного типа (а именно такие использовались в ЛГИ КС модели CLWS-300) существуют дефекты, которые при определённых значениях давления подводимого сжатого воздуха вызывают явление, получившее название «пневмомолоток», обусловленное периодическими качаниями оси ротора и в статическом режиме, и в динамике.

В связи с тем, что для используемого диапазона давлений в статическом режиме ЛГИ КС данной конструкции явление пневмомолотка не отмечалось, то и нет видимых причин приписывать ответственность за биения оси ротора возможным дефектам изготовления, а вот вероятность наличия остаточного дисбаланса допустима. Если учесть, что запись структур на установке CLWS-300 ведётся при скорости вращения 10 об./с, то частота возможных вибраций оси будет составлять 250 Гц. Характерно, что многие исследователи в области кинетики роторов отмечают, что нутационные движения многих роторов, действительно, лежат в диапазоне сотен Гц, т. е. в диапазоне низких звуковых частот [9]. И нередко при записи структур с помощью ЛГИ КС регистрировались акустические явления (типа гудения ротора) при выходе его на режим постоянной скорости вращения. Поэтому можно с большой степенью вероятности считать, что зарегистрированные в [8] спицеобразные aberrации ДОЭ порождены остаточным дисбалансом центра масс ротора аэростатического шпинделя.

Таким образом, имеются достаточные основания утверждать, что при круговом сканировании одному и тому же возмущению, вносимому остаточным дисбалансом ротора, соответствуют существенно разные траектории движения сфокусированного излучения по поверхности фоточувствительного материала, зависящие и от скорости вращения, и от текущего радиуса, на котором ведётся запись.

**Алгоритм компенсации в реальном времени искажений круговых траекторий сканирования в ЛГИ КС.** Для реализации алгоритма компенсации искажений круговых траекторий в реальном времени необходимо выделять в явном виде показатели отклонения траектории движения лазерного луча по поверхности фоточувствительного материала от круговой, а затем использовать эту информацию для активной компенсации возникающих паразитных искажений положения пятна записи на его поверхности.

Среди возможных причин искажений траектории сканирования можно выделить две наиболее важные. И обе они связаны с наличием дисбаланса ротора шпиндельного узла, остающегося после размещения на планшайбе шпинделя подложки будущего ДОЭ, обязательной её центровки и последующей балансировки ротора (вместе со всеми присоединёнными элементами).

Первая причина — вынужденное качание оси вращения ротора шпинделя в узле кругового сканирования под действием регулярной прецессии и нутации. Известно решение данной проблемы путём создания активных аэростатических шпинделей [10, 11]. В таких устройствах для однозначного детектирования характеристик качания оси устанавливаются две пары датчиков биений оси ротора. В каждой паре оба датчика ориентированы относительно оси вращения со взаимным пространственным сдвигом на  $90^\circ$ . Чаще всего разработчики активных аэростатических шпинделей предлагают применять ёмкостные датчики. В нашем случае при использовании высокоразрешающих фотоэлектрических угловых преобразователей предложены фотоэлектрические датчики биений, входящие в состав комбинированных датчиков угла, конструкция которых разработана в [12, 13]. На рис. 2 представлен вариант применения для контроля положения оси ротора двух оптических комбинированных датчиков 1 и 2 [14]. В состав датчика 1 входят: считывающая головка 3 (угловая), измерительный растр 5, считывающие головки 7 и 8 (радиальных биений). По аналогии в состав датчика 2 входят: считывающая головка 4 (угловая), измерительный растр 6, считывающие головки 9 и 10 (радиальных биений). Считывающие головки 7, 8 датчика 1 и 9, 10 датчика 2 отслеживают смещения оси вращения растра



Используя данное соотношение, можно отдельно вычислить смещения точки взаимодействия излучения с фоточувствительным слоем, обусловленные паразитными смещениями оси как в радиальном, так и угловом (тангенциальном) направлениях. Для этого следует принять во внимание, что ротор 11 шпинделя 12, заготовка 14 и измерительные растры 5 и 6 датчиков 1 и 2 являются абсолютно жёсткими. Тогда смещения всех точек поверхности растров 5 и 6, вызванные паразитным смещением оси вращения для каждого из выбранных направлений, будут равны между собой.

Соответственно искажения радиальной координаты  $\Delta X_r$  точки взаимодействия лазерного излучения, выходящего из головки 13, определяются следующим образом:

$$\Delta X_r = \Delta X_8 + (\Delta X_8 - \Delta X_{10})H/H_6.$$

Здесь  $\Delta X_8$  — приращение фазы выходных сигналов головки 8 в данный момент времени,  $\Delta X_{10}$  — приращение фазы выходных сигналов головки 10 в тот же момент времени.

Значения фаз сигналов вычисляются из выходных сигналов соответствующих головок в процессоре 15 узла кругового сканирования ЛГИ с использованием, например, арктангенсного алгоритма. Тогда  $\varphi = \arctg(\sin \varphi / \cos \varphi)$ , где  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$  — квадратурные выходные сигналы считывающих головок 8 и 10.

Аналогично искажения в тангенциальном направлении  $\Delta X_\theta$  координаты точки взаимодействия лазерного излучения, выходящего из головки 13, определяются как

$$\Delta X_\theta = \Delta X_7 + (\Delta X_7 - \Delta X_9)H/H_6,$$

где  $\Delta X_7$  — приращение фазы выходных сигналов головки 7 в данный момент времени,  $\Delta X_9$  — приращение фазы выходных сигналов головки 9 в тот же момент времени. Значения фаз выходных сигналов для тангенциального направления вычисляются в процессоре 15 как  $\varphi = \arctg(\sin \varphi / \cos \varphi)$ , где  $\sin \varphi$  и  $\cos \varphi$  — выходные сигналы считывающих головок 7 и 9.

Затем на основании выделенных искажений  $\Delta X_r$  и  $\Delta X_\theta$  в процессоре 15 с учётом характеристик исполнительного элемента вычисляют параметры управляющего сигнала.

Разработчики активных аэростатических шпинделей, как правило, применяют в качестве исполнительных элементов воздушные жиклёры с пьезоприводом, воздействующие непосредственно на ротор шпинделя. Такое решение является наиболее рациональным, когда создаётся специальная конструкция шпинделя. В нашем случае, когда используются стандартные аэростатические шпиндели, целесообразно в качестве исполнительного элемента взять двухкоординатный дефлектор 16, установленный в оптическом тракте лазерного генератора изображений. Для него нетрудно определить амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики, с использованием которых следует вычислить величины поправок для обеих координат текущей точки взаимодействия лазерного луча с фоточувствительным материалом и на основе рассчитанных поправок сформировать в реальном времени управляющие воздействия на двухкоординатный дефлектор 16.

Применение двухкоординатного дефлектора 16 вместо однокоординатного, как это было выполнено в [2], позволит повысить точность формирования не только осесимметричных ДОО, но и ДОО с произвольной топологией, а также углоизмерительных структур для прецизионных фотоэлектрических угловых преобразователей.

Вторая причина возможных искажений траекторий движения лазерного луча по поверхности фоточувствительного материала — это паразитные движения в радиальном направлении каретки 17 вместе с записывающей головкой 13 как следствие возмущающих воздействий со стороны шпинделя. Здесь под возмущающим воздействием имеются в

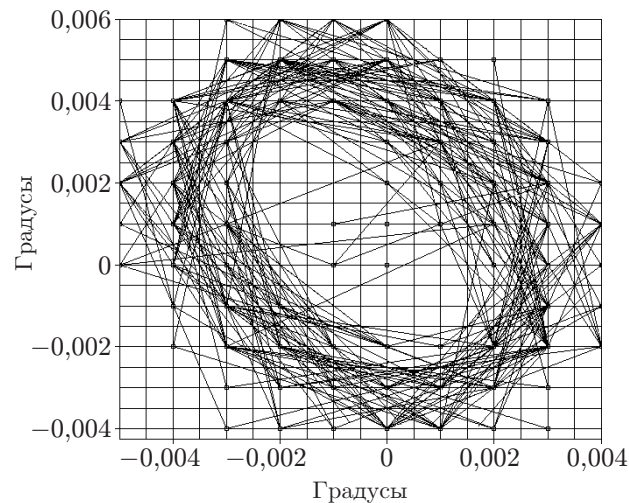


Рис. 3. Траектории конца вектора, ортогонального поверхности плиты, на фазовой плоскости при воздействии несбалансированного ротора

виду только биения ротора шпинделя из-за остаточного дисбаланса, поскольку для подавления внешних вибраций, как правило, имеется штатная система виброизоляции оптико-механического блока ЛГИ, т. е. остаточный дисбаланс ротора возмущает не только пространственное положение оси вращения ротора, но и положение каретки 17. Данный тезис экспериментально был зарегистрирован с помощью цифрового двухкоординатного инклинометра [4]. На рис. 3 представлены на фазовой плоскости траектории движения конца вектора-перпендикуляра к поверхности гранитной плиты при вращении несбалансированного ротора со скоростью 4 об./с.

Анализ спектрального состава гармоник выходных сигналов системы управления кареткой 18 (см. рис. 1) в моменты, когда записывающая головка удерживалась на некотором заданном радиусе записи, позволил выделить наличие в сигнале рассогласования системы 18 существенного вклада гармоник, частота которой равна частоте вращения ротора шпинделя. Это и дало основание однозначно связать качания гранитной плиты с дисбалансом ротора.

Поэтому для повышения точности синтеза топологии элементов при их формировании с помощью лазерного генератора изображений с круговым сканированием в контроллере системы 18 необходимо выделить текущий сигнал рассогласования системы в моменты, когда каретка 17 устойчиво находится в окрестностях задаваемой точки позиционирования. На основе этого сигнала и полученных амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик дефлектора рассчитывается дополнительная поправка для радиальной координаты точки взаимодействия лазерного луча с фоточувствительным материалом. Далее рассчитанная поправка направляется на второй вход радиальной координаты вышеупомянутого двухкоординатного дефлектора 16, где он суммируется с аналогичным сигналом от датчика биений ротора. Данное управляющее воздействие позволит компенсировать в реальном времени смещения каретки, обусловленные дестабилизирующим воздействием остаточного дисбаланса ротора шпинделя. Чувствительность системы к этому виду возмущений определяется чувствительностью датчика обратной связи системы радиальных перемещений. В настоящее время при использовании лазерных интерферометров она достигает значений 76 или 38 пикометров в зависимости от типа интерферометра [15].

В целом возможности предлагаемого метода компенсации искажений топологии определяются погрешностями датчиков биения оси ротора. Так, при использовании в фотоэлектрических датчиках биения кольцевых растров с периодом 14 мкм и интерполирую-

щих блоков с коэффициентом интерполяции 4096 [16] разрешающая способность датчиков биения может достигать 3,4 нм, что на два порядка грубее, чем вышеуказанное разрешение лазерных интерферометров в обратной связи систем радиальных перемещений.

Применительно к проблеме повышения точности формирования углоизмерительных структур для прецизионных фотоэлектрических угловых преобразователей предлагаемый алгоритм компенсации искажений круговых траекторий сканирования в ЛГИ КС с подобными показателями датчиков биений оси ротора позволит улучшить метрологические характеристики углоизмерительных структур угловых датчиков практически в 40 раз, например, по сравнению со структурами, сформированными с помощью ЛГИ КС модели CLWS-300 [5], обеспечивавшего в то время один из наиболее высоких показателей по точности формирования.

**Заключение.** Алгоритм компенсации искажений круговых траекторий сканирования записывающего излучения в ЛГИ КС на основе применения фотоэлектрических датчиков биений оси ротора ЛГИ и двухкоординатного оптического дефлектора даст возможность снизить до 3,4 нм погрешность формирования топологии осесимметричных ДОЭ, обеспечить формирование с высокой точностью топологии ДОЭ произвольной конфигурации и не менее чем в 40 раз повысить существующий уровень точности формирования топологии углоизмерительных структур для прецизионных фотоэлектрических угловых преобразователей.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук В. Е. Зюбину и ведущему программисту А. Д. Петухову за выполнение модельного эксперимента.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117060610006-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полецук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их изменение // *Автометрия*. 1997. № 6. С. 42–56.
2. Корольков В. П. Измерение и коррекция траектории движения лазерного пучка в круговых записывающих системах // *Автометрия*. 2003. **39**, № 6. С. 13–25.
3. Полецук 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.
4. Marsh E. R. Precision Spindle Metrology. Lancaster: DEStech Publications, 2008. 161 p.
5. Кирьянов А. В., Кирьянов В. П. Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием // *Автометрия*. 2010. **46**, № 5. С. 77–93.
6. Жилин П. А., Сорокин С. А. Динамика гиростата на упругом основании // *Дифференциальные уравнения и процессы управления*. 1997. № 1. С. 163–251. URL: <http://diffjournal.spbu.ru/pdf/j007.pdf> (дата обращения: 4.02.2019).
7. Савелов А. А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения. Справочное руководство. М.: Физматгиз, 1960. 294 с.
8. Freimann R. Aberrations of axially symmetric diffractive optical elements in relation to their fabrication inaccuracies // *Optik*. 2000. **111**, N 11. S. 485–492.
9. Иванова В. С. Вибрационные силы, их проявление в гироскопе со смещенным центром масс при вибрации основания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2003. 24 с.
10. Mizumoto H., Arie S., Yabuta Y. et al. Active aerostatic bearing for ultra precision application // *Proc. of the 35th Intern. MATADOR Conf. Taipei, Taiwan, 30 June, 2007*. P. 289–292.



11. **Sato K., Horikawa O., Shimokohbe A.** Improvement of spindle motion accuracy by a control type air rotary bearing // Proc. of Japan-USA Symp. on Flexible Automation. Boston, USA, 7–10 July, 1996. Vol. 2. P. 1145–1150.
12. **Пат. 2433413 С1 РФ.** Способ повышения точности измерения угла поворота /А. В. Кирьянов, В. П. Кирьянов. Заявл. 15.06.2010. Оpubл. 10.11.2011, Бюл. № 31.
13. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.** Повышение точности угловых измерений с помощью фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа // Автометрия. 2012. **48**, № 6. С. 84–91.
14. **Пат. № 2675077 С1 РФ.** Способ повышения точности синтеза топологии элементов /А. В. Кирьянов, В. П. Кирьянов, Г. И. Нагорников. Заявл. 15.12.2017. Оpubл. 14.12.2018, Бюл. № 35.
15. **Renishaw.** Interferometric laser encoders. 2018. URL: <https://www.renishaw.com/en/renishaws-fiber-optic-laser-encoder-products> (дата обращения: 4.02.2019).
16. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П., Чуканов В. В.** Алгоритм интерполяции квадратурных сигналов для высокоразрешающих преобразователей линейных и угловых перемещений // Автометрия. 2019. **55**, № 1. С. 64–71.

*Поступила в редакцию 04.02.2019*

*После доработки 12.04.2019*

*Принята к публикации 15.04.2019*

---