

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

ПРОБЛЕМЫ КАЛИБРОВКИ УГЛОВЫХ ДАТЧИКОВ ВСТРАИВАЕМОГО ТИПА

© В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: alexey@iae.nsk.su*

Представлены результаты тестирования эффективности использования одновременно двух измерительных процедур: самокалибровки и автокомпенсации, применяемых в лазерных генераторах изображений с круговым сканированием для снижения погрешности синтеза структур. Выявлено, что при использовании подобной стратегии возникает целесообразность ограничения сложности аппаратной реализации процедуры самокалибровки из-за действия неучитываемых источников искажений. Для снижения этого возникающего предела предложено в указанных установках применять конфигурацию оптико-механической системы, аналогичную той, что используется при калибровке встроенных в них угловых датчиков. Кроме того, также необходимо непрерывно отслеживать и учитывать проявления искажающих факторов, вклады которых нестабильны во времени.

Ключевые слова: угловые датчики встраиваемого типа, систематическая погрешность, случайная погрешность, кросс-калибровка, лазерные генераторы изображений, тестовые структуры, автокалибровка, автокомпенсация.

DOI: 10.15372/AUT20250114

EDN: OODXWH

Введение. В составе большинства углоизмерительных машин (УИМ) [1], угловых компараторов (УК) [2] и лазерных генераторов изображений с круговым сканированием (ЛГИ КС) [3] используются прецизионные шпиндельные узлы с угловыми датчиками встраиваемого типа (УДВТ). Такое техническое решение позволяет избежать проблем стыковки ротора шпиндельного узла установки с выходным валом углового датчика, имеющего собственную подшипниковую систему. Однако уход от решения проблемы стыковки валов приводит к тому, что возникает потребность подтвердить требуемое метрологическое качество собранных УДВТ. Данная проблема решается, как правило, путём выполнения процедуры калибровки датчиков после их установки на ротор узла вращения конкретного устройства [4]. Результаты её выполнения используются либо для подтверждения заданного уровня точности функционирования данного устройства, либо для организации последующей процедуры компенсации выявленной погрешности УДВТ (точнее, её систематической составляющей), если погрешность не удовлетворяет исходным требованиям к точности датчика установки.

В [5] сделана попытка повышения метрологических характеристик ЛГИ КС модели ЛГИ-2 путём применения углового датчика со встроенной муфтой статора, предварительно аттестованного изготовителем. Опыт использования такого подхода показал, что он не позволил решить кардинальным образом проблему повышения точности синтеза структур из-за появления новых и достаточно специфических проблем.

Анализ точности формирования топологии углоизмерительных структур (УИС), синтезированных с помощью современных ЛГИ не только с круговым сканированием, но и со сканированием в координатах $X-Y$, показал, что уже более полутора десятков лет она остаётся на одном уровне и не превышает значения $\pm 0,3''$ при диаметре структуры 150 мм (что соответствует так называемому фактору нестабильности $F = 0,109$ мкм [6]).

Данный результат достигнут японскими специалистами благодаря учёту (детектированию и последующей компенсации) искажающего вклада от восьми источников искажений в X–Y-генераторе изображений [7]. В России близкий результат (погрешность $\pm 0,7''$ при диаметре структуры 85 мм соответственно, $F = 0,144$ мкм) достигнут в 2007 г. в ЛГИ КС модели CLWS-300 и до настоящего времени никем в стране не был превышен. Применительно к ЛГИ КС подобную ситуацию можно связать с тем, что здесь не решён ряд проблем, связанных с аппаратной реализацией режима кругового сканирования, в том числе из-за наличия причин, ограничивающих повышение точности работы ЛГИ КС при использовании в них высокоточных УДВТ.

В данном исследовании изначально принято, что наиболее перспективным при решении проблемы повышения точности измерительного и технологического оборудования является применение именно УДВТ. Поэтому необходимо выявить механизмы действия основных источников искажений угловых координат, сопутствующих процессу синтеза или контроля точности топологии структур, но до сих пор не учитываемых в последующих автоматизированных процедурах компенсации искажающего вклада систематических составляющих погрешности.

Цель предлагаемой работы:

1. Представить результаты анализа достигнутой точности УДВТ двух ЛГИ КС модели CLWS-300, созданных в разное время;
2. Привести результаты контроля топологии УИС, сформированных с помощью данных ЛГИ КС;
3. Обозначить перспективные пути совершенствования как процедуры калибровки УДВТ, так и структуры оптико-механического блока ЛГИ КС, обеспечивающей более высокую точность синтеза топологии УИС.

В настоящее время повышение точности ЛГИ КС реализуют, как правило, двумя путями:

- 1) применением более сложной структуры считывания информации в УДВТ (известен как метод самокалибровки) [8];
- 2) использованием процедуры компенсации заранее выявленных значений погрешности УДВТ как такового (известен как метод автокомпенсации) [9].

Возможности повышения точности УДВТ за счёт применения метода самокалибровки значительны. Например, в УК модели WTM-905 (РТВ — Physikalisch-Technische Bundesanstalt) исходная погрешность УДВТ, равная $\pm 0,15''$, снижена до уровня $\pm 0,01''$ за счёт применения восьми считывающих головок (СГ), установленных вдоль образующей упомянутого раstra с шагом, равным 45° [10]. Результат достигается за счёт автоматического подавления в выходном сигнале датчика искажающего действия значительного числа гармоник спектра искажающей функции F_{err} , кроме так называемых характеристических гармоник, которые для данного случая кратны 8. При этом функция F_{err} может быть итогом совместного действия нескольких причин, и эффект подавления распространяется на все эти причины в равной степени. Однако надо принять во внимание то, что реально созданная в УК модели WTM-905 система считывания информации реализована на основе измерительного раstra диаметром 450 мм. Подобные габариты УДВТ для использования в ЛГИ КС промышленного назначения практически неприемлемы. Кроме того, для УДВТ таких габаритов характерны сравнительно невысокие (порядка 1,0–1,5 об/с) скорости вращения ротора, в то время как для ЛГИ КС промышленного назначения необходимы скорости вращения ротора на порядок выше.

Метод автокомпенсации принципиально позволяет подавить весь спектр гармоник искажающей функции F_{err} , чем он существенно отличается от метода самокалибровки. Но полное подавление реализуется только для тех причин, которые предварительно детекти-

рованы, и массивы данных об их искажающих вкладах зарегистрированы в ОЗУ управляющего компьютера и активно применяются им в ходе процедуры компенсации.

Для практики создания ЛГИ КС модели CLWS-300 характерно совместное использование обоих методов, причём режим самокалибровки реализован в варианте с минимальным усложнением структуры считывания информации. Например, число СГ в схеме УДВТ устанавливается равным двум или четырём. В такой ситуации ожидаемое повышение точности ЛГИ КС во многом связано с эффективностью процедуры компенсации искажающего вклада от сопутствующих источников искажений.

Тестирование эффективности методов повышения точности осуществлялось путём контроля точности изготовления топологии двух УИС, которые записаны на одной подложке в ходе одного технологического цикла. При этом первая структура записывалась без применения процедуры компенсации систематических составляющих погрешности УДВТ, а вторая — с компенсацией. Данный приём позволил выявить основные проблемы, связанные с реализацией подобных процедур, выполняемых на основе традиционных методов повышения точности калибровки референтных датчиков, встроенных в узлы вращения ЛГИ КС, УИМ или УК. Он дал возможность также наметить наиболее приемлемые пути достижения повышенной точности синтеза УИС. Эти пути предполагают совершенствование процедур учёта причин искажений, меняющихся во времени, и совершенствование конструкции оптико-механического блока ЛГИ КС.

Обзор и анализ выполненных вариантов реализации процедур калибровки и последующей компенсации систематических составляющих погрешности УДВТ. Проблемы, возникающие при калибровках УДВТ, анализируются на основе результатов, полученных при тестировании двух образцов ЛГИ КС модели CLWS-300, которые созданы в разные годы специалистами Института автоматики и электрометрии СО РАН и Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН. Эффективность одновременного применения методов самокалибровки и компенсации систематических составляющих погрешности УДВТ как программно-аппаратного средства повышения точности работы ЛГИ КС проверялась в ходе выполнения двух натурных экспериментов. Как уже упоминалось выше, их содержание состояло в записи на одной подложке и за одну технологическую операцию топологии двух УИС, имеющих одинаковые параметры (число штрихов $N = 6000$, высота штрихов 3 мм, скважность 2) и формируемых с помощью каждой из аттестуемых установок. При этом первая УИС (измерительный растр) располагалась на радиусе $R_{\text{ср}} = 43,5$ мм и формировалась без введения коррекции систематических составляющих погрешности УДВТ, а вторая — на радиусе $R_{\text{ср}} = 35,5$ мм, но с введением коррекции. Для определения метрологических характеристик УИС использовалась специализированная УИМ модели АЭ.1686 [11], ориентированная для работы исключительно с УИС.

Экспериментальные результаты калибровки и последующей компенсации систематической составляющей погрешности УДВТ узла вращения ЛГИ КС выпуска 2003 г. В данном образце ЛГИ КС установлен УДВТ с двумя СГ, локализованными вдоль образующей раstra через 180° . В соответствии с теорией метода [12] такое расположение СГ позволяет исключить все нечётные гармоники спектра кривой погрешности датчика, но оставляет при этом неизменными искажающие вклады чётных гармоник. Процедура калибровки собранного УДВТ выполнялась после окончательной сборки ЛГИ КС с использованием типовой методики кросс-калибровки [13]. Для этого на планшайбе генератора устанавливается специальный соединительный фланец с гибкой муфтой равных угловых скоростей, а на гранитной плите — специализированный стенд, монтируемый над планшайбой и имеющий в своём составе образцовый угловой датчик [14]. С помощью данного стенда формировался файл данных, характеризующий систематическую составляющую погрешности УДВТ. Полученный файл затем хранился в памяти компьютера,

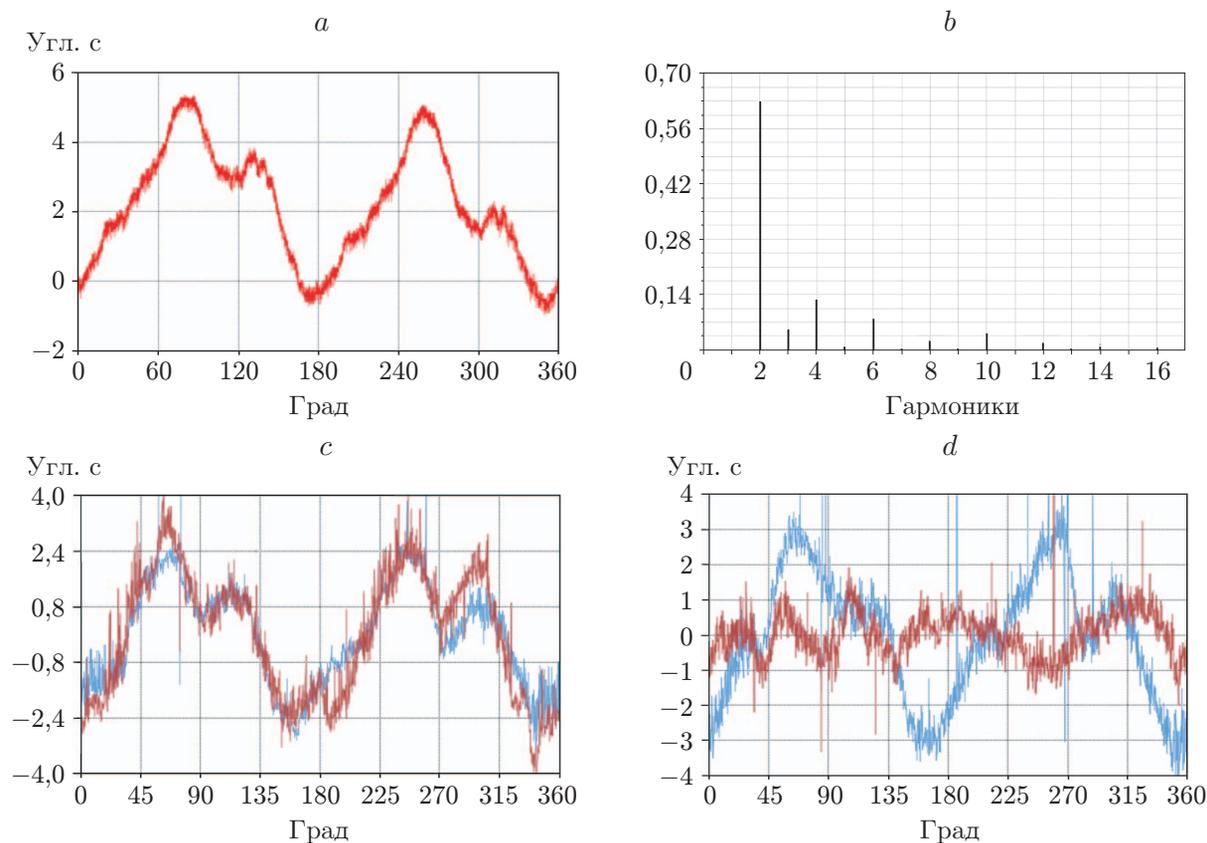


Рис. 1. Результаты измерений ЛГИ КС выпуска 2003 г.: *a* — калибровочная кривая УДВТ, *b* — спектральный состав УДВТ, *c* — графики результирующей погрешности УИС, *d* — графики результирующей погрешности с введением и без введения коррекции

управляющего работой ЛГИ КС. Сформированная кривая погрешности УДВТ представлена на рис. 1, *a*. Из приведённого графика следует, что систематическая составляющая погрешности этого датчика лежит в пределах от $-0,8''$ до $+5,0''$. После центрирования данных формируется типовое представление погрешности, оцениваемое как $\pm 2,9''$. Наличие двух горбов на кривой калибровки однозначно указывает на применение двух СГ в составе УДВТ, расположенных через 180° . Здесь же (рис. 1, *b*) приведён спектр гармоник данной кривой погрешности УДВТ, из которого видно, что основной искажающий вклад вносят именно чётные гармоники.

Результат контроля погрешности топологии УИС, сформированной без введения коррекции, представлен на рис. 1, *c*. Здесь красным цветом представлена кривая погрешности формирования передних кромок штрихов, а синим — задних. Анализируя данные графики, можно сделать вывод, что при синтезе топологии УИС без введения коррекции метрологические характеристики УИС ($\delta = \pm 3,5''$) и форма кривой погрешности достаточно сильно коррелируют с аналогичными параметрами УДВТ (см. рис. 1, *a*).

Принципиально интересными представляются результаты контроля погрешности формирования топологии УИС, записанной с введением коррекции на систематическую составляющую погрешности УДВТ (рис. 1, *d*, красная кривая). Для наглядности представления эффекта компенсации здесь же синим цветом изображена кривая погрешности топологии УИС без коррекции. Из графика следует, что при использовании УДВТ с двумя СГ

и файла коррекции его систематической погрешности результирующая погрешность формирования УИС заметно уменьшилась и составила значение $\pm 1,0''$. Она, с одной стороны, характеризует метрологическое качество ЛГИ КС как технологического оборудования, а с другой — позволяет оценить эффективность проведения процедуры автоматической компенсации систематической составляющей погрешности. Так, показатель эффективности проведения данной процедуры в этом случае оценивается на уровне 3,5 раза. Более того, форма кривой результирующей погрешности формирования УИС (см. рис. 1, *d*) однозначно указывает на существенное отличие первопричин, формирующих конечный результат синтеза УИС, по сравнению с исходной процедурой. Но, к сожалению, полученный результат не определяет механизм действия этих первопричин. Данная проблема будет обсуждаться далее.

Экспериментальные результаты калибровки и последующей компенсации систематической составляющей погрешности УДВТ узла вращения ЛГИ КС выпуска 2007 г. Узел вращения в ЛГИ КС существенно модернизирован. В нём впервые использован УДВТ с четырьмя СГ, установленными вдоль образующей используемого растра регулярно с шагом в 90° . В соответствии с теорией метода [12] такое расположение СГ позволяет устранить в спектре кривой погрешности датчика все гармоники, кроме кратных 4. В результате должна заметно повыситься точность УДВТ. Аттестация смонтированного датчика, которая выполнена с помощью стенда, реализующего метод кросс-калибровки, подтвердила приведённый выше основной постулат данного метода. На рис. 2, *a* представлена кривая погрешности собранного УДВТ. Из этого графика следует, что погрешность данного УДВТ лежит в пределах $[0, 0,7'']$. Четыре горба калибровочной кривой подтверждают наличие четырёх СГ в датчике. Операция центрирования данных позволяет получить стандартное представление величины погрешности созданного УДВТ, которое оказалось равным $\pm 0,35''$. Это значение практически на порядок меньше погрешности датчика ЛГИ КС предыдущей модификации. На рис. 2, *b* показан реальный спектральный состав гармоник кривой погрешности датчика. Из этого графика следует, что доминирующими здесь являются гармоники спектра, кратные 4.

Подобное уменьшение погрешности УДВТ направлено на существенное улучшение показателя точности ЛГИ КС как технологического средства. Одновременно ожидалось, что улучшится и показатель эффективности процедуры компенсации систематической составляющей погрешности УДВТ. Эффективность применения данного технического решения проверялась результатами другого натурального эксперимента, реализующего запись УИС с введением и без введения коррекции на систематическую составляющую погрешности УДВТ.

На рис. 2, *c* представлена калибровочная кривая погрешности УИС, синтезированной без введения коррекции систематической составляющей погрешности датчика. Из приведённого графика следует, что в этом случае погрешность записи топологии УИС достигла значения, равного $\pm 0,9''$, которое оказалось меньше, чем погрешность УИС, синтезируемых ЛГИ КС предыдущей модификации с введением компенсации. Но одновременно следует отметить то, что оно существенно (в 2,5 раза) превышает погрешность используемого датчика. В этом полученный результат заметно отличается от предыдущего. Данное отличие можно трактовать наличием серьёзного вклада сопутствующего неизвестного источника искажений.

Поэтому результаты записи тестовой структуры с введением поправок на систематическую составляющую погрешности датчика представляют значительный интерес для последующего анализа. Данный результат приведён на рис. 2, *d* (красная кривая). Из графика следует, что при использовании УДВТ с четырьмя СГ, расположенными через 90° , и файла коррекции результирующая погрешность синтезированной структуры составила

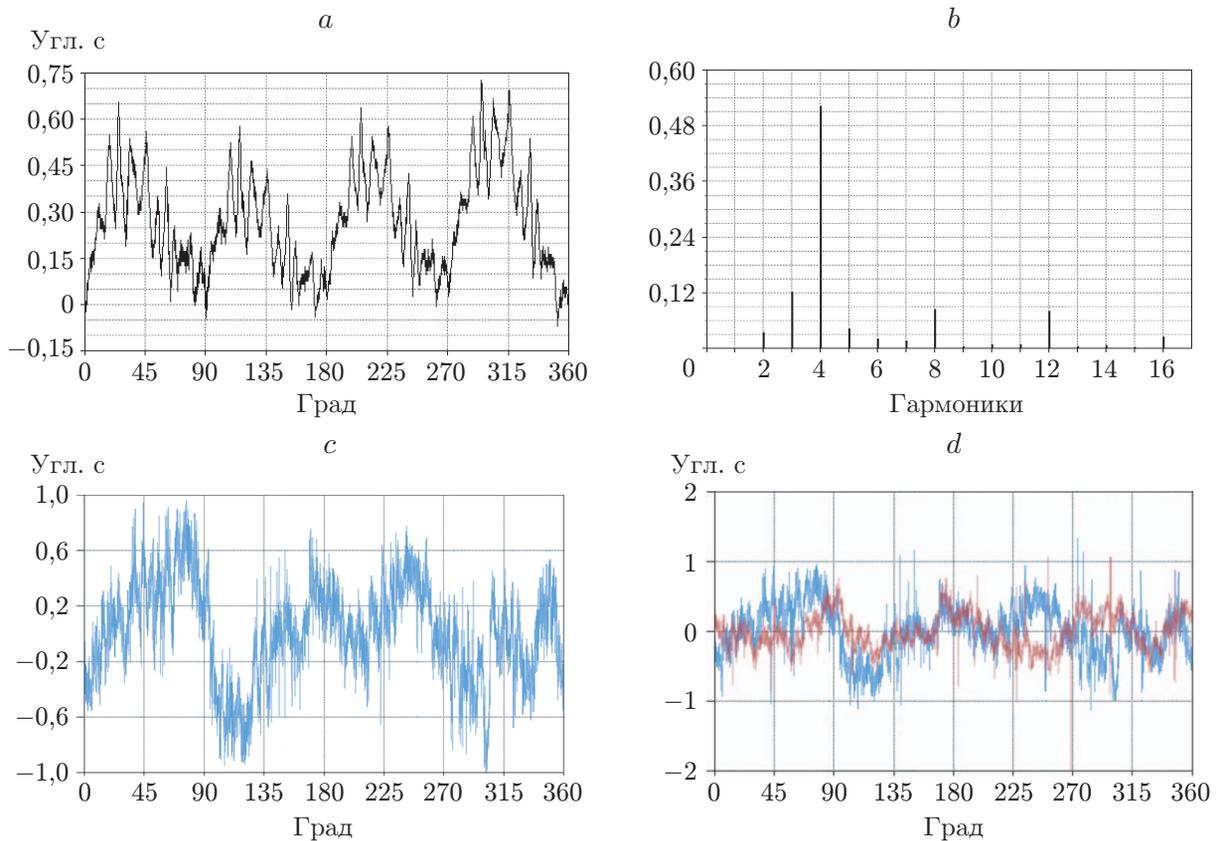


Рис. 2. Результаты измерений ЛГИ КС выпуска 2007 г.: *a* — калибровочная кривая УДВТ, *b* — спектральный состав УДВТ, *c* — графики результирующей погрешности УИС, *d* — графики результирующей погрешности с введением и без введения коррекции

значение $\pm 0,6''$. Для наглядности представления эффекта компенсации этот график совмещён с графиком погрешности записи без введения коррекции (голубой цвет). Эти кривые указывают на то, что и в данном случае точность синтеза УИС с коррекцией повышается, но по сравнению с режимом записи без коррекции погрешность синтеза снижена только в 1,5 раза. Сравнив результаты записи УИС с введением коррекции ($\delta = \pm 0,6''$) и без неё ($\delta = \pm 0,9''$), можно сделать вывод, что процедура компенсации систематической составляющей УДВТ (равной $\pm 0,35''$) реализована фактически на 100 %. Следует также отметить, что при использовании УДВТ, погрешность которого ниже искажающего вклада сопутствующего источника искажений, формы графиков обеих кривых погрешности синтезированных УИС достаточно близки друг другу. Это существенно отличает результаты этого натурального эксперимента от предыдущего, в котором использовался менее точный УДВТ. На основании этого можно заявить, что в данном образце ЛГИ КС модели CLWS-300 (2007 г.) искажающие вклады от сопутствующего источника возмущений в результаты синтеза структур являются доминирующими.

Обсуждение экспериментальных результатов автоматической компенсации погрешности датчика. Предварительный анализ эффективности применения метода автокомпенсации систематических составляющих погрешности УДВТ, представленный в предыдущих разделах работы, однозначно указывает на наличие неучтённых источников, существенно искажающих результаты синтеза структур. В выполненных экспериментах

явно не обнаруживаются природа появления этих источников и их возможное число. Поэтому важно определиться с наиболее правдоподобными источниками происхождения искажающих факторов, проявивших себя в натурных экспериментах.

Наиболее сильно проявляется искажающее действие этих источников во втором эксперименте, когда абсолютное значение систематической составляющей погрешности УДВТ заметно меньше суммарного остаточного эффекта от переменной (случайной) составляющей процесса измерений: $\pm 0,35''$ против $\pm 0,6''$ соответственно. Кроме того, выше установлено, что предварительно подготовленные данные для автоматизированного выполнения процедур компенсации систематической составляющей погрешности УДВТ используются в экспериментах практически на 100 %. Следовательно, наличие остаточного искажающего вклада обусловлено присутствием ряда источников искажений, которые объективно не выявлены и не компенсированы. Более того, применённое при предварительной калибровке УДВТ измерительное оборудование внесло свои неконтролируемые искажения в результаты калибровки.

Очевидно, что для обеспечения дальнейшего повышения точности синтеза УИС с помощью ЛГИ КС необходимо выявить важнейшие источники искажений, сопутствующие: 1) процессу калибровки УДВТ, 2) процессу синтеза топологии УИС, 3) процессу компенсации выявленных источников искажений, проводимому одновременно с синтезом структур. При этом при принятии решений следует также учитывать, что метод автокомпенсации позволяет успешно подавлять только систематические составляющие погрешности датчика. Случайные составляющие, в принципе, он также может подавить, но только в реальном времени (по следующей схеме: измерить искажающий вклад и тут же его устранить). Но в анализируемых натурных экспериментах реализация подобного режима измерений и компенсаций не предусматривалась. Поэтому, конечно, можно говорить о наличии у метода автокомпенсации принципиальных ограничений на использование предварительно зарегистрированных данных, но только от источников, искажающий вклад которых меняется во времени.

Более того, второй эксперимент показывает, что, не выяснив природы происхождения доминирующих возмущений, не имеет смысла повышать точность датчика выше некоторого уровня. В анализируемом случае этот уровень находится в пределах $\pm 0,6''$. И наконец, замечание, касающееся возможного искажающего вклада измерительного оборудования. Известно, что применение в экспериментах гибких компенсационных муфт равных угловых скоростей неизбежно вносит свой искажающий вклад в результаты калибровок [15, 16]. Но на практике он, как правило, неизвестен, поскольку абсолютное значение искажений, вносимых одной и той же муфтой, зависит от точности выставления эталонного датчика относительно вала контролируемого ротора шпинделя. И эта причина также может создавать некий уровень неопределённости, выше которого действительно не имеет значения повышать точность датчика. Для этого источника искажений очевидно предложение по минимизации его искажающего вклада: исключить данный элемент измерительного стенда из схемы калибровки в тех случаях, когда ставится задача снижения погрешности синтеза УИС, например, ниже уровня $\pm 0,5''$.

Механизмы формирования источников искажений при угловых измерениях. В общем виде погрешность угловых измерений достаточно часто представляют в виде композиции двух составляющих:

$$\delta(\varphi) = \delta(\varphi)_{\text{сист}} + \delta(\varphi)_{\text{случ}},$$

где $\delta(\varphi)_{\text{сист}}$ — систематическая составляющая погрешности измерений и $\delta(\varphi)_{\text{случ}}$ — случайная составляющая. К систематическим составляющим погрешности измерений относят инструментальную погрешность, связанную с неточностью формирования топологии

УИС, а также составляющую, обусловленную несоосностью фиксации стеклянного носителя УИС на валу, угловое положение которого должен регистрировать угловой датчик. Эта составляющая, известная как погрешность эксцентриситета, остаётся постоянной до последующего демонтажа УДВТ. При дальнейшем анализе данный тип погрешности целесообразно отнести к своеобразному семейству источников искажений угловых измерений, которые обусловлены отклонениями от идеальных круговых траекторий сканирования УИС, реализуемых СГ датчика в ходе измерений. Это семейство объединяет, кроме погрешности эксцентриситета, также составляющую погрешности, обусловленную наличием паразитных движений оси вала в радиальных направлениях. Но эта составляющая уже не относится к систематическим компонентам, так как в любой момент времени может принимать случайные значения. Например, движение оси вала в радиальном направлении может быть вызвано биениями подшипников, на которых установлен вал. В зависимости от типа подшипника меняется природа происхождения источника возмущений. В случае подшипников качения паразитные движения оси вала обусловлены радиальными биениями элементов качения: шариков или роликов [17]. При условии использования аэростатических подшипников паразитные движения оси вала в радиальном направлении вызваны наличием дисбаланса центра масс самого вала и присоединённых к нему узлов и деталей. А поскольку общая масса этих элементов может быть разной в ходе каждого отдельного процесса записи УИС, то положение центра суммы масс в каждом технологическом процессе также может быть разным. В [18] показано, что в подобном случае траектория движения оси вала будет обусловлена совокупным движением поверхности носителя УИС из-за наличия одновременно и поступательного, и вращательного движений оси вращения ротора и будет представлять достаточно сложную кривую. Применительно к анализируемым экспериментам следует особо отметить, что в принятых в них процедурах калибровки данный тип искажений остаётся неучтённым. Это позволяет считать, что указанная причина искажений результатов калибровки действительно проявляет себя в результатах записи с автокомпенсацией погрешности, но не учитывается в процедуре компенсации.

И наконец, относительно возможного искажающего вклада самого измерительного оборудования рассмотрим две конфигурации узлов вращения, формируемых в механической системе ЛГИ КС при синтезе УИС и калибровке УДВТ. Первый вариант, формируемый при синтезе УИС, назовём системой «шпиндельный узел + носитель УИС» (рис. 3, *a*), а второй вариант, возникающий при калибровке УДВТ, — системой «шпиндельный узел + измерительный стенд» (рис. 3, *b*).

Нетрудно выявить отличия, которые дают соответствующие отклонения в возникающих траекториях движения СГ относительно поверхности УИС. Так, во втором варианте вместо стеклянной подложки УИС 1 появляются дополнительные массы специального соединительного фланца 16, фиксируемого на планшайбе 2, гибкой муфты равных угловых скоростей 15, устанавливаемой на этом фланце, и ротора эталонного углового датчика 17 (см. рис. 3, *b*). Важно отметить и то, что в первом варианте верхний торец ротора шпинделя совместно с планшайбой 2, носителем УИС 1 и промежуточным валом 3 (см. рис. 3, *a*) находятся в свободном состоянии.

В случае же присоединения измерительного стенда с помощью специального соединительного фланца 16 и упругой муфты 15 к планшайбе 2 шпиндельного узла ЛГИ КС (см. рис. 3, *b*) ротор шпиндельного узла 4 оказывается в несвободном состоянии. Это, естественно, заметно изменит параметры отклонений реальных траекторий сканирования, возникающих в ходе выполнения процедуры калибровки, от идеальной окружности по сравнению с возможными паразитными отклонениями траекторий в исходной схеме. Из этого можно сделать вывод, что полученный с помощью подобного стенда массив данных, характеризующий действие искажающих факторов в механической системе «шпиндельный узел + измерительный стенд», не совсем точно отображает действие искажающих

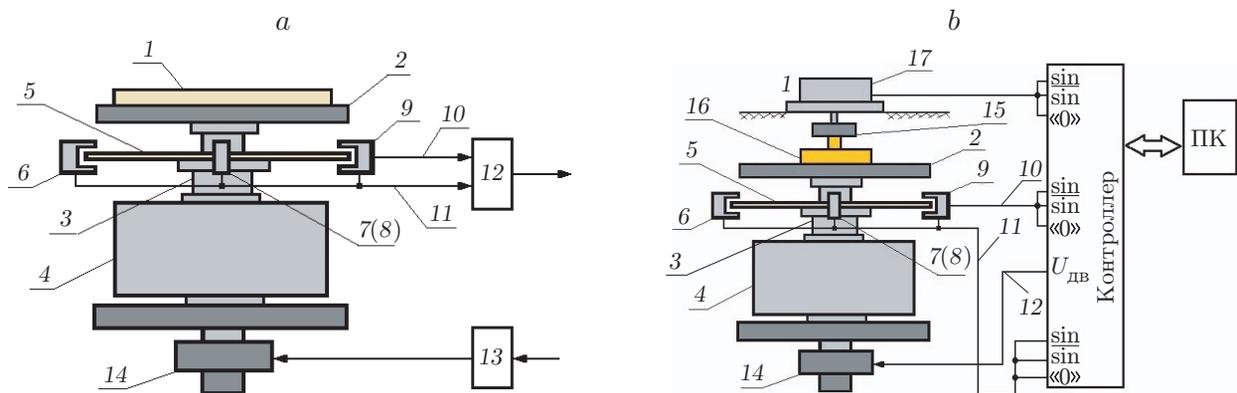


Рис. 3. Кинематические схемы двух механических систем: а) «шпиндельный узел + носитель УИС» (обозначения: 1 — УИС; 2 — планшайба; 3 — промежуточный вал; 4 — аэростатический подшипник; 5 — измерительный растр УДВТ; 6, 7, 8, 9 — набор СГ; 10 — выход рабочего УДВТ; 11 — выход референтного УДВТ; 12 — модуль связи; 13 — силовой драйвер; 14 — двигатель); б) «шпиндельный узел + измерительный стенд» (обозначения: 15 — муфта равных угловых скоростей, 16 — соединительный фланец, 17 — эталонный угловой датчик)

факторов в исходной системе. Это может приводить к неточной компенсации погрешности. Подобную ситуацию можно трактовать не только как наличие искажающего вклада измерительного оборудования в результаты калибровки референтных УДВТ, но и как неточный учёт одной из возможных причин искажений. В любом случае возникает ситуация, которую следовало бы избежать, если ставится задача синтеза УИС повышенной точности.

Предложения по решению проблем повышения точности калибровки и последующей компенсации измеренной погрешности УДВТ. Одним из наиболее очевидных решений повышения точности калибровки является устранение из схемы измерительного комплекса гибкой муфты равных угловых скоростей. Другим важным техническим решением по совершенствованию конструкции измерительного комплекса является требование сохранения идентичности конфигурации механических систем, формирующих узел вращения как при синтезе прецизионных УИС, так и при калибровке встроенного референтного датчика комплекса (например, ЛГИ КС). Данное требование реализуется, например, в конструкциях УК модели WMT-905 [10], созданного в РТВ (Германия) и используемого в качестве национального эталона плоского угла, и УК модели WMT-220 (фирма Heidenhain, Германия). Обе конструкции имеют дополнительные поворотные столики, органически встроенные в роторы основных аэростатических подшипников и используемые для выполнения процедур воспроизведения, хранения и передачи единицы плоского угла вторичным и рабочим эталонам методом прямых измерений. Главный принцип, заложенный в конструкцию этих установок, — это неизменность технического оснащения измерительного процесса вне зависимости от выполняемой процедуры.

И наконец, принципиально важным для решения проблемы повышения точности синтеза УИС является учёт в реальном времени текущих случайных отклонений траекторий сканирования от идеальной круговой траектории. Для этого целесообразно использовать, например, конструкцию узла вращения, рассмотренную в [19], которая позволяет непрерывно отслеживать отклонения в пространстве текущих положений оси вращения ротора узла вращения от их идеальных положений и в реальном времени вводить поправки в данный вид искажений.

Заключение. Применённая методика исследований на основе тестовых структур с коррекцией и без коррекции систематических составляющих погрешности УДВТ позволила достаточно эффективно выявить особенности искажающих вкладов от источников возмущений, сопутствующих процессу записи структур. Результаты натуральных экспериментов показывают, что схема калибровки УДВТ с использованием внешних эталонных угловых датчиков позволяет реализовать данную процедуру на уровне не более $\pm 0,5''$. Отмечено, что при применении внешних эталонов параметры и конфигурация механической системы измерительного стенда заметно отличаются от свойств механической системы, используемой при синтезе топологии УИС.

Показано, что стандартное подключение внешнего эталонного углового датчика существенно меняет механические характеристики измерительного комплекса и тем самым вносит дополнительные искажения в результаты калибровки УДВТ.

Представленные выше технические предложения целесообразно использовать для создания ЛГИ КС повышенной точности.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по государственному заданию № 124041700067-6 в ИАиЭ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kojima T., Kikuchi Y., Seki S., Wakiwaka H.** Study on high precision angle measuring technology // Proc. of the 30th Ann. Conf. of IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Busan, South Korea, 2–6 Nov., 2004. Vol. 2. P. 1530–1535.
2. **Kim J.-A., Kim J. W., Kang C.-S. et al.** Precision angle comparator using self-calibration of scale errors based on the equal-division-averaged method // Rev. Sci. Instrum. 2011. **82**, Iss. 11. 116108.
3. **Корольков В. П.** Лазерные литографические системы и технологии синтеза рельефно-фазовых оптических элементов: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2013. 351 с.
4. **Geckeler R. D., Just A.** A shearing-based method for the simultaneous calibration of angle measuring devices // Measurement Sci. and Technol. 2014. **25**, N 10. 105009.
5. **Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Качкин А. Е. и др.** Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях // Датчики и системы. 2015. № 9–10. С. 45–52.
6. **Кирьянов А. В., Зотов А. А., Каракоцкий А. Г. и др.** Оперативный контроль оптических прецизионных углоизмерительных структур // Оптический журнал. 2019. **86**, № 9. С. 60–62.
7. **Kojima T., Kikuchi Y., Seki S. et al.** Development of high-precise angle calibrating apparatus and high-precise angle sensor // Proc. of the 1st Int. Conf. on Positioning Technology. Hamamatsu, Japan, 9–11 June, 2004. P. 417–422.
8. **Watanabe T., Fujimoto H.** Application of a self-calibratable rotary encoder // Proc. of the 9th Int. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTEI), Saint-Petersburg, Russia, 29 June – 2 July, 2009. Vol. 3. P. 54–58.
9. **Angular encoders: General Catalog.** Heidenhain GmbH. Traunreut, Germany: Heidenhain GmbH, 2019. 82 p.
10. **Probst R., Just A.** Recent developments in angle encoder calibration at the PTB // Proc. of the 186th PTB-Seminar. Braunschweig, Germany, Nov. 2003. P. 117.
11. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Чуканов В. В.** Использование дифференциального метода измерений для контроля точности прецизионных углоизмерительных структур // Автометрия. 2016. **52**, № 4. С. 45–52. DOI: 10.15372/AUT20160406.

12. **Ионак В. Ф.** Приборы кинематического контроля. М.: Машиностроение, 1981. 129 с.
13. **Павлов П. А.** Особенности метода кросс-калибровки в лазерной гониометрии // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 21–24.
14. **Кириянов В. П., Каракоцкий А. Г., Кириянов А. В.** Тестирование долговременной стабильности метрологических характеристик лазерного генератора изображений модели CLWS-300 // Автометрия. 2023. **59**, № 5. С. 100–106. DOI: 10.15372/AUT20230510.
15. **Пин Ч. Ч.** Исследование точности прецизионных муфт при производстве: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. С.-Пб., 1998. 21 с.
16. **Смирнов Н. В.** Исследование метода и стенда для контроля погрешностей преобразователей угловых перемещений с автоматической коррекцией результатов измерений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. С.-Пб., 2016. 22 с.
17. **Кириянов А. В., Кириянов В. П.** Повышение точности угловых измерений с помощью фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа // Автометрия. 2012. **48**, № 6. С. 84–91.
18. **Жилин П. А.** Динамика гиростата на упругом основании // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 1997. № 1. С. 163–251.
19. **Кириянов А. В., Кириянов В. П.** Метод компенсации искажений траекторий относительного движения записывающего луча в лазерных генераторах изображений с круговым сканированием // Автометрия. 2019. **55**, № 3. С. 94–102. DOI: 10.15372/AUT20190311.

Поступила в редакцию 16.10.2024

После доработки 29.11.2024

Принята к публикации 10.01.2025
