

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

## ТЕСТИРОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ МОДЕЛИ CLWS-300

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

<sup>1</sup>Институт автоматики 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

Проведены эксперименты по тестированию долговременной стабильности метрологических показателей лазерного генератора изображений модели CLWS-300, используемого в технологическом процессе выпуска оборудования гониометрического типа. Показано, что на временном интервале 18 лет лазерный генератор модели CLWS-300 сохранил способность воспроизводить свои показатели практически в неизменном виде.

*Ключевые слова:* лазерный генератор изображений, метрологические показатели, углоизмерительная структура, топология элемента, угловая погрешность, углоизмерительная машина.

DOI: 10.15372/AUT20230510

**Введение.** Для большинства пользователей высокотехнологического оборудования, применяемого в реальном производстве, важное значение имеет долговременная стабильность его метрологических показателей. Данное требование в полной мере относится и к лазерным генераторам изображений с круговым сканированием (ЛГИ КС), используемым для формирования круговых шкал, растров, лимбов, сеток и других изделий в современной оптико-механической отрасли. На рубеже веков ведущие в РФ предприятия: АО «ПО «Уральский оптико-механический завод»» (г. Екатеринбург) и АО «НПП «Геофизика — Космос»» (Москва) приняли решение о модернизации своих оптических делительных производств на базе компьютерно-лазерных технологий, созданных институтами Сибирского отделения Российской академии наук [1]. В 2001 г. в Екатеринбурге и 2003 г. в Москве Конструкторско-технологический институт научного приборостроения совместно с Институтом автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ) передали в эксплуатацию в оптических производствах АО «Уральский оптико-механический завод» (УОМЗ) и АО «Геофизика — Космос» (ГФК) лазерные генераторы изображений модели CLWS-300 [2]. Основное применение данного оборудования в оптическом производстве ГФК — синтез мастер-дисков с углоизмерительными структурами (растрами, многоразрядными кодовыми дисками) для оптических угловых преобразователей абсолютного и инкрементного типов [3–5]. Серьёзную озабоченность метрологической службы ГФК вызывает отсутствие утверждённых предприятиями Госстандарта методик повседневных и периодических проверок метрологических характеристик оборудования типа ЛГИ КС. В настоящее время стратегия пользования ЛГИ КС в производственном цикле строится на основе ожидаемой стабильности во времени его метрологических характеристик, определённых в ходе приёмо-сдаточных испытаний (ПСИ). По этой причине результаты тестирования метрологических характеристик ЛГИ КС, определённые после достаточно протяжённого интервала работы генератора, имеют принципиальное значение для пользователей оборудования.



Рис. 1. Внешний вид ЛГИ КС модели CLWS-300

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение ожидаемой долговременной стабильности ЛГИ КС модели CLWS-300, определённой путём анализа регистрируемых показателей точности углоизмерительных растров, которые сформированы с помощью генератора, подвергнутого тестированию через значительный временной интервал после ввода его в эксплуатацию.

**Методическая основа процедуры тестирования долговременной стабильности метрологических характеристик ЛГИ КС.** Погрешность формирования топологии углоизмерительных структур с помощью ЛГИ КС, общий вид которого приведён на рис. 1, можно представить в виде систематической и случайной составляющих:

$$\Delta_{\text{ЛГИ}} = \delta_{\text{сист}} + \delta_{\text{случ}}. \quad (1)$$

Применительно к лазерному генератору  $\delta_{\text{сист}}$  — систематическая составляющая, обусловленная в основном погрешностью референтного углового датчика ЛГИ,  $\delta_{\text{случ}}$  — случайная составляющая, вызванная нестабильностью возникающих при записи структур по тем или иным причинам отклонений от идеальной окружности траектории движения лазерного луча по поверхности подложки. Теоретически систематическая составляющая может быть полностью скомпенсирована, случайная же составляющая такой возможности не имеет — она всегда присутствует в результатах синтеза структур, реализуемого с помощью ЛГИ, и формирует основную часть итоговой погрешности топологии структур. Реально же при выполнении процедуры компенсации какая-то часть систематической составляющей всегда остаётся нескомпенсированной. В метрологии существует даже специальный показатель: неисключённая систематическая погрешность (НСП) [6].

В ходе приёмо-сдаточных испытаний, выполненных в 2003 г., была определена калибровочная кривая (рис. 2, *a*) погрешности референтного углового датчика ЛГИ КС модели CLWS-300, поставленного в оптическое производство ГФК.

Файл данных, характеризующих кривую, был получен с применением метода кросс-калибровки [7, 8] и занесён в память компьютера, управляющего процессом записи структур в ЛГИ. На рис. 2, *b* показан разработанный стенд для проведения операции калибровки референтного датчика ЛГИ.

Обязательным элементом любых ПСИ является получение итогового результата — графика кривой погрешности углоизмерительного растра, синтезированного с помощью поставляемого ЛГИ. Для получения данного результата в 2003 г. использовалась углоизмерительная машина (УИМ) модели АС-700 [9, 10], поставленная в своё время ГФК в оптическое производство УОМЗ. Кривая погрешности, полученная с помощью этой установки, приведена на рис. 3.

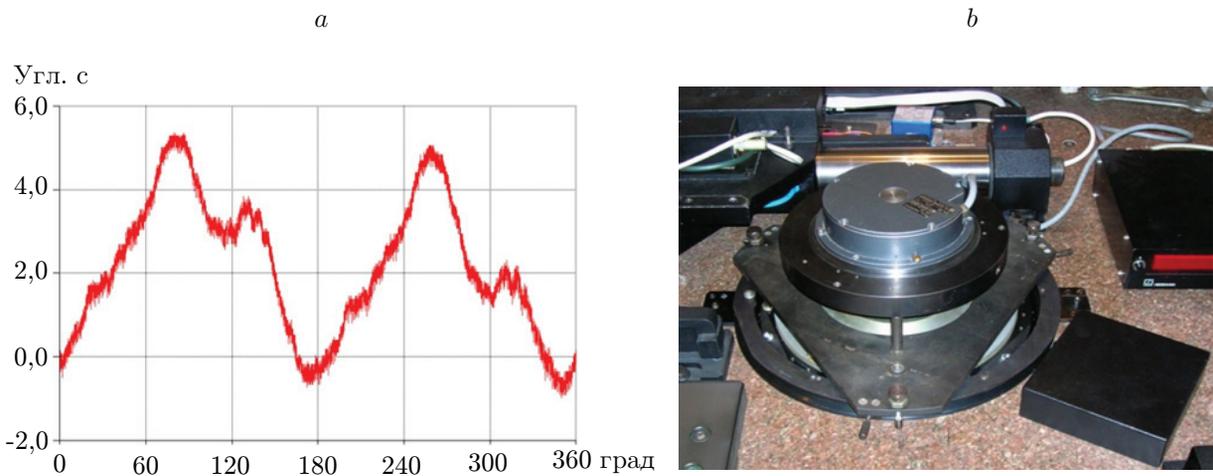


Рис. 2. Приёмо-сдаточные испытания ЛГИ КС в ГФК в 2003 г.: *a* — калибровочная кривая; *b* — стенд для кросскалибровки

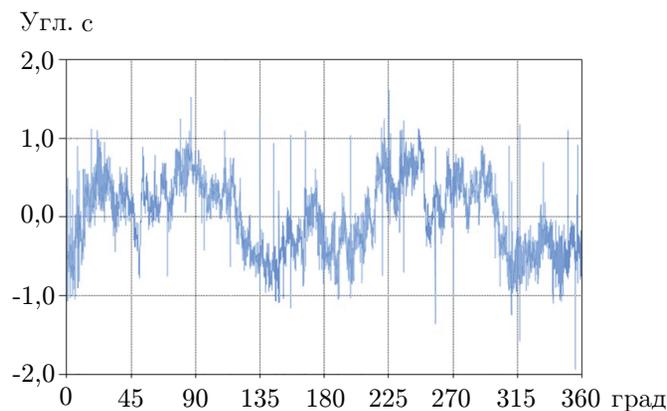


Рис. 3. Кривая погрешности углоизмерительного растра, полученная в ходе ПСИ

Из приведённых графиков на рис. 2, *a* и 3 можно сделать следующие выводы: систематическая составляющая ЛГИ, поставленного в ГФК, лежит в пределах  $\pm 2,8''$ . Случайная составляющая (совместно с НСП определяющая точность формирования топологии структур) не превышает пределов  $\pm 1,0''$ . Она характеризует метрологическое качество лазерного генератора как технологического оборудования, используемого в производстве углоизмерительных приборов.

Для оценки долговременной стабильности метрологических характеристик ЛГИ целесообразно на выбранном временном интервале использовать результаты контроля воспроизводимости показателей, зарегистрированных в ходе ПСИ.

**Инструментальная основа процедуры тестирования долговременной стабильности метрологических характеристик ЛГИ КС.** Для тестирования долговременной стабильности метрологических характеристик установки (ГФК) была использована круговая измерительно-диагностическая установка модели АЭ.1686 (рис. 4), созданная в ИАиЭ СО РАН [11–12].

Предварительно в конце 2021 г. специалисты ГФК записали фотшаблон (рис. 5) с двумя дорожками круговых растров: на одной дорожке растр 1 без коррекции систематической составляющей ЛГИ КС, на другой — растр 2 с введением коррекции. Качество записи топологии растров оценивалось визуально с помощью технологического монито-

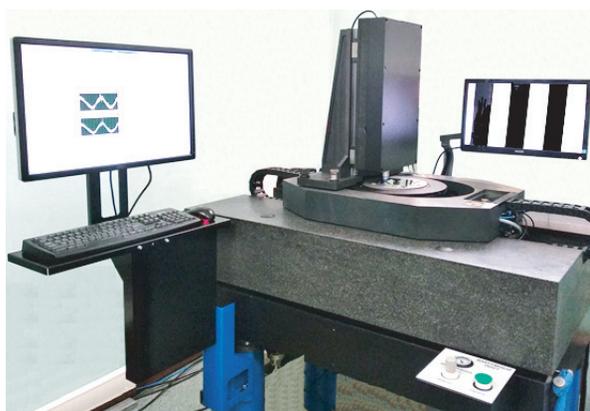


Рис. 4

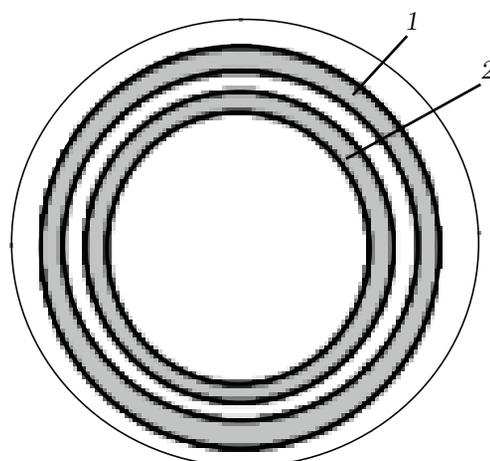


Рис. 5

Рис. 4. Внешний вид круговой измерительно-диагностической установки модели АЭ.1686

Рис. 5. Тестовый образец структуры: 1 — растр без введения коррекции систематической погрешности, 2 — растр с введением коррекции систематической погрешности

ра установки АЭ.1686 и аналитически путём вывода кривых угловой погрешности формирования элементов топологии углоизмерительных структур. Для каждого записанного растра снимались экспериментальные данные и рассчитывались файлы данных, характеризующих кривые угловой погрешности контролируемых структур. Результаты расчётов выводились на операционный монитор установки и на внешний накопитель и служили экспериментальной основой для оценки долговременной стабильности параметров технологического оборудования.

**Экспериментальные результаты тестирования долговременной стабильности метрологических характеристик ЛГИ КС.** Долговременную стабильность технологических показателей ЛГИ удобно оценивать визуально с помощью технологического монитора установки АЭ.1686. На рис. 6, *a* и *b* приведены микрофотографии переднего и заднего краёв штриха одного из синтезированных растров.

Так как установка АЭ.1686 реализует режим работы на отражение, то на рис. 6 светлым участкам соответствуют отражающие краевые области штрихов, синтезированных в хромовых плёнках, а тёмным областям — прозрачные промежутки между штрихами.

На рис. 7, *a* представлены два графика кривых погрешности растра 1, снятые в разные промежутки времени, но без изменения пространственного положения подложки. Растр 1 сформирован без введения коррекции систематической составляющей, связанной с референтным угловым датчиком ЛГИ. Здесь же на рис. 7, *b* для удобства принятия решения о стабильности воспроизведения систематической составляющей погрешности приведена кривая угловой погрешности референтного датчика ЛГИ, полученная в 2003 г.

На рис. 8, *a* представлен результат контроля погрешности растра 2, записанного в 2021 г. с коррекцией систематической составляющей погрешности. Для наглядности оценок на рис. 8, *b* приведена полученная в 2003 г. кривая погрешности растра, синтезированного на установке CLWS-300 в том же году с введением коррекции систематической составляющей датчика.

**Обсуждение результатов тестирования долговременной стабильности метрологических характеристик ЛГИ КС.** По представленным микрофотографиям (см. рис. 6, *a* и *b*) видно, что через 18 лет после запуска в эксплуатацию на оптическом

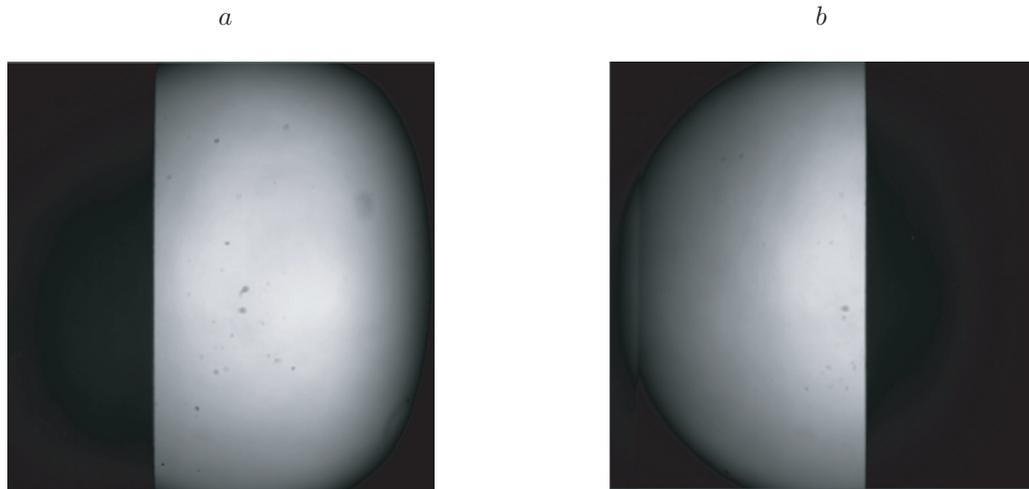


Рис. 6. Микрофотографии границ топологических элементов углоизмерительной структуры: *a* — передний край штриха раstra; *b* — задний край штриха раstra

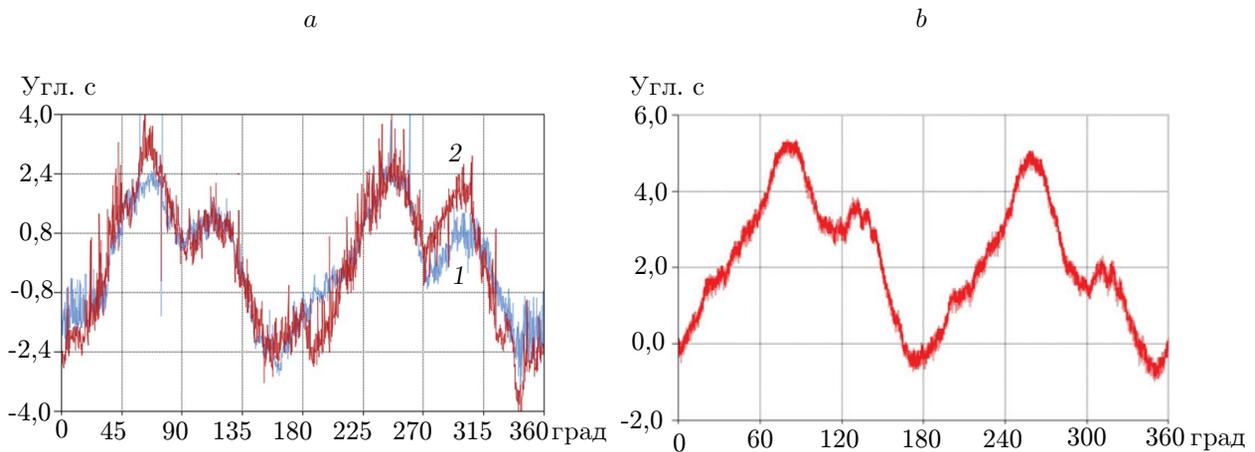


Рис. 7. Данные для оценки стабильности систематической составляющей ЛГИ CLWS-300 (ГФК): *a* — кривые угловой погрешности раstra, записанного без коррекции (1 — передний край штриха, 2 — задний край штриха); *b* — калибровочная кривая погрешности референтного датчика ЛГИ

производстве АО «Геофизика — Космос» установка CLWS-300 по-прежнему формирует границы топологических элементов с высоким качеством (неровность края менее 0,1 мкм).

Анализ кривых, представленных на рис. 7, *a*, показывает, что объективно вклад систематической составляющей погрешности формирования топологии структур, обусловленный угловой погрешностью референтного датчика ЛГИ, составляет  $\pm 3,0''$ . Данная составляющая учитывается в процессе формирования топологии с «весом»  $\pm 2,8''$ . Разность между зарегистрированными показателями составляет  $\pm 0,2''$ , которая может быть, в принципе, отнесена к неопределённости выполнения процедуры калибровки методом кросскалибровки. Формы кривых коррелируют между собой достаточно сильно.

Долговременную стабильность воспроизведения точностных показателей ЛГИ целесообразно оценивать без учёта зарегистрированных узких выбросов на графике итоговой погрешности ЛГИ. Диагностика этих выбросов, легко выполняемая в случае применения

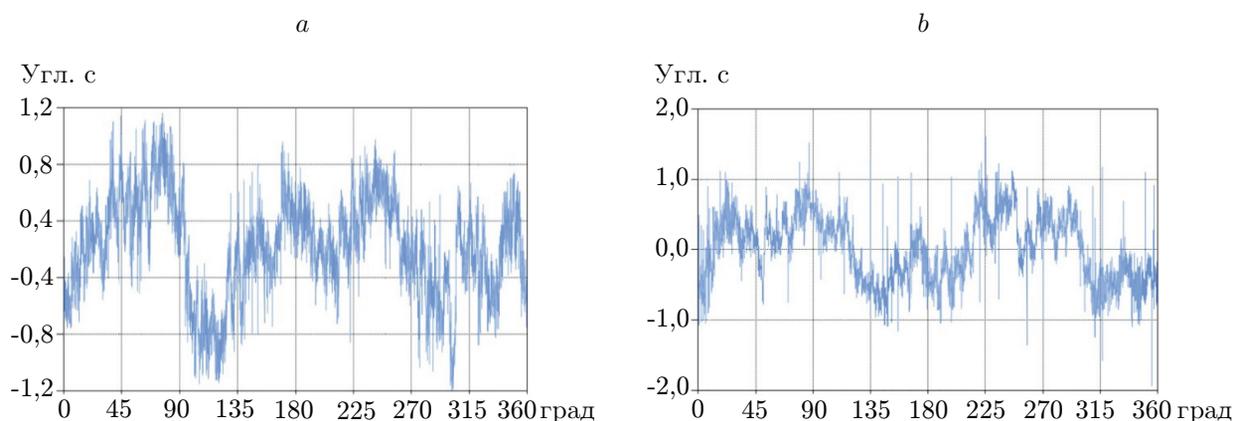


Рис. 8. Данные для оценки стабильности метрологических характеристик ЛГИ:  
*a* — кривая угловой погрешности раstra, записанного с коррекцией в 2021 г.;  
*b* — кривая угловой погрешности раstra, записанного с коррекцией в 2003 г.

круговой измерительно-диагностической установки модели АЭ.1686, показала, что этим выбросам соответствуют случайные дефекты топологии, связанные с механическими повреждениями хромового покрытия подложки. В этом случае накопленная погрешность формирования топологии, известная так же, как  $\delta_{p-p}$  (reack-value), не превышает  $\pm 1,0''$ . На временном интервале 18 лет данный метрологический показатель остался неизменным. Сравнивая формы итоговых кривых, характеризующих накопленную погрешность ЛГИ, нетрудно убедиться в их некотором различии. И можно дать вполне правдоподобное объяснение данному факту. Например, тестируемые структуры были сформированы на совершенно разных подложках, которые могут характеризоваться также различающимися между собой параметрами, такими как разная клиновидность подложек, различающиеся неплоскостности рабочих поверхностей подложек, неравнотолщинность фоточувствительного слоя и др.

Таким образом, практическим подтверждением долговременной стабильности метрологических характеристик, на наш взгляд, следует считать воспроизводимость на длительном временном интервале остаточных значений систематической составляющей погрешности, которую предварительно экспериментально выявляют и каждый раз активно компенсируют при записи топологии синтезируемых структур.

**Заключение.** Выполнены эксперименты по тестированию долговременной (на интервале 18 лет) стабильности метрологических показателей лазерного генератора изображений модели CLWS-300, используемого в качестве базового технологического оборудования в реальном оптическом производстве реального представителя промышленности. Показано, что на этом интервале ЛГИ сохранил способность воспроизводить свои показатели практически в неизменном виде.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 121042900050-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кручинин Д. Ю.** Фотолитография в производстве круговых оптических шкал на Уральском оптико-механическом заводе // Оптический журнал. 2008. **75**, № 4. С. 92–94.
2. **Кручинин Д. Ю.** Фотолитографические технологии в производстве оптических шкал (секто́к) // Оптический журнал. 2009. **76**, № 2. С. 71–73.

3. **Кириянов А. В., Никитин В. Г.** Особенности применения технологии записи скрытых изображений в пленках хрома при синтезе прецизионных углоизмерительных структур // Автометрия. 2009. **45**, № 1. С. 109–117.
4. **Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полецук А. Г. и др.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат — анализ погрешностей изготовления и их измерение // Автометрия. 1997. № 6. С. 42–56.
5. **Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б.** Исследование угловых погрешностей круговых оптических шкал, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300 // Оптический журнал. 2011. № 6. С. 47–50.
6. **ГОСТ Р 8.736-2011.** Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введ. 2011-12-13. М.: Госстандарт России. 2019. 26 с.
7. **Павлов П. А.** Особенности метода кросс-калибровки в лазерной гониометрии // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 21–24.
8. **Бачиш Е. А.** Методы воспроизведения единицы плоского угла // Гироскопия и навигация. 2006. **53**, № 2. С. 105–112.
9. **Кириянов А. В., Кириянов В. П., Волохов И. В., Бобков А. В.** Использование метода кругового сканирования для формирования и контроля топологии прецизионных фотошаблонов интегральных датчиков физических величин // Оптический журнал. 2016. № 7. С. 26–31.
10. **Кручинин Д. Ю., Фарафонтова Е. П.** Влияние углового расположения фотошаблона при синтезе круговых оптических шкал на их угловые погрешности // Оптический журнал. 2015. **82**, № 6. С. 72–76.
11. **Кириянов В. П., Кириянов 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. **Кириянов А. В., Зотов А. А., Каракоцкий А. Г. и др.** Особенности оперативного контроля прецизионных углоизмерительных структур // Измерительная техника. 2019. № 5. С. 31–36.

*Поступила в редакцию 13.03.2023*

*После доработки 29.03.2023*

*Принята к публикации 06.04.2023*

---