

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИФФУЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

В. Т. ПРОКОПЕНКО¹, Е. Е. МАЙОРОВ², А. Ч. МАШЕК³, С. В. УДАХИНА²,
Г. А. ЦЫГАНКОВА³, А. Г. ХАЙДАРОВ⁴, Т. А. ЧЕРНЯК²

¹ Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский академический университет, 190103, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: majorov_ee@mail.ru

³ Военно-морской политехнический институт, 196601, Санкт-Петербург — Пушкин, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
198013, Санкт-Петербург, Россия

Представлен оптико-электронный прибор, работающий в сканирующем и триггерном режимах измерений, реализованный на базе интерферометра Майкельсона. Проанализирована поверхность сложной формы, где поперечное движение объекта при модуляции оптической длины объектного плеча интерферометра приводит к случайной модуляции интерференционного сигнала спекл-структурой отраженной объектной волны и к ошибке измерения. Предложен способ минимизации влияния спекл-модуляции интерференционного сигнала на результат измерений, заключающийся в увеличении числа независимых измерений за время одного прохода оптической измерительной головки с последующим их усреднением. Способ реализуется посредством введения дополнительной модуляции оптической разности хода. Приведены экспериментальные данные, позволяющие определить дискретность измерений и границу допустимой скорости движения контролируемого диффузно отражающего объекта при динамических измерениях.

Ключевые слова: спекл-модуляция, опорное зеркало, диффузно отражающий объект, оптическая измерительная головка, триггерный режим, сканирующий режим, интерферометр Майкельсона

Введение. Получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах поверхности объектов — важная задача метрологии, для решения которой существует широкий класс методов измерений, как контактных, так и бесконтактных [1—3].

Для реализации контактных методов используются различные конструкции механических приборов. В настоящее время ведущие фирмы-производители оптико-механических приборов (например, “Carl Zeiss”, “Renishaw”) производят контактные приборы, позволяющие измерять геометрические параметры поверхности объектов с точностью до 1,0—0,1 мкм. Однако контактными методами присущи такие недостатки, как низкая производительность, необходимость хорошей виброзащиты, относительно быстрый износ контактного элемента. Кроме того, контактные методы измерений могут оказать негативное влияние на характеристики объектов с малой устойчивостью к механическому воздействию, что обуславливает наличие ограничений по классу контролируемых объектов при использовании этих методов.

Указанные недостатки исключаются применением бесконтактных методов контроля. Особое место среди них занимают оптические методы [4—7].

Оптические методы измерений геометрических параметров диффузно отражающих объектов (ДОО, далее — объекты) и работа соответствующих приборов основаны на анализе светового излучения, отраженного от контролируемой поверхности. Наиболее перспектив-

ными в этом классе приборов, согласно литературным данным, являются оптико-электронные приборы (ОЭП) на базе интерферометра Майкельсона [4—9], в которых используются источники излучения с ограниченной длиной временной когерентности. Это направление в оптическом приборостроении относительно новое и интенсивно развивается лишь в последние 5—7 лет. Приборы указанного типа имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными устройствами геометрической оптики, а именно: точность, диапазон измерений, а также расстояние до контролируемой поверхности не зависят от апертурных углов освещения и наблюдения [6—10]. Эти приборы по точности измерений не уступают контактному, малогабаритны, удовлетворяют требованиям производственного контроля, просты в эксплуатации.

Сканирующий и триггерный режимы измерений. Измерение геометрических параметров диффузно отражающих объектов с использованием источника с ограниченной длиной временной когерентности основано на зависимости контраста интерференционного поля от разности хода интерферирующих пучков [7—11]. В разработанном оптико-электронном приборе [6, 7] впервые реализованы два режима измерений — сканирующий и триггерный. Разработаны способы компенсационного изменения разности хода интерферирующих пучков: в сканирующем режиме — изменение оптической длины опорного плеча путем компенсационного перемещения опорного зеркала, в триггерном режиме — изменение оптической длины объектного плеча путем компенсационного перемещения координатно-измерительного устройства по трем координатным осям X, Y, Z [7—11]. Основным устройством прибора является оптическая измерительная головка (ОИГ), которая содержит функциональный элемент — интерферометр Майкельсона.

Работа ОЭП в сканирующем режиме заключается в следующем (рис. 1, а). ОИГ M крепится на подвижной части координатно-измерительного устройства на расстоянии L_p от контролируемого объекта. Среднее расстояние L_p определяется параметрами оптической схемы и величиной δ_m — предполагаемой вариацией высоты рельефа поверхности P объекта. Далее производится относительное перемещение зондирующего пучка S и объекта [9—11], при этом возможно перемещение координатно-измерительного устройства в плоскости, перпендикулярной зондирующему излучению, и перемещение самого объекта относительно луча [11]. Цель перемещения — просканировать всю подлежащую контролю поверхность объекта.

В процессе движения осуществляется модуляция разности хода по периодическому закону посредством перемещения опорного зеркала. Во время модуляции фиксируются моменты нулевой разности хода и производятся отсчеты положения $\Delta z_i'$ опорного зеркала, которые соответствуют этим моментам.

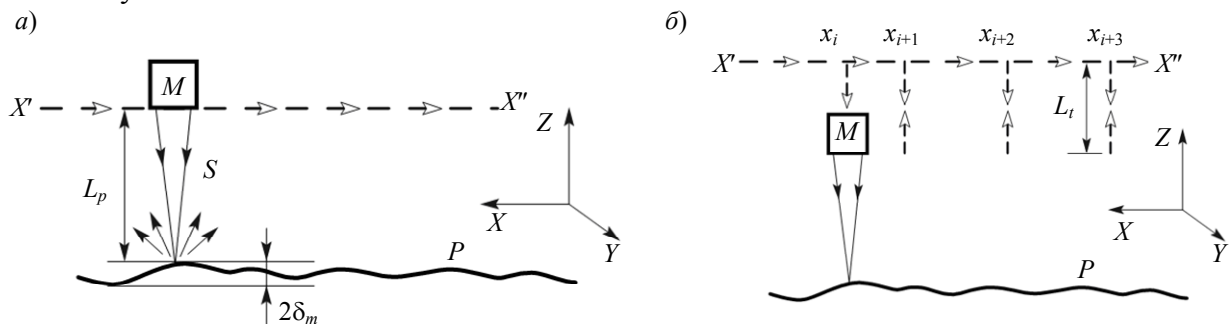


Рис. 1

Результатом измерений является функция

$$\Delta z_i = f(x_i, y_i),$$

где $\Delta z_i = \Delta z_i'$ — величина изменения рельефа поверхности в i -й точке относительно некоторой базовой плоскости $z = z_0$; x_i, y_i — координаты соответствующего положения зондирующего пятна для i -й точки поверхности, определяемые дискретностью съема информации.

Работа ОЭП в триггерном режиме измерений также предполагает наличие координатно-измерительного устройства с возможностью перемещения по координатным осям X , Y , Z (рис. 1, б). Принципиальное отличие триггерного режима от сканирующего заключается в способе модуляции разности хода. В каждой i -й зондируемой точке поверхности с координатами x_i , y_i величина Δz_i определяется не перемещением опорного зеркала, а перемещением непосредственно измерительной головки по направлению к поверхности объекта вдоль оси Z . Если при работе ОИГ в сканирующем режиме производилась модуляция оптической длины опорного плеча, то в триггерном режиме модулируется оптическая длина объектного плеча и осуществляется оптико-электронное сканирование лучом поверхности объекта. Опорное зеркало при этом остается неподвижным. В триггерном режиме ОИГ выполняет функции индикатора нулевой разности хода, а информация о функции $\Delta z_i = f(x_i, y_i)$ формируется по показаниям координатно-измерительного устройства [6].

Постановка задачи. Рассмотрим функционирование ОЭП, когда изменение контраста интерференционного поля обусловлено модуляцией разности хода вследствие перемещения ОИГ [9—11]. В общем случае при поперечном движении зондирующего луча по поверхности объекта происходит изменение картины спеклов в плоскости регистрации [3, 5, 7, 9]. Скорость этого изменения определяется скоростью поперечного перемещения луча по поверхности. Если скорость съема информации резко увеличить таким образом, что спеклы в плоскости регистрации за время одного измерения будут зафиксированы, задачу можно считать решенной. Поэтому сущность предлагаемого способа заключается в минимизации влияния спекл-модуляции, которая вносит существенную погрешность в результаты измерений [7, 10, 11, 12]. Увеличивая скорость съема информации, необходимо за время относительно медленного приближения ОИГ к поверхности объекта произвести несколько независимых измерений расстояния L_p от входного зрачка интерферометра до поверхности контролируемого объекта (см. рис. 1, а) с последующим усреднением результатов измерений.

Для реализации предлагаемого способа следует ввести дополнительную модуляцию разности хода за счет сканирования опорного зеркала [5, 7, 11]. Условия сканирования можно представить в следующем виде:

$$L_{0z} / V \ll L_t / V_t, \quad V \gg V_x,$$

где L_{0z} — амплитуда сканирования опорного зеркала; V — скорость сканирования опорного зеркала; L_t — расстояние, на которое смещается ОИГ за один проход (для схемы на рис. 1, б величина L_t совпадает с изменением оптической длины объектного плеча интерферометра Майкельсона); V_t — скорость изменения оптической длины объектного плеча; V_x — скорость поперечного смещения зондирующего пятна по поверхности объекта.

При выполнении условий сканирования, во-первых, за один проход ОИГ можно произвести несколько независимых измерений; во-вторых, во время одного измерения спеклы в плоскости регистрации окажутся зафиксированы [3, 5, 7, 11, 12].

Чтобы предлагаемый способ привел к положительному результату, необходимо, исходя из условий сканирования, сформулировать требования к техническим параметрам ОЭП и определить количественное соотношение скоростей V_x и V .

Эксперимент. Для решения этих задач были проведены экспериментальные исследования, цель которых — при фиксированных частоте (2 кГц) и скорости сканирования опорного зеркала (400 мм/с) определить допустимую скорость поперечного смещения объекта. В качестве показателя достижения положительного результата была выбрана величина среднеквадратического отклонения расстояния L_p по координате Z (σ_z).

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2. Диффузно отражающий объект 1 — плоскопараллельная пластина 4-го класса шероховатости ($R_a = 8$ мкм) — установлен на параллелограммном механизме 2. Колебания механизма возбуждаются генератором 3. На схеме

движение объекта происходит вдоль оси X . Измерение расстояния от выходного зрачка интерферометра до объекта производится ОИГ 4. Вычисление СКО σ_z осуществлялось по 100 независимым измерениям. Важное условие проведения эксперимента — обеспечение идентичности координат объекта, а также значений его скорости для каждого из 100 измерений. С этой целью в эксперименте использован датчик скорости 5, состоящий из электромагнитной катушки и постоянного магнита, закрепленного на параллелограммном механизме. Компаратор 6 позволяет фиксировать моменты времени, характеризуемые максимальной скоростью перемещения объекта $V_{x, \max}$. В такие моменты компаратор формирует разрешающий сигнал для выдачи информации ОИГ.

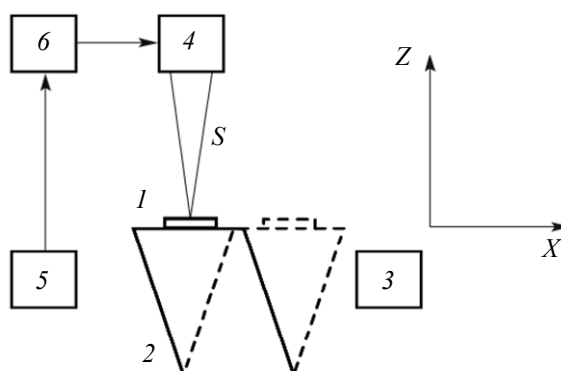


Рис. 2

Таким образом, измерение расстояния L_p производится в моменты максимальной скорости движения объекта. Поскольку движение осуществляется по гармоническому закону

$$x = a \sin(2\pi\nu t),$$

где a — амплитуда механических колебаний; ν — частота колебаний, оценка максимальной скорости производится по амплитуде колебаний параллелограммного механизма:

$$V_{x, \max} = dx/dt|_{t=0} = 2\pi a \nu.$$

В эксперименте изменение скорости движения объекта задавалось изменением амплитуды генератора. Измерения проводились при следующих условиях: в качестве источника излучения использовался суперлюминесцентный диод с длиной когерентности излучения $l_c = 30$ мкм; $\sigma_z = (0,03 - 0,1)30$ при $\theta = 0 \dots 30^\circ$, $\sigma_z = (0,3 - 0,8)30$ при $\theta = 45 \dots 60^\circ$ (θ — угол падения зондирующего излучения); $\delta_m = 0 \dots 4$ мм; частота измерений 46 тактов/с; $L_p = 120$ мм; $V = 400$ мм/с; длительность выходного сигнала по уровню 0,1 $\tau_1 = 50$ мкс; размер зондирующего пятна $d = 30$ мкм; $\nu = 23$ Гц.

Результаты исследований представлены на рис. 3, а зависимостью $\sigma_z(V_{x, \max})$. Анализ графиков показывает, что поперечное смещение объекта относительно ОИГ практически не сказывается на точности измерений до момента достижения скорости $V \approx 60$ мм/с. Поскольку при проведении эксперимента скорость перемещения опорного зеркала оставалась неизменной, следовательно, 400 мм/с — это нижний предел скорости модуляции оптической разности хода.

На практике, однако, более важной является зависимость $\sigma_z(\varepsilon_\tau)$, где $\varepsilon_\tau = (V_{x, \max} \tau_1)/d$: см. рис. 3, б.

Далее в ходе эксперимента исследовался вопрос о дискретности съема информации. Поскольку поставлена задача о серии независимых измерений с последующим их усреднением, необходимо выяснить, каким должен быть шаг измерений, чтобы их можно было считать независимыми. Для этого проводились измерения корреляционной функции

$$R(\Delta x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} U(x, \Delta z) U(x + \Delta x, \Delta z) d\Delta z}{\int_{-\infty}^{\infty} U^2(x, \Delta z) d\Delta z},$$

где $U(x, \Delta z)$ — огибающая выходного сигнала, Δx — шаг измерений.

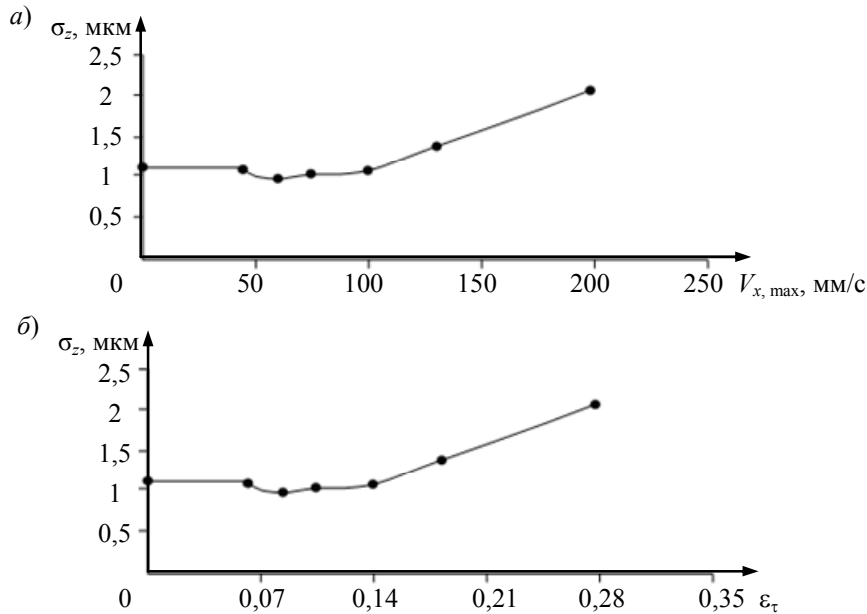


Рис. 3

Зависимости огибающей выходного сигнала $U(x, \Delta z)$ и $U(x_i + \Delta x, \Delta z)$ для каждого значения Δx определялись в 50 произвольных точках Δx_i поверхности объекта. После чего вычислялось среднее значение $R(\Delta x)$.

Измерения, результаты которых представлены на рис. 4, проводились при различных углах θ . Как следует из полученных зависимостей, отдельные измерения можно считать независимыми, если при смещении объекта в поперечном направлении измерения будут проводиться с шагом порядка 7—10 мкм.

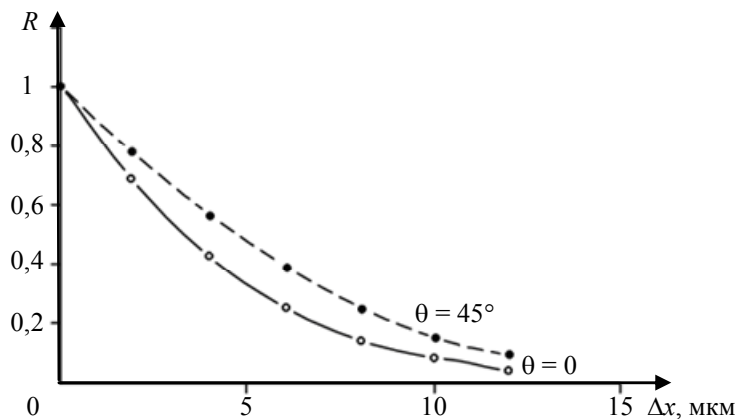


Рис. 4

Заключение. Полученные в ходе исследований результаты имеют важное практическое значение, в частности, при создании работающих в сканирующем и триггерном режимах оптико-электронных приборов, реализованных на базе интерферометра Майкельсона и предназначенных для измерения различных геометрических параметров поверхности объекта. Приведенные экспериментальные данные позволяют определить дискретность измерений и гра-

ницу допустимой скорости движения контролируемого диффузно отражающего объекта при динамических измерениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
3. Франсон М. Оптика спеклов / Пер. с франц.; Под ред. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
4. Majorov E. E., Prokopenko V. T. A limited-coherence interferometer system for examination of biological objects // Biomedical Engineering. 2012. Vol. 46, N 3, P. 109—111.
5. Majorov E. E., Prokopenko V. T., Sherstobitova A. S. Investigating an optoelectronic system for interpreting holographic interferograms // J. of Optical Technology. 2013. Vol. 80, N 3. P. 162—165.
6. Majorov E. E., Prokopenko V. T., Ushveridze L. A. A system for the coherent processing of specklegrams for dental tissue surface examination // Biomedical Engineering. 2014. Vol. 47, N 6. P. 304—306.
7. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т., Ушверидзе Л. А. Оптимизация динамических параметров оптического щупа триггерного типа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 13—16.
8. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2. С. 38—46.
9. Майоров Е. Е. Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 329—332.
10. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров Г. Г., Черняк Т. А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы: науч.-техн. журн. МНТО ПМ. 2015. № 11 (185). С. 26—31.
11. Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров Г. Г., Черняк Т. А. Алгоритмы обработки информационного сигнала компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Научное приборостроение. 2015. Т. 25, № 4. С. 61—66.
12. Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов: Монография. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 193 с.

Сведения об авторах

- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра световых технологий и оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; САУ, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Александр Чеславович Машек** — Военно-морской политехнический институт, кафедра физики; преподаватель; E-mail: mashek50@mail.ru
- Светлана Вячеславна Удахина** — канд. экон. наук, доцент; САУ, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: udahina@mail.ru
- Галина Александровна Цыганкова** — канд. физ.-мат. наук; Военно-морской политехнический институт, кафедра физики; E-mail: galusinka@mail.ru
- Андрей Геннадьевич Хайдаров** — канд. техн. наук, доцент; СПбГТИ (ТУ), кафедра бизнес-информатики; E-mail: haidarovg@mail.ru
- Татьяна Анатольевна Черняк** — канд. экон. наук; САУ, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: t.chernyak@spbume.ru

Рекомендована кафедрой
световых технологий
и оптоэлектроники Университета ИТМО

Поступила в редакцию
01.03.16 г.

Ссылка для цитирования: Прокопенко В. Т., Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Удахина С. В., Цыганкова Г. А., Хайдаров А. Г., Черняк Т. А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 388—394.

**OPTICAL-ELECTRONIC INSTRUMENT
FOR CONTROL OVER GEOMETRICAL PARAMETERS
OF DIFFUSE REFLECTING OBJECTS**

**V. T. Prokopenko¹, E. E. Maiorov², A. Ch. Mashek³, S. V. Udakhina²,
G. A. Tsygankova³, A. G. Khaidarov⁴, T. A. Chernyak²**

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Academic University, 190103, St. Petersburg, Russia
E-mail: majorov_ee@mail.ru

³Naval Polytechnic Institute,
196601, St. Petersburg — Pushkin, Russia

⁴St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
198013, St. Petersburg, Russia

An optical-electronic instrument operating in scanning and trigger modes is developed on the base of Michelson interferometer. Analysis of a complex-shape surface is carried out; random modulations of interference signal and measurement errors caused by variation of optical path length of object beam at tangential movement of the object are studied. A method is proposed for minimization of the effect of speckle-modulation of interference signal by increasing the number of independent measurements during one pass of optical measuring head and subsequent averaging. The method realization employs an additional modulation of optical path length difference. Experimental results obtained with the instrument make it possible to determine the measurement discreteness and the limit of allowable speed of diffuse-reflecting object movement during the dynamic measurements.

Keywords: speckle-modulation, referent mirror, diffuse reflecting object, optical measuring head, trigger mode, scanning mode, Michelson interferometer

Data on authors

Viktor T. Prokopenko	— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Light Technologies and Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
Evgeny E. Maiorov	— PhD, Associate Professor; Saint Petersburg Academic University, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: majorov_ee@mail.ru
Alexander Ch. Mashek	— Naval Polytechnic Institute, Department of Physics; Lecturer; E-mail: mashek50@mail.ru
Svetlana V. Udakhina	— PhD, Associate Professor; Saint Petersburg Academic University, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: udakhina@mail.ru
Galina A. Tsygankova	— PhD; Naval Polytechnic Institute, Department of Physics; E-mail: galusinka@mail.ru
Andrey G. Khaidarov	— PhD, Associate Professor; St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Department of Business Informatics; E-mail: haidarovg@mail.ru
Tatiana A. Chernyak	— PhD; Saint Petersburg Academic University, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: t.chernyak@spbume.ru

For citation: Prokopenko V. T., Maiorov E. E., Mashek A. Ch., Udakhina S. V., Tsygankova G. A., Khaidarov A. G., Chernyak T. A. Optical-electronic instrument for control over geometrical parameters of diffuse reflecting objects // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2016. Vol. 59, N 5. P. 388—394 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-388-394