

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.7.055.2

ОСНОВНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ С ПОМОЩЬЮ АВТОРЕФЛЕКСИОННОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

© 2009 г. А. Г. Анисимов; А. М. Алеев; А. В. Пантюшин; А. Н. Тимофеев, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: oeps@grv.ifmo.ru

В работе рассмотрены основные погрешности авторефлексионных оптико-электронных измерительных систем. Проведен ряд экспериментальных исследований, выявляющих основные погрешности. Показано, что основными являются технологические погрешности, в частности нелинейные систематические погрешности оптической системы. Экспериментальные исследования проводились на базе оптико-электронной системы контроля соосности, реализованной по авторефлексионной схеме. Показан эффект компенсации систематических погрешностей. На специализированном стенде для контроля соосности проведено экспериментальное исследование заявленной точности оптико-электронной системы контроля соосности относительно поверочных измерительных систем ППС-11 и борштанги. Полученные значения в горизонтальной плоскости незначительно превосходят заданные значения, в вертикальной плоскости точность соблюдена.

Коды OCIS: 120.4630, 120.02820, 150.3040.

Поступила в редакцию 02.06.2008.

Введение

Одним из условий качественного функционирования сложного технологического оборудования является соблюдение высокой точности пространственного расположения составляющих его элементов относительно систем прямолинейных монтажных осей. Вследствие этого задача бесконтактного контроля положения объектов относительно протяженной линейной базы актуальна во многих областях техники. Для выполнения данного требования необходим пространственный контроль, который часто реализуется с помощью оптико-электронных измерительных систем.

Бесконтактность, дистанционность и возможность полной автоматизации процессов измерения с помощью оптико-электронных систем в сочетании с высоким быстродействием позволяет широко использовать эти системы для активного контроля пространственного положения объектов (позиционирования). Данное требование обеспечено оптико-электронной системой контроля соосности (ОЭСКС).

Задачей ОЭСКС является определение смещения корпусных деталей цилиндров (КДЦ) турбоагрегатов относительно рабочей оси ротора с точностью

0,06 мм в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Ось ротора определяется в базовых расточках (БР) в процессе измерений по известной методике [1]. ОЭСКС позволяет пересчитывать результаты измерений относительно собственной визирной линии (ВЛ) к заданной оси ротора, в результате чего отпадает необходимость “провешивания” ВЛ через заданные координаты, что значительно облегчает процесс измерений.

В ОЭСКС задача пространственного позиционирования реализована методами авторефлексии и автоколлимации сходящихся пучков, что позволяет проводить высокоточные измерения линейных смещений без определения дистанции до контрольного элемента и обеспечения питания на объекте контроля.

Принцип работы ОЭСКС представлен на рис. 1. На прибор с зарядовой связью (ПЗС) 1, находящийся в приемном блоке 2, через объектив 3 излучающей головки 6 проецируются изображения двух пар полупроводниковых излучающих диодов (ПВД) 4, 5. В качестве отражателя используется трипельпризма 7, объектива – телеобъектив с подвижным отрицательным компонентом. Автоматически на изображении определяются энергетические центры тяжести изображений ПВД. С учетом конструктивных

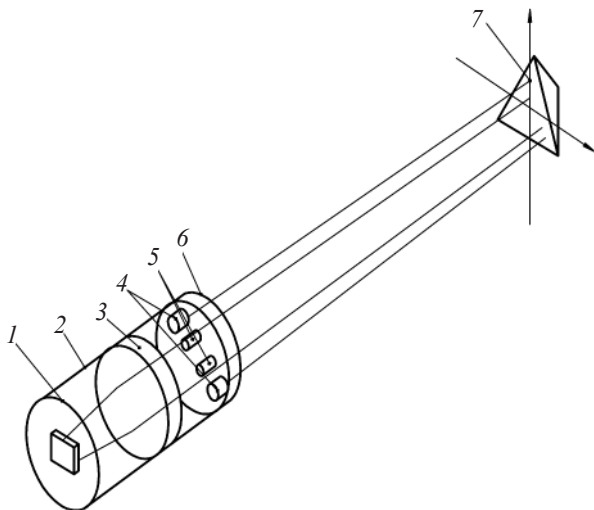


Рис. 1. Принцип работы ОЭСКС.

параметров производится расчет поперечного смещения контролируемого объекта относительно ВЛ. После этого результаты измерений от элементов ПЗС (пикселей) пересчитываются в абсолютные единицы измерения (миллиметры). Данные измерений передаются в персональный компьютер, где обрабатываются, приводятся к виду, удобному для оператора и сохраняются в базе данных измерений.

Целью данного исследования является анализ составляющих суммарной погрешности измерений ОЭСКС. Предлагается рассмотреть как систематические погрешности, так и случайные. Стоит отметить, что все исследуемые вопросы достаточно часто встречаются в работе других оптических, оптико-электронных и телевизионных измерительных систем, что подчеркивает актуальность данной работы.

Авторефлексионные схемы устройств с матричными фотоприемными устройствами (МФУ) применяются в современном приборостроении относительно недавно и являются еще недостаточно изученными. Так до настоящего времени неполно исследован вопрос влияния децентрировки компонентов относительно оптической оси на погрешность измерений ОЭСКС. Данная работа призвана восполнить указанный пробел в научной литературе.

Основные погрешности ОЭСКС

Искривление ВЛ

Визирная ось есть прямая, проходящая через центр МФУ и заднюю узловую точку телеобъектива [2]. В идеальной оптической системе визирная

ось – прямая, совпадающая с оптической осью системы. В реальной оптической системе существуют погрешности, в частности – децентрировка компонентов, в результате которой происходит изменение (с сохранением прямолинейности), либо искривление визирной оси, вследствие чего предлагается использовать термин ВЛ.

Неточное совмещение центра МФУ с оптической осью системы вызывает смещение ВЛ, что влечет за собой систематическую погрешность измерений δh_1 для каждой дистанции фокусировки. Используя положения геометрической оптики для парааксиальных лучей, получена следующая зависимость для величины δh_1 [3]:

$$\delta h_1 = \delta c_1 f' / (f' - A'_s), \quad (1)$$

где f' – эквивалентное фокусное расстояние телеобъектива $f' = f'_1 f'_2 / (f'_1 + f'_2 - d_s)$, d_s – расстояние между положительным и отрицательным компонентами телеобъектива $d_s = 1 / \left\{ 2 \left[a - L - \sqrt{(L - a)(L - 4f' - a)} \right] \right\}$,

величины a и A'_s определяются соотношениями $a = s f' / (s + f')$, $A'_s = L - d_s / f'_2 (L - d)$, где s – расстояние до объекта, δc_1 – погрешность совмещения центра МФУ с ВО, $\delta c_1 = 0,05$ мм, f'_1, f'_2 – фокусные расстояния положительного и отрицательного компонентов телеобъектива соответственно, L – длина телеобъектива [4].

Искривление ВЛ происходит при смещении с оптической оси центра положительного компонента телеобъектива на $\delta c_2 = 0,01$ мм, что приводит к появлению систематической погрешности измерения δh_2 . Для парааксиальных лучей величина δh_2 определяется следующим выражением:

$$\delta h_2 = \delta c_2 s / f'_1. \quad (2)$$

При децентрировке отрицательного компонента телеобъектива относительно оптической оси (т. е. фокусирующей линзы) на $\delta c_3 = 0,05$ мм происходит искривление ВЛ. Зависимость возникающей при этом погрешности измерения δh_3 от дистанции фокусировки имеет нелинейный характер

$$\delta h_3 = \delta c_3 (L - d_s) / f'_2. \quad (3)$$

Для оценки искривления ВЛ ОЭСКС было проведено экспериментальное исследование.

Измерительный стенд изображен на рис. 2. Ввиду несовершенства ОСК (статический прогиб, скручивание отдельных компонентов и т. д.), ее характеристики не обеспечивают высокоточных измерений. Эксперимент заключается в последовательном перемещении отражателя по ОСК и проведении измерений в прямом положении ОЭСКС и перевернутым относительно базовой оси (совпадающей с

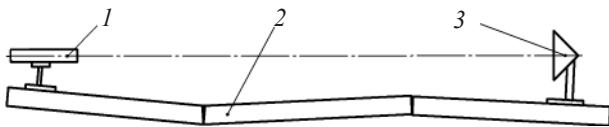


Рис. 2. Схема стенда измерения искривления ВЛ. 1 – ОЭСКС, 2 – оптическая скамья, 3 – трипельпризма.

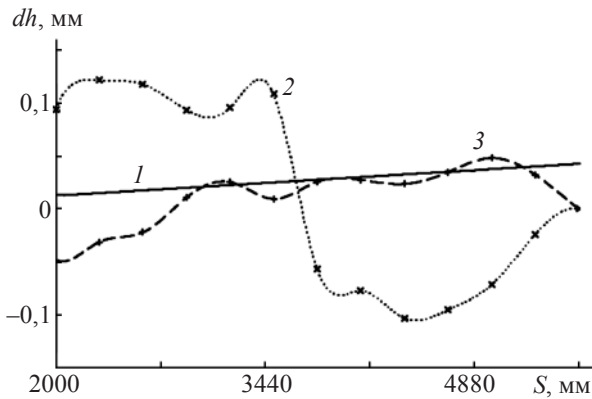


Рис. 3. Экспериментальные данные искривления ВЛ в зависимости от дистанции фокусировки S . 1 – расчетанное искривление ВЛ, 2 – экспериментальное искривление ВЛ в горизонтальной плоскости, 3 – экспериментальное полученное искривление ВО в вертикальной плоскости.

ВЛ ОЭСКС) на 180° . Кривизна ВЛ определялась как полуразность значений измерений, соответствующих определенной дистанции, что позволило исключить влияние ОСК. При повороте ОЭСКС на 90° и 270° определялось искривление ВЛ в горизонтальной плоскости. Результатом исследования является экспериментально определенная кривизна ВЛ (рис. 3).

Из-за рассогласования теоретически полученной зависимости и экспериментальных данных можно сказать, что кривизна ВЛ ОЭСКС обусловлена не только описанными выше причинами, а имеет более сложный характер. Стоит отметить несимметричность полученных данных в горизонтальной и вертикальных плоскостях, что свидетельствует о грубых децентрировках, допущенных при сборке. Однако, данная составляющая погрешности измерений является систематической, что позволяет ввести ее компенсацию.

Стоит отметить, что для авторефлексионных и высокоточных измерительных оптико-электронных систем кривизна ВЛ достаточно серьезный фактор, ограничивающий точность измерений, вследствие чего необходимо проводить экспериментальные исследования каждой оптической системы.

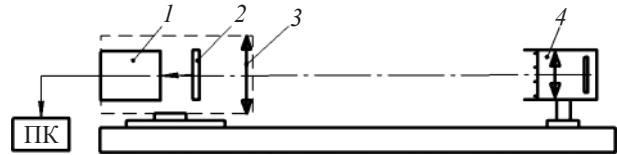


Рис. 4. Схема децентрировки пар ПИД. 1 – блок обработки, 2 – ПЗС, 3 – оптическая система, 4 – ОЭСКС.

Погрешности, связанные с установкой излучателей

В ОЭСКС присутствует погрешность установки центра базового расстояния ПИД, обусловленная технологической точностью монтажа ПИД в плоскопараллельной пластинке и ее децентрировкой относительно ВЛ

$$\delta h_4 = \delta c_4 / 2, \quad (4)$$

где δc_4 – децентрировка ПИД относительно ВО. Коэффициент $1/2$ объясняется использованием авторефлексионной схемы измерений. Для обеспечения необходимого диапазона поперечных измерений в ОЭСКС используются две пары ПИД, вследствие этого в зависимости от выбранных ПИД возникает различная погрешность измерений $\delta h_{4,1}$ и $\delta h_{4,2}$.

Для оценки децентрировки было проведено экспериментальное исследование. Измерительный стенд изображен на рис. 4. ПИД ОЭСКС использовались в качестве активных марок, положение в пространстве которых определялось измерительной системой. При вращении ОЭСКС относительно базовой оси, совпадающей с ВЛ ОЭСКС, ввиду наличия $\delta c_{4,1}$ и $\delta c_{4,1}$ ПИД описывали окружность, центр которой не совпадал с серединой базового расстояния. Измерения проводились через 30° поворота. После чего определялись координаты центра описываемой окружности и сопоставлялись с серединой базового расстояния. Получены следующие значения: $\delta c_{4,1} x = 0,067$ мм, $\delta c_{4,1} y = -0,206$ мм и $\delta c_{4,2} x = -0,165$ мм, $\delta c_{4,2} y = -0,173$ мм.

Погрешности базирования отражателя

Ошибки, связанные с поворотом трипельпризмы, в приближении геометрической оптики можно записать в виде

$$\delta h_5 = [(n-1)/n] d_{\Pi} \sin \alpha [1 + rn/d_{\text{ВП}}(n-1)], \quad (5)$$

где $d_{\Pi} = ka$, a – наибольшая длина пучка, который может пройти через развертку призмы, k – коэффициент для трипельпризмы, α – угол между осью

симметрии призмы и оптической осью, r – расстояние от вершины трипельпризмы до точки вращения (отрицательное направление вглубь стекла), $d_{\text{ВП}}$ – высота трипельпризмы. Точка, при вращении вокруг которой трипельпризма нечувствительна к повороту, располагается от вершины призмы на расстоянии $d_1 - d_{\text{П}}(n - 1)/n$ [3].

При этом не учитываются возможные ошибки изготовления трипельпризмы и сборки в корпусе отражателя. В данном случае это оправдано, так как в правилах эксплуатации высокоточных оптико-электронных систем оговорены допуски на двугранные углы призм и допуски при сборке. В результате чего выражение (5) носит приближенный характер. Для более строгого рассмотрения поведения трипельпризмы использовалась математическая модель ее поведения [5].

Погрешности метода определения координат ПИД

Существуют погрешности, вызванные неточностью метода определения энергетического центра изображения тест-объектов. С теоретическим обоснованием данного рода погрешностей можно ознакомиться в работе [6]. При проведении практических расчетов следует пользоваться следующим выражением, обеспечивающим достаточно хорошую сходимость с теоретическими расчетами:

$$\delta h_6 = sm\delta c_6/f', \quad (6)$$

где m – линейный размер пиксела МФУ, δc_6 – погрешность определения энергетического центра, $\delta c_6 = 0,1$ пкс.

Погрешности, связанные с эффектом блюминга

При использовании в измерительных системах МФУ (ПЗС и КМОП) вследствие световых перегрузок возникает погрешность из-за действия блюминга и смаза изображения. Авторами проведено подробное исследование данных процессов [7]. Приняв, что при визуальном контроле яркости ПИД оператор не допустил световой перегрузки более $3,36 \text{ Вт/м}^2$ в плоскости МФУ, погрешность будет носить случайный характер ($\delta h_7 = 0,02$ мм).

Погрешности установки центроискателя

При измерении необходимо последовательно перемещать центроискатель с отражателем в КДЦ и БР турбоагрегата. При этом возникает погрешность установки центроискателя вследствие неточности механизма. Авторами проведено экспериментальное исследование и показано, что при много-

кратной установке центроискателя погрешность является случайной величиной $\delta h_8 = 0,01$ мм.

Погрешности при перефокусировке системы

В ОЭСКС фокусировка изображения производится визуально оператором. При многократной фокусировке на различных дистанциях погрешность составила $\delta h_9 = 0,02$ мм. Подробное исследование опубликовано в литературе [8].

Суммарная погрешность ОЭСКС

Приняв, что все вышеперечисленные составляющие суммарной погрешности являются систематическими погрешностями измерений, либо имеют случайный характер, не являются взаимокompенсующими, используя закон накопления погрешностей, получим

$$\delta h = \delta h_1 + \delta h_2 + \delta h_3 + \delta h_4 + \sqrt{\delta h_5^2 + \delta h_6^2 + \delta h_7^2 + \delta h_8^2 + \delta h_9^2}. \quad (7)$$

На рис. 5 приведена зависимость теоретически полученной суммарной погрешности ОЭСКС в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Анализ основных составляющих погрешности показал, что основной вклад вносят технологические погрешности, в частности кривизна ВЛ. На рисунке так же

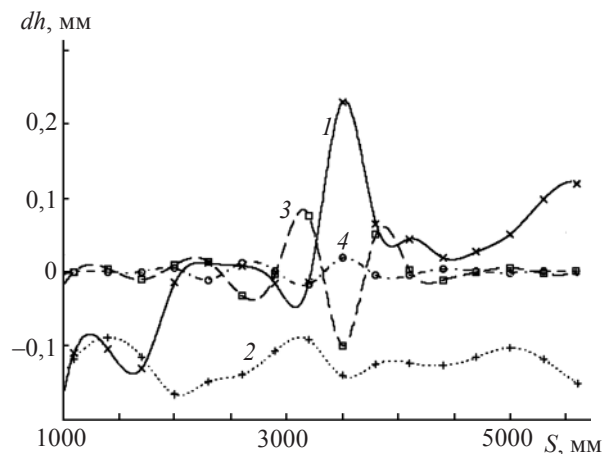


Рис. 5. Зависимости суммарной погрешности ОЭСКС от дистанции фокусировки S . 1 – суммарная погрешность в горизонтальной плоскости, 2 – суммарная погрешность в вертикальной плоскости, 3 – предполагаемая суммарная погрешность в горизонтальной плоскости после введения дифференциальных поправок, 4 – предполагаемая суммарная погрешность в вертикальной плоскости после введения дифференциальных поправок.

представлены зависимости погрешности от дистанции после ввода дифференциальных поправок.

Можно сделать вывод о том, что основными погрешностями ОЭСКС являются технологические систематические погрешности изготовления и сборки ОЭСКС, что позволяет применять методы компенсации данных погрешностей.

Экспериментальное исследование ОЭСКС

Экспериментальное исследование ОЭСКС проводилось на стенде (рис. 6), оборудованном КДЦ – 6, опорными роликами для борштанги – 2, БР – 1 и 6, центроискателем – 4 с отражателем – 5, ОЭСКС – 7 с кронштейном – 8.

Первоначально с помощью борштанги по известной методике определялись координаты оси ротора в плоскостях БР и заносились в базу измерений. Затем последовательно в передней БР, КДЦ и

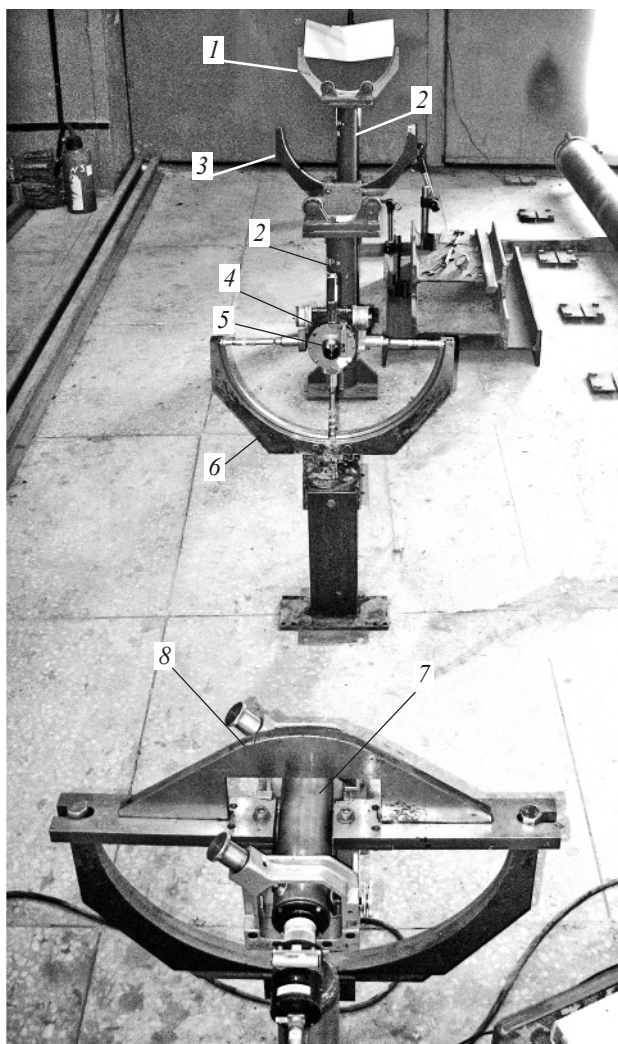


Рис. 6. Испытательный стенд ОЭСКС.

задней БР проводились измерения с помощью ОЭСКС. После чего производился пересчет из систем координат, связанных с ВЛ ОЭСКС и геометрическими центрами БР, в систему координат, связанную с осью ротора. Полученные значения необходимых смещений КЦД (для совмещения геометрического центра КЦД с осью ротора) с помощью специальной программы программно и заносились в базу измерений.

Решение задачи непосредственной проверки результатов измерений ОЭСКС не представляется возможной в связи с отсутствием доступных методов контроля крупногабаритных элементов в пространстве с высокой точностью. Проверка результатов измерений ОЭСКС заключалась в сравнении результатов измерений с измерениями борштангой и оптической визирной системой ППС-11. Данные измерительные средства являются наиболее точными на данный момент так как центровка большого числа турбоагрегатов атомных станций производится с их помощью, однако погрешность измерений составляет 0,05 мм в условиях эксперимента. При дистанции от ОЭСКС до передней БР 1650 мм, до задней БР 5815 мм и до КЦД 3850 мм, выполнении условия нахождения координат оси ротора в плоскостях БР в интервале менее ± 5 мм разность показаний по горизонтальной составляющей составила $x = 0,06 \pm 0,04$ мм, по вертикальной составляющей $y = 0,02 \pm 0,02$ мм при доверительных вероятностях $a = 0,95$.

Проведенное экспериментальное исследование показало, что погрешность измерения положения геометрического центра КЦД относительно оси ротора в сравнении с измерениями ППС-11 и борштангой в горизонтальной плоскости на 0,04 мм превосходит максимально допустимую погрешность, в вертикальной плоскости точность соблюдена.

Стоит отметить, что при центровке турбоагрегатов большее внимание уделяется выставлению КЦД в вертикальной плоскости, что обусловлено статическим прогибом вала.

Заключение

В работе были рассмотрены основные погрешности ОЭСКС и авторефлексионных измерительных систем в целом. Проведен ряд экспериментальных исследований, выявляющих первичные погрешности системы. Показано, что основными являются технологические погрешности, в частности нелинейные систематические погрешности оптической системы ОЭСКС.

Показан эффект компенсации систематических погрешностей и сведения суммарной погрешности к минимально возможным значениям.

На специализированном стенде для контроля соосности проведено экспериментальное исследование точности ОЭСКС относительно поверочных измерительных систем ППС-11 и борштанги. Полученные значения в горизонтальной плоскости незначительно превосходят заданные значения, в вертикальной плоскости точность соблюдена.

Проведенное исследование показывает, что авторефлексионные оптико-электронные системы контроля соосности и ОЭСКС в частности способны проводить высокоточный контроль пространственного положения объектов с необходимой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карасев В.И., Монэс Д.С.* Методы оптических измерений при монтаже турбоагрегатов. М.: Энергия, 1973. 168 с.
2. *Погарев Г.В.* Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982. 237 с.
3. *Чуриловский В.Н.* Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
4. *Захаров А.И.* Новые теодолиты и оптические дальномеры. М.: Недра, 1978. 265 с.
5. *Пантюшин А.В., Шомрина М.А., Анисимов А.Г., Яковлев А.С.* Исследование влияния погрешности установки отражателя на точность системы контроля соосности // Сборник трудов седьмой международной конференции “Прикладная оптика-2006” 16–20 октября 2006г. СПб.: ГИТМО (ТУ). 2006. С. 64–66.
6. *Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г.* Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Известия вузов – Приборостроение. 1986. № 9. С. 62–69.
7. *Анисимов А.Г., Горбачев А.А., Краснящих А.В.* Исследование влияния блюминга на погрешность оптико-электронной системы контроля соосности // VII Международная конференция “Прикладная оптика-2006” 16–20 октября 2006 г. Санкт-Петербург. Россия. Сборник трудов. Т. 1. Оптическое приборостроение. Труды оптического общества им. Д.С. Рождественского. СПб.: изд. ГИТМО (ТУ), 2006. С. 24–28.
8. *Анисимов А.Г.* Исследование влияния погрешности при фокусировке на точность измерения оптико-электронной системы контроля соосности // Труды четвертой международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2005”. Санкт-Петербург. СПб.: изд. ГИТМО (ТУ), 2005. С. 17–21.