

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКА НА РЕЗУЛЬТАТ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В статье рассмотрена модель характеристики вибрации при бесконтактном контроле с помощью ПЗС-фотоприемника, основанная на анализе зависимости виброперемещения и виброскорости, а также экспериментально определены значения параметров ПЗС-фотоприемника, характеризующих освещенность в статическом положении тест-объекта, характеризующий вклад скорости в итоговую освещенность.

Ключевые слова: гармоническая вибрация, характеристика вибрации, стробоскопический эффект, ПЗС-фотоприемник.

Введение

Одним из важнейших факторов, влияющих на структуру выходного изображения, является смаз вибрирующего тест-объекта. В большинстве случаев влияние вибрации стараются уменьшить [1, 2, 3] или компенсировать [4, 5] и сфокусироваться на изображении самого объекта [6, 7, 8], однако сам смаз может стать информативным параметром при измерении и контроле параметров вибрации на больших расстояниях до объекта контроля [9], что требует дополнительного теоретического и экспериментального исследования.

Цель работы – провести экспериментальное исследование влияния характеристик ПЗС-фотоприемника на результат контроля параметров вибрации и количественно определить значения параметров ПЗС-фотоприемника, характеризующих освещенность в статическом положении тест-объекта, характеризующий вклад скорости в итоговую освещенность.

Рассмотрим произвольную характеристику вибрации $w(x)$, для этой характеристики построим распределение яркости в изображении пары вибрирующих штрихов $f(x)$, при которой фиксируется нулевой контраст при вибрации.

При фиксации нулевого контраста распределение яркости в изображении пары вибрирующих штрихов $f(x)$, расположенных на расстоянии A при характеристике вибрации $w(x)$ должно выполняться условие:

$$f(x) * h(x) * w(x) \equiv \text{const}. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно решить методом преобразования Фурье, согласно которому

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu) e^{-i\nu x} d\nu, \quad (2)$$

$$\text{где } F(\nu) = \frac{G(\nu)}{W(\nu)},$$

$F(\nu)$ – спектр распределения яркости в изображении пары вибрирующих штрихов,
 $W(\nu)$ – спектр характеристики вибрации,
 $G(\nu)$ – спектр выходного изображения вибрирующего тест-объекта.

Однако задача нахождения распределения яркости в изображении пары вибрирующих штрихов является некорректной обратной задачей, для решения которой можно применять методы регуляризации [10]. Рассмотрим применение метода регуляризации Тихонова при решении обратной некорректной задачи. Решение уравнения в данном случае будет выглядеть следующим образом

$$f_{\alpha}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\alpha}(\nu) e^{-i\nu x} d\nu, \quad (3)$$

$$\text{где } F_{\alpha}(\nu) = \frac{W(-\nu)G(\nu)}{L(\nu) + \alpha M(\nu)}, \quad (4)$$

$L(\nu) = |W(\nu)|^2$, $M(\nu) = \nu^2$, $\alpha > 0$ – параметр регуляризации.

Как видно из формулы (4) физический смысл регуляризации заключается в фильтрации высоких частот в выходном сигнале. Таким образом, метод регуляризации Тихонова целесообразно применять, если в полученном спектре распределения яркости в изображении пары вибрирующих штрихов присутствуют высокочастотные шумы. Поэтому единственным устойчивым решением в данном случае для любого значения параметра α будет то, при котором выходной сигнал $g(x)$ представлен в виде δ -функции.

Тогда для контроля параметров заданной полигармонической вибрации будем использовать сравнение теоретических и экспериментально полученных зависимостей распределений яркости в изображении тест-объекта, а также ЧКХ. Причем теоретические характеристики необходимо получать в процессе градуировки измерительной установки, включающей в себя фиксацию изображения тест-объекта в покое, расчет характеристики вибрации и решение уравнения (2.87). Результат сличения теоретических и экспериментально полученных характеристик будет свидетельствовать о том, отклонились или нет параметры полигармонической вибрации от контролируемых значений.

Для контроля размаха вибрации необходимо определить вид характеристики вибрации изображения для различных законов вибрации.

Очевидно, что для любого закона вибрации будет выполняться следующее условие, чем выше скорость перемещения тест-объекта, тем меньше будет освещенность, зарегистрированная на фотоприемнике, и наоборот [11]. Следовательно, закон изменения освещенности можно представить в виде [12]:

$$w(x(t)) = k_1 - k_2 \cdot x'(t). \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент, характеризующий освещенность в статическом положении тест-объекта;

k_2 – коэффициент, характеризующий вклад скорости в итоговую освещенность.

Следует заметить, что при $k_2 = 0$ закон изменения освещенности для любых значений скорости тест-объекта будет иметь постоянное значение k_2 , следовательно, вне зависимости от закона вибрации: гармонического, линейного или экспоненциального, характеристика вибрации будет иметь вид:

$$w(x) = k_1 \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{R}\right). \quad (6)$$

где R – размах вибрации.

Не будем пренебрегать вкладом скорости в итоговую освещенность, зафиксированную на фотоприемнике от тест-объекта [13], то есть примем $k_2 > 0$, и на основании (5) построим модели смаза изображения вибрирующего тест-объекта при фиксации стробоскопического эффекта для различных законов вибрации.

Для реализации метода контроля параметров вибрации необходимо провести гра-

дуировку измерительной установки. Для этого нужно получить количественные значения коэффициента k_1 в формуле (5), характеризующего освещенность в статическом положении тест-объекта, и коэффициента k_2 той же формулы, характеризующего вклад скорости в итоговую освещенность, или их отношение.

При градуировке будем использовать гармоническую вибрацию тест-объекта на частоте $f_0 = 25$ Гц и размахе $R = 0,84$ мм, при этом должно выполняться условие $f_{ТВ} = f_0 = 25$ Гц и $t_{экс} = T_0 = 40\,000$ мкс. Выбор частоты произведен произвольно, а размаха – из соображения, что нулевой контраст должен наблюдаться в изображении предпоследней пары штрихов тест-объекта, чтобы в изображении тест-объекта фиксировался как положительный контраст на низких пространственных частотах, так и отрицательный контраст с появлением искажений в изображении штрихов за счет вибрации – на высоких пространственных частотах. Далее необходимо зафиксировать изображение тест-объекта $f(x)$, находящегося в покое, и изображение тест-объекта $g(x)$, вибрирующего на частоте $f_0 = 25$ Гц с размахом $R = 0,84$ мм.

Для того чтобы найти частотное представление характеристики вибрации $W(v)$ в соответствии с формулой (1), нужно получить частное от деления спектров функций $f(x)$ и $g(x)$. Затем, используя обратное преобразование Фурье, найти пространственное представление характеристики вибрации $w(x)$, по которому вычислить значение коэффициентов k_1 и k_2 .

Однако применение сначала дискретного преобразования Фурье для двух функций, а затем обратного дискретного преобразования Фурье для частного от деления их спектров содержит ошибки округления, а также влияние утечки спектра.

Поэтому для вычисления значений коэффициентов k_1 и k_2 необходимо последовательно перебрать их значения, для которых построить функции $w(x)$, и сравнить изображение тест-объекта $g(x)$, вибрирующего на частоте $f_0 = 25$ Гц с размахом $R = 0,84$ мм, и свертку характеристики вибрации $w(x)$ и изображения тест-объекта $f(x)$, находящегося в покое. Значения коэффициентов k_1 и k_2 , для которых D – сумма квадратов отклонений значений $g(x)$ и значений свертки $f(x)$ и $w(x)$ – минимальна, и будут искомыми для рассматриваемой видеокамеры.

Хотя этот процесс занимает значительное время, не является критичным, так как

определение значений коэффициентов k_1 и k_2 осуществляется только при градуировке экспериментальной установки.

График изменения оптического сигнала в изображении неподвижного тест-объекта $f(x)$ представлен на рисунке 1.

График изменения оптического сигнала в изображении тест-объекта $g(x)$, вибрирующего на частоте $f_0 = 25$ Гц с размахом $R = 0,84$ мм показан на рисунке 2. Как видно из этого изображения на самой низкой пространственной частоте наблюдается положительный контраст, в изображении второй пары штрихов фиксируется нулевой контраст. С повышением пространственной частоты контраст меняет свой знак и становится отрицательным, но на самых двух высоких пространственных частотах снова становится положительным, хотя значение контраста в изображении двух последних пар штрихов невелико.

Анализируя график изменения оптического сигнала в изображении тест-объекта $g(x)$, вибрирующего на частоте $f_0 = 25$ Гц с

размахом $R = 0,84$ мм, можно заметить, что в изображении штрихов появляются артефакты, которые были предсказаны теоретически. В изображении пары штрихов с наименьшей пространственной частотой появляются локальные возмущения как на самих штрихах, так и между ними. На средних пространственных частотах в изображении пар штрихов, где контраст имеет отрицательное значение, а сигнал должен монотонно уменьшаться до центра пары штрихов, а затем монотонно увеличиваться, появляются дополнительные экстремумы. В изображении пар штрихов с наибольшими пространственными частотами регистрируется положительный контраст, а в сигнале также присутствуют дополнительные экстремумы. Это связано с нелинейностью характеристики вибрации $w(x)$, которая приводит к неравномерному смазу изображения штрихов тест-объекта и появлению эффектов в виде дополнительных экстремумов в изменении оптического сигнала в изображении штрихов тест-объекта.

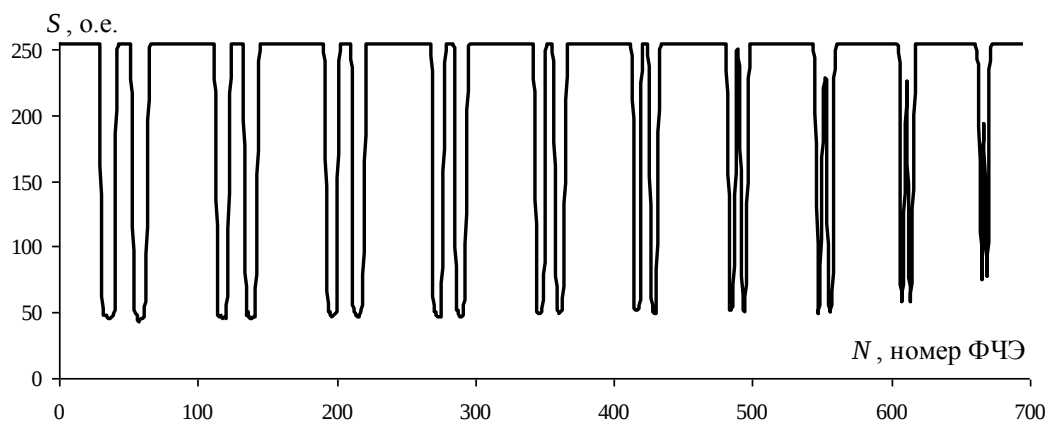


Рисунок 1 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов от номера ФЧЭ

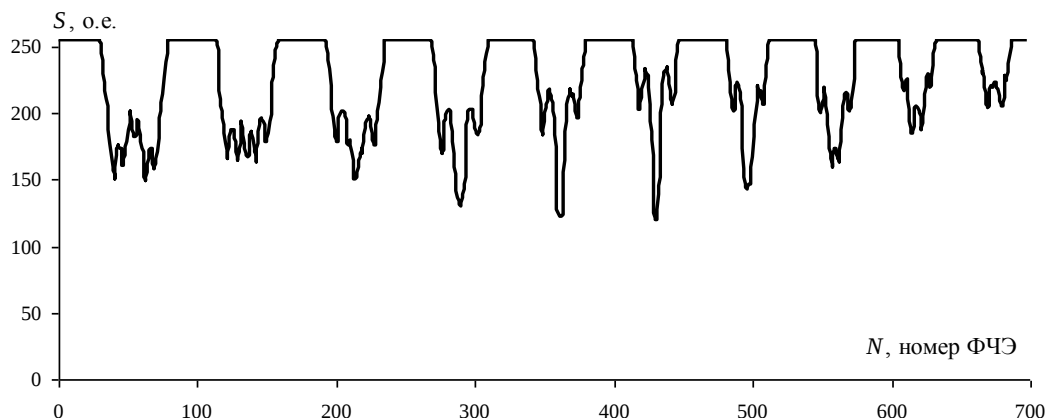


Рисунок 2 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов $g(x)$ от номера ФЧЭ при $f_0 = f_{TB} = 25$ Гц, $R = 0,84$ мм.

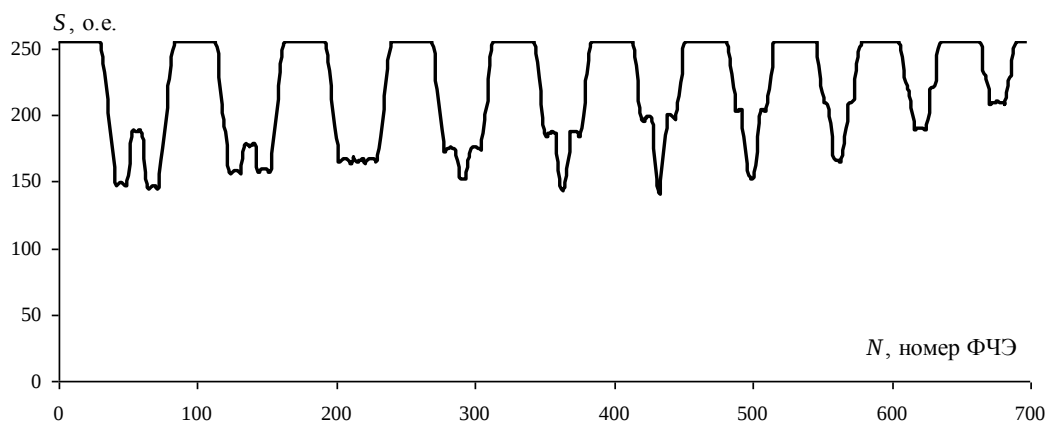


Рисунок 3 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов, полученный сверткой $f(x)$ и $w(x)$, от номера ФЧЭ при $f_0 = f_{TB} = 25$ Гц, $R = 0,84$ мм, $k_2/k_1 = 0,2$ о.е.

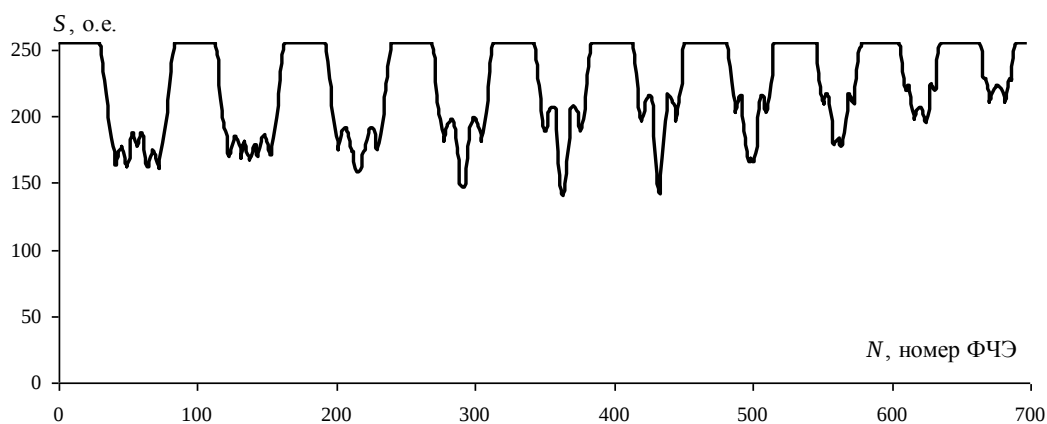


Рисунок 4 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов, полученный сверткой $f(x)$ и $w(x)$, от номера ФЧЭ при $f_0 = f_{TB} = 25$ Гц, $R = 0,84$ мм, $k_2/k_1 = 0,6$ о.е.

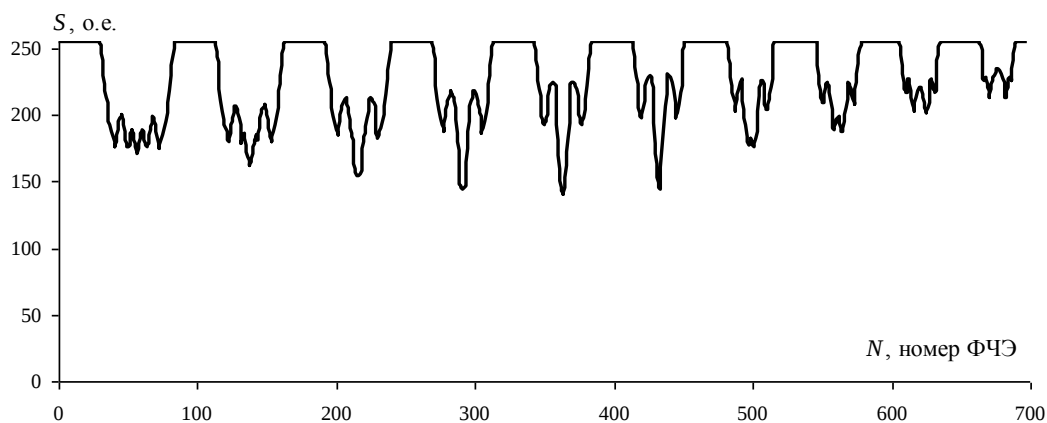


Рисунок 5 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов, полученная сверткой сигнала $f(x)$ и $w(x)$ от номера ФЧЭ при $f_0 = f_{TB} = 25$ Гц, $R = 0,84$ мм, $k_2/k_1 = 0,8$ о.е.

Далее будем выполнять свертку изображения тест-объекта $f(x)$, находящегося в

покое, с характеристикой вибрации $w(x)$ для различных значений коэффициентов k_1 и k_2 .

На рисунке 3 представлен график изменения оптического сигнала в изображении штрихов тест-объекта, полученный сверткой сигнала $f(x)$ и $w(x)$ при $k_2/k_1 = 0,2$ о.е. В этом случае отношение коэффициентов k_2/k_1 не велико, и характеристику вибрации $w(x)$ в первом приближении можно рассматривать в виде прямоугольника. Как видно из представленного графика оптический сигнал в изображении штрихов не имеет резких изменений, сопровождающихся появлением локальных экстремумов. Нулевой контраст в данном случае наблюдается в изображении третьей пары штрихов, то есть произошел сдвиг пространственной частоты, на которой наблюдается нулевой контраст, по сравнению с экспериментальным результатом.

Об этом свидетельствует и изменение контраста в изображении штрихов, полученное сверткой $f(x)$ и $w(x)$. Однако в этом случае не была учтена нелинейность характеристики вибрации, поэтому даже визуально наблюдаются отличия полученного графика изменения оптического сигнала в изображении штрихов (рисунок 4) от экспериментальной зависимости (рисунок 2).

На рисунке 4 представлен график изменения оптического сигнала в изображении штрихов тест-объекта, полученный сверткой сигнала $f(x)$ и $w(x)$ при $k_2/k_1 = 0,6$ о.е. В этом случае представлять характеристику вибрации $w(x)$ в виде прямоугольника уже нельзя, так как она имеет эллиптический вид. Это свидетельствует о том, что сигнал, накопленный ПЗС-фотоприемником от тест-объекта при движении с максимальной скоростью, в 0,6 раз меньше, чем когда тест-объект находится в покое.

Как видно из этого графика оптический сигнал в изображении штрихов, полученный сверткой $f(x)$ и $w(x)$ практически полностью повторяет все изменения экспериментально полученного сигнала, включая локальные возмущения, представленного на рисунке 2.

В изображении пары штрихов с наименьшей пространственной частотой также наблюдаются локальные возмущения как на самих штрихах, так и между ними. На средних пространственных частотах в изображении пар штрихов слева и справа появляются дополнительные всплески. В изображении пар штрихов с наибольшими пространственными частотами регистрируется положительный контраст, а в сигнале также присутствуют дополнительные экстремумы.

Эти изменения подтверждаются и расчетами контраста в изображении штрихов при

$k_2/k_1 = 0,6$ о.е. Контраст на самой низкой пространственной частоте имеет небольшое положительное значение, затем при увеличении пространственной частоты в изображении второй пары штрихов принимает нулевое значение и далее становится отрицательным. Однако с дальнейшим увеличением пространственной частоты не происходит асимптотического стремления к нулевому значению, и в изображении двух последних пар штрихов фиксируется положительный контраст. Это связано как было показано выше с нелинейностью характеристики вибрации $w(x)$, что и подтверждается экспериментально.

На рисунке 5 представлен график изменения оптического сигнала в изображении штрихов тест-объекта, полученный сверткой сигнала $f(x)$ и $w(x)$ при $k_2/k_1 = 0,8$ о.е. Таким образом, при движении тест-объекта с максимальной скоростью на ПЗС-фотоприемнике практически не накапливается никакого сигнала.

Следовательно, дальнейшее увеличение отношения k_2/k_1 приводит к появлению в изображении штрихов тест-объекта высокочастотного шума и искажению оптического сигнала. Кроме всего прочего происходит сдвиг пространственной частоты, на которой фиксируется нулевой контраст, в область низких частот.

Для того чтобы получить количественную оценку расхождения экспериментально полученного изображения тест-объекта $g(x)$, вибрирующего на частоте $f_0 = 25$ Гц с размахом $R = 0,84$ мм, и изображения тест-объекта, полученного сверткой характеристики вибрации $w(x)$ и изображения тест-объекта $f(x)$, находящегося в покое, найдем сумму квадратов отклонений $g(x)$ и свертки $f(x)$ и $w(x)$, для различных значений отношения k_2/k_1 (рисунок 6).

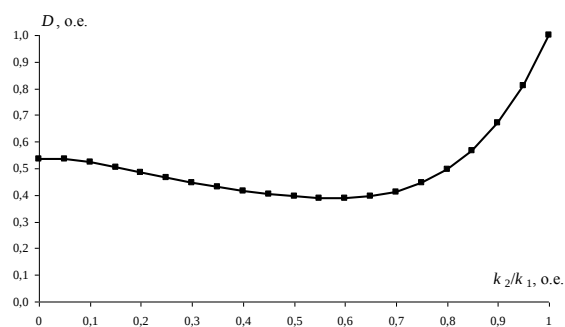


Рисунок 6 – Изменение суммы квадратов отклонений значений $g(x)$ и свертки $f(x)$ и $w(x)$ при $f_0 = f_{TB} = 25$ Гц, $R = 0,84$ мм для различных значений отношения k_2/k_1

Как видно из рисунка 6 минимальное расхождение экспериментально полученного изображения тест-объекта $g(x)$, вибрирующего на частоте $f_0 = 25$ Гц с размахом $R = 0,84$ мм, и изображения тест-объекта, полученного сверткой характеристики вибрации $w(x)$ и изображения тест-объекта $f(x)$, находящегося в покое, наблюдается для отношения k_2/k_1 , равного 0,6.

Заключение

Экспериментально определено отношение коэффициентов $k_2/k_1 = 0,6$ для ПЗС-фотоприемника SONY ILX751A видеокамеры VS-Ld-751B-2001, которое необходимо использовать при контроле полигармонической вибрации, который заключается в расчете характеристики вибрации $w(x)$, ее свертке с изображением тест-объекта $f(x)$, находящегося в покое, и дальнейшим сравнением полученного результата с изображением вибрирующего тест-объекта $g(x)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довнар Д.В. Метод устранения прямолинейного равномерного смаза изображения / Д.В. Довнар, К.Г. Предко // Автометрия. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1984. – №6. – С. 94-97.
2. Василюк Н.Н. Электронная коррекция смаза изображения в сканирующей оптико-электронной системе / Н.Н. Василюк // Электромагнитные волны и электронные системы. – М. : Изд-во «Радиотехника», 2009. – №12 – С. 41-48.
3. Гончарский А.В. Реконструктивная обработка и анализ изображений в задачах вычислительной диагностики / А.В. Гончарский, И.В. Кочкиков, А.Н. Матвиенко. – М. : Изд-во Моск. Ун-та, 1993. – 140 с.
4. Тихоныхев В.В. Функция передачи модуляции цифровой аэрофотосъемочной системы при движении изображения / В.В. Тихоныхев, Ю.Г. Веселов, А.А. Данилин // Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. – М. : Изд-во «Радиотехника», 2010. – № 1. – С. 44-47.
5. Кузнецов П.К. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса / П.К. Кузнецов, В.И. Семавин, А.А. Солодуха // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – Самара : Изд-во СГТУ, 2005. – №37. – С. 150-157.
6. Симонов Г.В. Метод быстрой автоматической фокусировки астрономических ПЗС-камер / Г.В. Симонов, К.Н. Михнев, В.П. Макаренко // Электромагнитные волны и электронные системы. – М. : Изд-во «Радиотехника», 2013. – №1 – С. 16-18.
7. Антошкин Л.В. Адаптивная система коррекции дрожания изображения с модифицированным корреляционным датчиком / Л.В. Антошкин, Н.Н. Ботыгина, О.Н. Емалеев, П.Г. Ковадло, П.А. Коняев, В.П. Лукин, В.В. Лавринов // Оптика атмосферы и океана. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – №12. – С. 1077-1082.
8. Демидов В.М. Критерии сопоставления качества фокусировки объектов / В.М. Демидова // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений / Сборник статей под редакцией В.В. Тарасова, Ю.Г. Якушкова. – М. : Изд-во ЦНИИ «Циклон», 2007. – С. 273-280.
9. Пронин С.П. Контроль параметров вибрации объекта по оптическому изображению тест-объекта на экране монитора персонального компьютера / С.П. Пронин, А.В. Юденков, Е.А. Зрюмов // Естественные и технические науки. – М. : Изд-во Спутник+, 2009. № 5 (43). – С. 201-205.
10. Тихонов А.Н. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М. : Наука, 1990. – 230 с.
11. Зрюмов Е.А. Математическая модель колебаний тест-объекта, фиксируемого на фотоприемнике видеокамеры / Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин, А.В. Юденков // Материалы Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 112-115.
12. Зрюмов Е.А. Модель характеристики вибрации при бесконтактном контроле с помощью ПЗС-фотоприемника / Е.А. Зрюмов, С.П. Пронин, Р.С. Танков // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы – ВИС-2012» / Ползуновский альманах 2012 №2. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2012. – С. 101-103.
13. Бакушинский А.Б. Некорректные задачи. Численные методы и приложения / А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 199 с.

Зрюмов Евгений Александрович – к.т.н., доцент, тел.: (3852) 29-09-13, e-mail: e.zrumov@mail.ru; **Пронин Сергей Петрович** – д.т.н., профессор, тел.: (3852) 29-09-13, e-mail: sppronin@mail.ru.