

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ПО СТРОБОСКОПИЧЕСКОМУ ЭФФЕКТУ

С. П. Пронин, Е. А. Зрюмов, П. А. Зрюмов

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

Для измерения параметров гармонических вибраций может быть применен стробоскопический эффект. Очевидно, что при кадровой частоте линейного ПЗС-фотоприемника f_{TV} , равной частоте вибрации объекта f_0 , наблюдается неподвижное изображение вибрирующего тест-объекта. По отмеченному признаку можно определить частоту вибрации f_0 . Размах вибрации R характеризует размытие изображения тест-объекта. Следовательно, по характеру размытия можно определить размах вибрации [1, 2].

Контраст в изображении тест-объекта

Под контрастом K понимают отношение разности яркостей в изображении к их сумме [3]:

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \quad (1)$$

где $B_{\max}$ и $B_{\min}$ – максимальная и минимальная яркости в изображении тест-объекта соответственно.

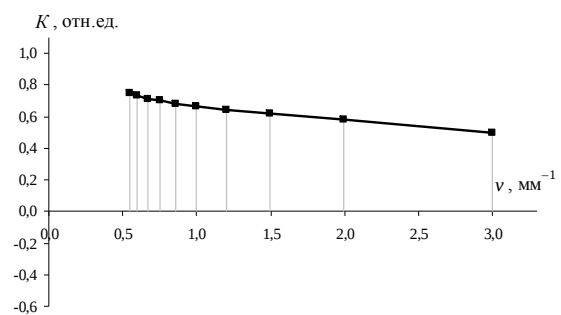
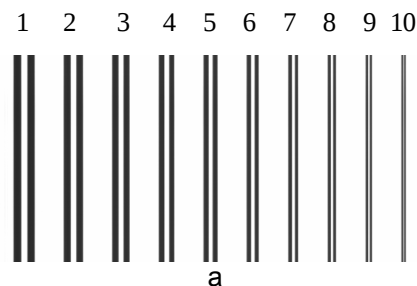
На рисунке 1,а показано статическое изображение неподвижного тест-объекта. Тест-объект представляет собой десять парных штрихов с различными геометрическими размерами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры тест-объекта

№ штриха	Ширина штриха, мм	№ штриха	Ширина штриха, мм
1	0,918	6	0,501
2	0,835	7	0,417
3	0,751	8	0,334
4	0,668	9	0,251
5	0,584	10	0,167

Как видно из рисунка, в статическом изображении штрихов тест-объекта максимальная яркость приходится на область между штрихами, а минимальная – на штрихи, поэтому для всех парных штрихов формула (1) дает положительный контраст. На рисунке 1,б представлен график изменения контраста в зависимости от пространственной частоты парных штрихов.

На рисунке 2,а показано изображение вибрирующего тест-объекта при условии стробоскопического эффекта. Время экспозиции $t_{экс}$ ПЗС-фотоприемника равно периоду смены кадров t_s ($t_{экс} = t_s$). Несмотря на то, что изображение вибрирующего тест-объекта на экране монитора неподвижно, оно все-таки отличается от изображения неподвижного тест-объекта, показанного на рисунке 1,а, по изменению контраста. Особенно на высоких пространственных частотах (штрихи 7, 8, 9 и 10). Поэтому будем его называть квазистатическим изображением. Например, парные штрихи 8 в статическом изображении имеют темные штрихи и светлый промежуток, в квазистатическом наблюдаются серые штрихи и темный промежуток.



б

Рисунок 1 – Статическое изображение неподвижного тест-объекта (а) и график изменения контраста в парных штрихах (б)

Если для описания контраста в квазистатическом изображении использовать классическую формулу (1), то мы не получим никакого отличия от статического изображения. Почти у всех парных штрихов в квазистатическом изображении можно выделить

максимальную и минимальную яркости. Поэтому контраст всегда будет положительным. Для исключения возникающей неопределенности запишем формулу (1) в виде:

$$K = \frac{B_m - B_{ш}}{B_m + B_{ш}}, \quad (2)$$

где B_m – яркость в фиксированной области изображения между штрихами, и $B_{ш}$ – яркость в фиксированной области изображения одного из штрихов.

Анализируя квазистатическое изображение тест-объекта (рисунок 2,а), можно сделать следующие выводы.

Первые шесть парных штрихов имеют положительный контраст, поскольку яркости между штрихами выше, чем яркость темных штрихов.

Седьмая пара штрихов имеет нулевой контраст, так как яркость в изображении штрихов и яркость промежутка между ними равны. Остальные парные штрихи имеют отрицательный контраст, потому что яркость между штрихами меньше, чем яркость самих штрихов.

На рисунке 2,б представлен график изменения контраста в зависимости от пространственной частоты, вычисленный по формуле (2).

Исходными данными для вычислений явились экспериментальные значения оптического сигнала в сечении А, показанном на рисунке 2,а. На рисунке 3 приведен экспериментальный график изменения оптического сигнала в изображении парных штрихов от номера фоточувствительного элемента (ФЧЭ).

Частота вибрации тест-объекта составляла $f_0 = 25$ Гц, кадровая частота линейного матричного фотоприемника – $f_{TV} = 25$ Гц, размах вибрации – $R = 0,42$ мм, время экспозиции – $t_{экс} = 40\ 000$ мкс.

Для парных штрихов 6, 7 и 8 указаны минимальные и максимальные значения оптического сигнала. Из графика хорошо видно, как с ростом пространственной частоты парных штрихов происходит инвертирование значений оптического сигнала.

Шестая пара штрихов имеет значения S_m больше, чем $S_{ш}$, поэтому контраст, рассчитанный по формуле (2), дает положительный результат. В седьмой паре штрихов значения S_m и $S_{ш}$ на уровне шумов неотличимы, поэтому контраст получается нулевым. Для восьмой пары штрихов значение S_m меньше, чем $S_{ш}$, поэтому контраст получается отрицательным.

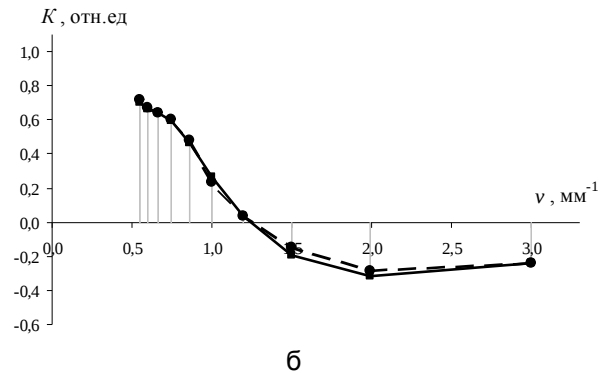
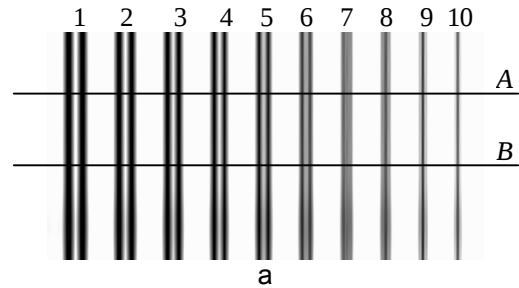


Рисунок 2 – Квазистатическое изображение вибрирующего тест-объекта (а) и график изменения контраста в парных штрихах (б)

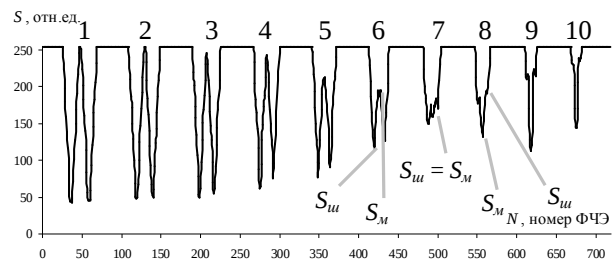


Рисунок 3 – График изменения оптического сигнала в изображении штрихов от номера фоточувствительного элемента (ФЧЭ)

Таким образом, формула (2) верно интерпретирует изменения контраста в изображении парных штрихов. Однако она не в состоянии предсказать этих изменений. Для анализа изменений контраста применяют более мощный показатель – частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) [4].

Частотно-контрастная характеристика матричного фотоприемника по оси вибрации изображения тест-объекта

Для матричного фотоприемника с размерами дискретных фоточувствительных элементов $p \times p$ мм, когда изображение перемещается в вертикальном направлении, а

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ПО СТРОБОСКОПИЧЕСКОМУ ЭФФЕКТУ

считывание сигнала осуществляется в горизонтальном направлении, ЧКХ вдоль оси перемещения изображения имеет вид [4]:

$$ЧКХ = \frac{\sin(\pi v t_{\text{экс}})}{\pi v t_{\text{экс}}} \cdot \frac{\sin(\pi p)}{\pi p}, \quad (3)$$

где u – скорость перемещения изображения тест-объекта относительно фотоприемника; $t_{\text{экс}}$ – время экспозиции; v – пространственная частота парных штрихов; p – размер дискретных фоточувствительных элементов.

Второй сомножитель в формуле (3) характеризует влияние размера дискретного фоточувствительного элемента на контраст в изображении парных штрихов. Его желательно исключить из дальнейшего рассмотрения. Этой цели можно достичь при калибровке контрольно-измерительной системы. Необходимо установить такое увеличение оптической системы, чтобы светлый промежуток между штрихами в изображении тест-объекта на самой высокой пространственной частоте составлял 1 ? 2 пикселя, что соответствует размеру 1р ? 2р в области фотоприемника (см. изображение на рисунке 1,а).

Следовательно, размер A для этой пары штрихов будет равен 2р ? 4р и второй сомножитель в (3) для самой высокой пространственной частоты примет постоянное значение 0,64 ? 0,90, то есть будет стремиться к единице. При выполнении этого условия изменение контраста будет определять только первый сомножитель. Задавая время экспозиции у фотоприемника, равным периоду смены кадров, а также принимая во внимание стробоскопический эффект, когда каждая точка тест-объекта за время смены кадров проходит путь S , равный удвоенному размаху вибрации $2R$, аргумент синуса в формуле (3) преобразуется к виду:

$$\pi v \cdot t_{\text{экс}} = \pi v \cdot S = \pi v \cdot 2R. \quad (4)$$

Учитывая, что размер $A = 2a$ и пространственная частота $v = 1/A$, из аргумента функции $\sin(\pi v \cdot 2R)$ несложно получить условие возникновения первого нулевого контраста [4]: размах вибрации R должен быть равен ширине штриха a , то есть $R = a$.

Таким образом, опуская постоянный множитель в (3), изменение контраста в парных штрихах при стробоскопическом эффекте можно записать в виде [5]:

$$ЧКХ = \frac{\sin(\pi v t_{\text{экс}})}{\pi v t_{\text{экс}}} = \frac{\sin(\pi v S)}{\pi v S} = \frac{\sin(\pi v 2R)}{\pi v 2R}, \quad (5)$$

где S – расстояние, на которое перемещаются штрихи тест-объекта за время экспозиции $t_{\text{экс}}$.

Формула (5) является теоретической основой для измерения и контроля параметров вибрации.

Применение ЧКХ для описания контраста в изображении вибрирующего тест-объекта

При кадровой частоте f_{TV} , равной частоте вибрации f_0 ($f_{TV} = f_0$), а также равенстве времени экспозиции $t_{\text{экс}}$ времени смены кадров t_s ($t_{\text{экс}} = t_s$) переход ЧКХ через нуль характеризует возникновение нулевого контраста в изображении парных штрихов с пространственной частотой v , равной [6]:

$$v = \frac{1}{A} = \frac{1}{2a} = \frac{1}{S} = \frac{1}{2R}. \quad (6)$$

Это равенство следует непосредственно из формулы (5).

На рисунке 4 приведен график теоретической ЧКХ, вычисленный при размахе вибрации $R = 0,42$ мм. Согласно математическому равенству (6) переход ЧКХ через нуль соответствует пространственной частоте:

$$v = \frac{1}{S} = \frac{1}{2R} = \frac{1}{2 \cdot 0,42} \approx 1,19 \text{ (мм}^{-1}\text{)}. \quad (7)$$

Следовательно, в парных штрихах, имеющих аналогичную пространственную частоту, должен возникать нулевой контраст. На рисунке 2,а, как и предсказывает теория, у седьмой пары штрихов наблюдается нулевой контраст, потому что пространственная частота этой пары составляет:

$$v_7 = \frac{1}{A} = \frac{1}{2a} = \frac{1}{2 \cdot 0,417} \approx 1,20 \text{ (мм}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Согласно полученной ЧКХ, в изображении парных штрихов, имеющих частоты v менее, чем v_7 , должен наблюдаться положительный контраст, а в изображении парных штрихов с пространственной частотой, выше, чем v_7 – отрицательный контраст.

Действительно, шестая пара (см. рисунок 2,а), размер штрихов которой превышает размах вибрации, имеет положительный контраст. Пространственная частота штрихов $v_6 = 1,00 \text{ мм}^{-1}$ лежит левее перехода ЧКХ через нуль.

Восьмая пара, размер штрихов которой меньше размаха вибрации, имеет отрицательный контраст. Их пространственная частота $v_8 = 1,50 \text{ мм}^{-1}$ лежит правее перехода ЧКХ через нуль и попадает в область отрицательных значений.

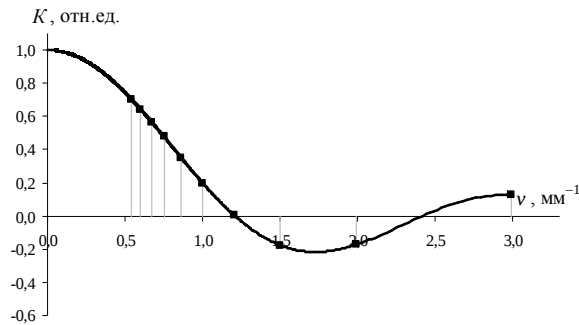


Рисунок 4 – График теоретической частотно-контрастной характеристики при $R = 0,42 \text{ мм}$

Как видно из расчетов (7) и (8), а также теоретического (рисунок 4) и экспериментального (рисунок 2,б) графиков области первого нулевого контраста имеют очень хорошие совпадения. Поэтому, во-первых, частотно-контрастная характеристика матричного фотоприемника по оси вибрации изображения тест-объекта объективно отражает процесс изменения контраста в парных штрихах. Во-вторых, отмеченные три признака: положительный, нулевой и отрицательный контрасты в изображении соседних парных штрихов квазистатического изображения вибрирующего тест-объекта, – могут быть использованы для измерения и контроля размаха и частоты гармонической вибрации.

Изменение ЧКХ от соотношения параметров вибрации и параметров ПЗС-фотоприемника

В качестве основных параметров вибрации приняты частота f_0 , период $T_0 = 1/f_0$ и размах R , а в качестве основных параметров ПЗС-фотоприемника – время экспозиции $t_{\text{ЭК}}$, частота кадров $f_{\text{ТВ}}$ и время кадра $t_s = 1/f_{\text{ТВ}}$.

Из формулы ЧКХ (5) видно, что изменение контраста (в том числе и возникающие погрешности) зависит от расстояния S , пройденного тест-объектом, поэтому необходимо выразить изменение расстояния от указанных основных параметров.

Пусть гармонические вибрации тест-объекта имеют период T_0 и размах R , как показано на рисунке 5. Линейный ПЗС-фотоприемник регистрирует процесс вибраций за время экспозиции $t_{\text{ЭК}}$. Считывание изображений с линейного ПЗС-фотоприемника повторяется с периодом смены кадров t_s . Найдем расстояние S_i , на которое перемещаются штрихи тест-объекта за время экспозиции $t_{\text{ЭК}}$ в любом i -ом кадре.

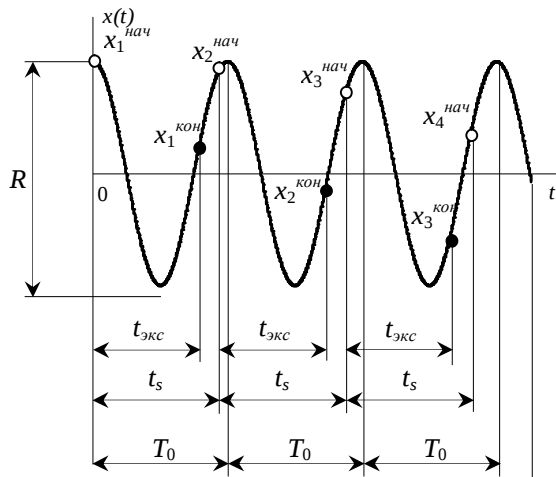


Рисунок 5 – Графическое представление пространственно-временного процесса вибраций тест-объекта с помощью линейного ПЗС-фотоприемника

Как видно из рисунка 5, за время экспозиции $t_{\text{ЭК}}$ в первом кадре тест-объект пройдет расстояние:

$$S_1 = 2R - |x_1^{\text{нач}} - x_1^{\text{кон}}|.$$

За время экспозиции $t_{\text{ЭК}}$ во втором кадре расстояние равно:

$$S_2 = 2R - |x_2^{\text{нач}} - x_2^{\text{кон}}|.$$

Следовательно, за время экспозиции $t_{\text{ЭК}}$ в i -ом кадре расстояние, пройденное тест-объектом, равно:

$$S_i = 2R - |x_i^{\text{нач}} - x_i^{\text{кон}}|, \quad (9)$$

где $x_{i\text{нач}}$ – начальное положение тест-объекта в i -ом кадре; $x_{i\text{кон}}$ – конечное положение тест-объекта в i -ом кадре.

Для вычисления значений $x_{i\text{нач}}$ и $x_{i\text{кон}}$ представим закон вибраций тест-объекта в виде:

$$y = \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 t).$$

Для вычисления $x_{i\text{кон}}$ за время смены кадров t_s составим математическую цепочку:

$$\begin{aligned} x_1^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot t_s), \\ x_2^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot 2t_s), \\ x_3^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot 3t_s), \\ &\vdots \\ x_i^{\text{кон}} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot i \cdot t_s) = \frac{R}{2} \cos(2\pi \cdot i \cdot \beta), \end{aligned} \quad (10)$$

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ПО СТРОБОСКОПИЧЕСКОМУ ЭФФЕКТУ

где

$$\beta = f_0 \cdot t_s = \frac{t_s}{T_0} = \frac{f_0}{f_{TV}} \quad (11)$$

– коэффициент, характеризующий отношение периода смены кадров к периоду вибрации тест-объекта, или частоты вибрации к кадровой частоте линейного ПЗС-фотоприемника.

Для вычисления $x_{iнач}$ за время экспозиции $t_{экс}$ составим математическую цепочку:

$$\begin{aligned} x_1^{нач} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot t_{экс}), \\ x_2^{нач} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot (t_s + t_{экс})), \\ x_3^{нач} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot (2t_s + t_{экс})), \\ &\vdots \\ x_i^{нач} &= \frac{R}{2} \cos(2\pi f_0 \cdot ((i-1) \cdot t_s + t_{экс})). \end{aligned} \quad (12)$$

Введем коэффициент γ , характеризующий отношение разности периода смены кадров и времени экспозиции к периоду вибраций тест-объекта:

$$\gamma = \frac{t_s - t_{экс}}{T_0} = \beta \left(1 - \frac{t_{экс}}{t_s} \right). \quad (13)$$

Подставляя (10), (12) в (9) и учитывая коэффициенты (11) и (13), получим расстояние S_i , которое проходит тест-объект за время экспозиции $t_{экс}$ в i -ом кадре:

$$S_i = 2R - \frac{R}{2} | \cos(2\pi(i\beta - \gamma)) - \cos(2\pi(i-1)\beta) |. \quad (14)$$

Подставляя S_i из (14) в формулу (5), можно вычислить изменения контраста в изображении парных штрихов тест-объекта:

$$ЧКХ_i = \frac{\sin(\pi S_i)}{\pi S_i}, \quad (15)$$

Получен очень важный результат. При неизменном размахе вибрации контраст в изображении штрихов может меняться от кадра к кадру, то есть во времени. Это означает, что на месте светлого промежутка между штрихами через определенное время может возникнуть темный промежуток.

Изменение ЧКХ в зависимости от времени экспозиции ПЗС-фотоприемника

При стробоскопическом эффекте $f_0 = f_{TV}$, а коэффициент $\beta = 1$. Подставляя значение β в формулу (15) получим упрощенную формулу изменения расстояния S_i в виде:

$$S_i = 2R - \frac{R}{2} \left| \cos(2\pi \frac{t_{экс}}{t_s}) - 1 \right|. \quad (16)$$

При условии, что $t_{экс} = t_s$, получим простое математическое равенство:

$$S_i = 2R.$$

Следовательно, расстояние, которое проходят парные штрихи в любом i -ом кадре, остается неизменным. Поэтому и ЧКХ _{i} , и контраст в изображении тест-объекта тоже остаются неизменными в любой произвольный момент времени.

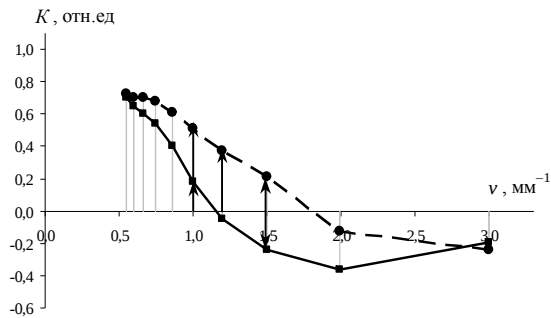
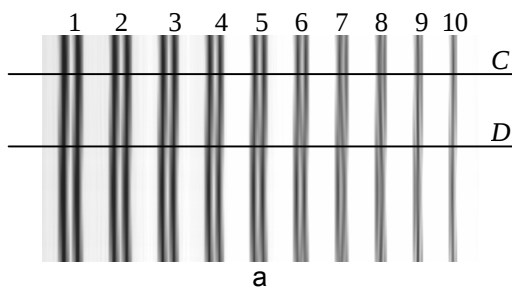
На рисунке 2,а, представлено изображение тест-объекта при условии $f_0 = f_{TV}$, $t_{экс} = t_s = 40\,000$ мкс. Как видно из рисунка 2,а, контраст во всех парных штрихах в любой произвольный момент времени, зафиксированных сечениями А и В, остается неизменным.

Если в формуле (16) принять условие, что $t_{экс} < t_s$, то расстояние S_i уменьшится. Согласно (15) пространственная частота перехода ЧКХ через нуль в этом случае просто сместится в сторону высоких пространственных частот, то есть нулевой контраст должен наблюдаться в парных штрихах 8 или 9, но во времени он тоже должен остаться постоянным, как и в первом случае. Однако в эксперименте наблюдаются существенные изменения. Контраст начинает «плавать».

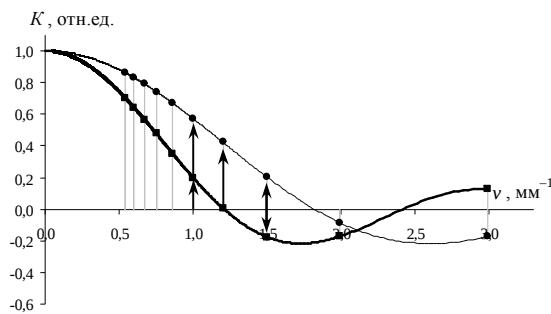
На рисунке 6,а представлено изображение тест-объекта при времени экспозиции $t_{экс} = 0,75t_s = 30\,000$ мкс, а на рисунке 6,б графики изменения контраста в изображении парных штрихов в сечениях С и D соответственно, вычисленные по формуле (2). Стрелками слева направо показаны изменения контраста в 6, 7 и 8 парах штрихов.

На рисунке 7,а представлено изображение тест-объекта при времени экспозиции $t_{экс} = 0,5t_s = 20\,000$ мкс, а на рисунке 7,б графики изменения контраста в изображении парных штрихов в сечениях Е и D соответственно. Стрелками слева направо показаны изменения контраста в 6, 7 и 8 парах штрихов.

Из приведенных рисунков видно, что контраст в изображениях парных штрихов может изменяться на 180° . Например, на рисунке 7,а парные штрихи 8 в сечении Е имеют положительный контраст, а в сечении F уже отрицательный. Подобное изменение контраста в радиальной штриховой мире при дефокусировке оптического изображения наблюдал О'Нейл. Этот эффект имеет название пространственного фазового сдвига, или фазового скачка.



б

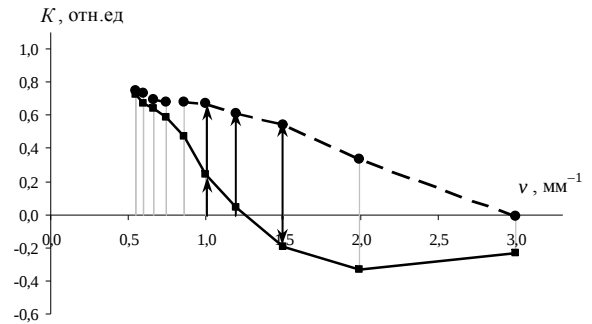
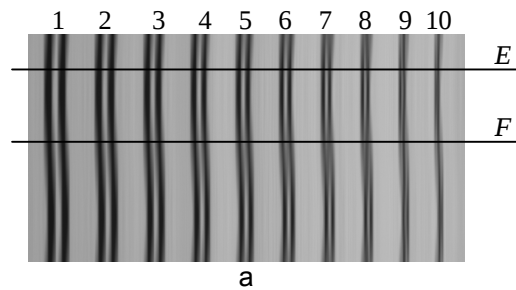


в

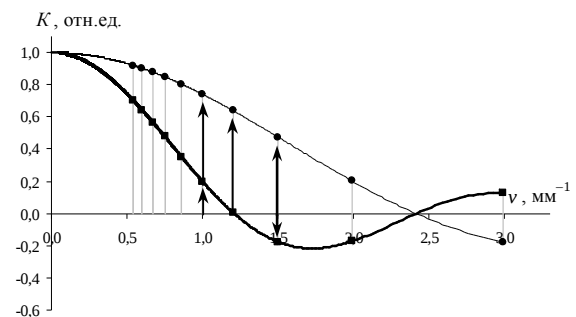
Рисунок 6 – Квазистатическое изображение вибрирующего тест-объекта при времени экспозиции $t_{\text{экс}} = 0,75 t_s = 30\,000$ мкс (а); экспериментальные изменения контраста в моменты времени, зафиксированные сечениями С (пунктирная линия) и D (сплошная линия) (б); теоретическое изменение ЧКХ (в)

Из проведенных экспериментов и полученных результатов можно предположить, что в квазистатическом изображении частоты f_{TV} и f_0 хотя и незначительно, но отличны между собой. Поэтому при расчете ЧКХ (15) необходимо пользоваться полной формулой расчета расстояния S_i (14).

Для проверки этой гипотезы было проведено математическое моделирование ЧКХ при следующих условиях теоретического эксперимента: размах вибрации $R = 0,42$ мм (полное совпадение с реальным экспериментом), частота вибрации тест-объекта $f_0 = 24,99$ Гц, кадровая частота линейного ПЗС-фотоприемника $f_{TV} = 25$ Гц и соответствующий ей период смены кадров $t_s = 1 / f_{TV} = 40\,000$ мкс (по паспорту видеокамеры).



б



в

Рисунок 7 – Квазистатическое изображение вибрирующего тест-объекта при времени экспозиции $t_{\text{экс}} = 0,5 t_s = 20\,000$ мкс (а); экспериментальные изменения контраста в моменты времени, зафиксированные сечениями Е (пунктирная линия) и F (сплошная линия) (б); теоретическое изменение ЧКХ (в)

Как видно из заданных условий, частоты отличаются весьма незначительно, всего на 0,04%, поэтому коэффициент β близок к единице: $\beta = 0,9996$. В процессе математического моделирования задавали время экспозиции $t_{\text{экс}}$ и по формуле (14) вычисляли покادровое изменение расстояния S_i , из которого определяли максимальное S_{max} и минимальное S_{min} значения. Далее эти значения подставляли в формулу (15), вычисляли две соответствующие ЧКХ и пространственные частоты v_{max} и v_{min} ее перехода через нулевые значения (таблица 2).

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВИБРАЦИЙ ПО СТРОБОСКОПИЧЕСКОМУ ЭФФЕКТУ

Таблица 2 – Результаты математического моделирования ЧКХ при $R = 0,42$ мм, $f_0 = 24,99$ Гц, $f_{TV} = 25$ Гц, $t_s = 40\ 000$ мкс

$t_{экс},$ мкс	$S_{max},$ мм	$S_{min},$ мм	$V_{max},$ мм ⁻¹	$V_{min},$ мм ⁻¹
40 000	0,84	0,84	1,19	1,19
30 000	0,84	0,54	1,19	1,84
20 000	0,84	0,42	1,19	2,38

Из первой строки таблицы 2 видно, что при $t_{экс} = t_s = 40\ 000$ мкс расстояние S_i остается неизменным ($S_{max} = S_{min}$), поэтому неизменными остаются и ЧКХ, и частоты перехода ЧКХ через нуль ($v_{max} = v_{min}$).

В этом случае наблюдается устойчивое изображение тест-объекта с неизменным контрастом в парных штрихах в любой произвольный момент времени (рисунок 2,а , сечения А, В). Экспериментальные изменения контраста в сечении А (пунктирная) и в сечении В (сплошная) представлены на рисунке 2,б, а теоретическая ЧКХ для заданных условий на рисунке. Как видно из сравнения графиков, ЧКХ объективно отражают изменение контраста в зависимости от пространственной частоты штрихов.

Из второй строки таблицы 2 видно, что при $t_{экс} = 0,75 \cdot t_s = 30\ 000$ мкс расстояние S_i изменяется от $S_{min} = 0,54$ мм до $S_{max} = 0,84$ мм. По этой причине происходит периодическое изменение пространственной частоты перехода ЧКХ через нуль и периодическое изменение самой ЧКХ. На рисунке 6,в представлено теоретическое изменение ЧКХ. Сплошная линия на графике отражает контраст в изображении парных штрихов в сечении D, а пунктирная – контраст в сечении С. Стрелками показаны изменения контраста в изображениях парных штрихов 6, 7 и 8. Как видно из графика, парные штрихи 6 при изменении ЧКХ могут находиться только в одном состоянии – принимать положительный контраст. Рисунок 6,б экспериментально подтверждает этот теоретический вывод. Парные штрихи 7 могут находиться в двух состояниях – принимать нулевой и положительный контрасты. Этот факт тоже подтвержден экспериментально. На рисунке 6,б для парных штрихов 7 в сечении С наблюдается положительный контраст, а в сечении D – нулевой. Парные штрихи 8 тоже могут находиться в двух состояниях – принимать положительный и отрицательный контрасты. Экспериментальные изменения контраста в штрихах для сечений С и D представлены на графиках рисунка 6,б.

В третьей строке таблицы 2 отображены результаты расчетов при $t_s = 40\ 000$ мкс и $t_{экс} = 20\ 000$ мкс. На рисунке 7,в представлено теоретическое изменение ЧКХ. Сплошная линия на графике отражает изменение контраста в изображении парных штрихов в сечении F (рисунок 7,а), а пунктирная – в сечении Е. Стрелками указаны изменения контраста в парных штрихах 6, 7 и 8.

Как видно из графиков (рисунок 7,б,в), теоретическое изменение ЧКХ соответствует экспериментальному изменению контраста.

Однако сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований показало хорошее совпадение изменений контраста во всех парных штрихах, кроме парных штрихов 10, размер которых в области фотоприемника соизмерим с размерами дискретных фоточувствительных элементов. Следовательно, для этих парных штрихов при математическом моделировании нельзя использовать упрощенную формулу (15), так значительный вклад в ЧКХ вносит второй сомножитель.

Из проведенных исследований следует вывод, что по стробоскопическому эффекту можно измерять и контролировать параметры вибрации. Частота вибрации равна кадровой частоте ПЗС-фотоприемника, а размах соответствует размеру штриха той пары, в которой наблюдается нулевой контраст. Однако при времени экспозиции $t_{экс}$, равном периоду смены кадров t_s , на практике затруднительно осуществлять поиск в изображении тест-объекта парные штрихи с нулевым контрастом, так как сказывается влияние шума (рисунок 5). Для того чтобы уменьшить погрешность измерения размаха гармонических вибраций, можно вводить рассогласование между временем экспозиции $t_{экс}$ и периодом смены кадров t_s . В полученном квазистатическом изображении тест-объекта необходимо определить парные штрихи, в которых контраст принимает нулевое и положительное значения. Размер именно этой пары и будет равен размаху гармонической вибрации.

Изменение контраста в изображении тест-объекта в зависимости от размаха вибрации

На рисунке 8 представлены три изображения вибрирующего тест-объекта по гармоническому закону с размахом $R = 0,24$ мм, $R = 0,36$ мм и $R = 0,42$ мм. Как видно из рисунка, с возрастанием размаха вибрации нулевой контраст последовательно «перемещается» от одной пары штрихов к другой. При размахе $R = 0,24$ мм нулевой контраст возни-

кает в 9-ой паре штрихов. Размер каждого штриха этой пары равен $a = 0,25$ мм. При размахе $R = 0,36$ мм – в 8-ой паре. Размер штрихов этой пары равен $a = 0,33$ мм. А при размахе $R = 0,42$ мм – в 7-ой паре. Размер штрихов этой пары равен $a = 0,42$ мм.

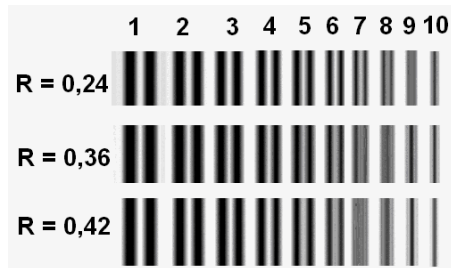


Рисунок 8 – Изображения вибрирующего тест-объекта по гармоническому закону с частотой 25 Гц

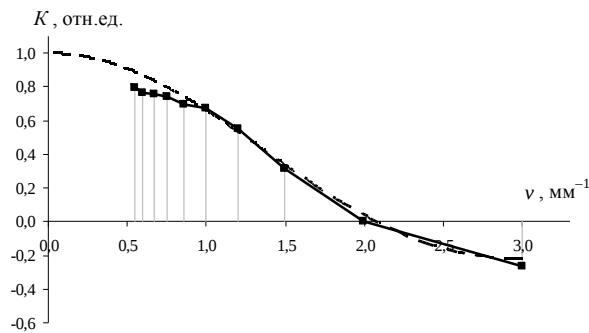


Рисунок 9 – Экспериментальное изменение контраста в изображении штрихов (сплошная линия) и теоретическая ЧКХ (пунктирная линия) при $f_0 = 25$ Гц, $R = 0,24$ мм, $t_s = 40\ 000$ мкс и $t_{\text{экс}} = 40\ 000$ мкс

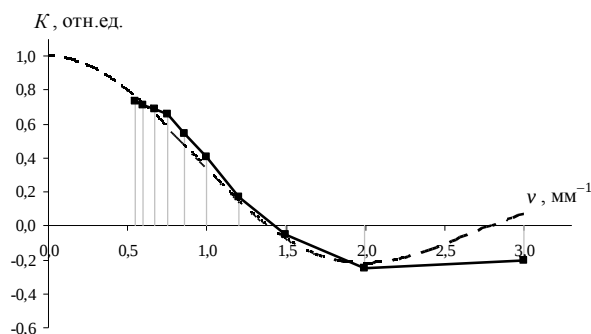


Рисунок 10 – Экспериментальное изменение контраста в изображении штрихов (сплошная линия) и теоретическая ЧКХ (пунктирная линия) при $f_0 = 25$ Гц, $R = 0,36$ мм, $t_s = 40\ 000$ мкс и $t_{\text{экс}} = 40\ 000$ мкс

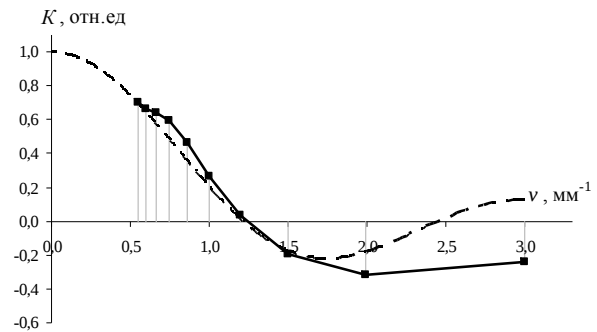


Рисунок 11 – Экспериментальное изменение контраста в изображении штрихов (сплошная линия) и теоретическая ЧКХ (пунктирная линия) при $f_0 = 25$ Гц, $R = 0,42$ мм, $t_s = 40\ 000$ мкс и $t_{\text{экс}} = 40\ 000$ мкс

Вывод

Полученные изображения подтверждают справедливость изложенной теории. Очень показателен результат при размахе вибрации $R = 0,36$ мм. Размер штрихов этой пары составляет $a = 0,33$ мм. Различие составляет 0,03 мм. Поэтому в изображении этой пары наблюдается узкая темная полоска, которая характеризует переход контраста у этой пары из области нулевого контраста в область отрицательного контраста.

На рисунке 9 показан результат вычисления контраста в изображении парных штрихов (сплошная линия) при размахе вибрации $R = 0,24$ мм и ЧКХ, отражающая теоретическое изменение контраста при тех же условиях эксперимента (пунктирная линия). На рисунке 10 и рисунке 11 приведены аналогичные графики, но при размахе вибрации $R = 0,36$ мм и $R = 0,42$ мм соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пронин С. П. Теоретические и экспериментальные исследования процесса пространственных колебаний в частотной и пространственной областях / С. П. Пронин, Д. Ю. Наталенко // Ползуновский альманах №3, 2007. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – С. 77-79.
2. Пронин С. П. Теоретические и визуальные экспериментальные исследования изменения контраста в изображении колеблющихся парных штрихов / С. П. Пронин и др. // Ползуновский альманах №2, 2009. – Барнаул: АлтГТУ, 2009. – С. 108-112.
3. Пронин С.П. Контроль параметров вибрации объекта по оптическому изображению тест-объекта на экране монитора персонального компьютера / С.П. Пронин и др. // Естественные и технические науки. – М.: Изд-во Спутник+, 2009. № 5 (43). С. 268-274.
4. Писаревский А.Н. Системы технического зрения. – Л.: Машиностроение, 1988. 420 с.

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2010