

## Информационные технологии

УДК 621.517, 681.142.36

### ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ОЦЕНКУ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ КОМПЛЕКСОМ

*А.Д. Абрамов*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: esib@samgtu.ru

*Рассматривается метод компенсации дополнительной погрешности измерения оптико-электронными средствами параметров микрорельефа поверхности, которая возникает вследствие отклонения уровня светового потока от его номинального значения. Метод основывается на определении автокорреляционных функций по изображениям анализируемых поверхностей.*

**Ключевые слова:** метод, оптико-электронный комплекс, измерение, преобразователь, поверхность, световой поток, изображение, погрешность, компенсация, автокорреляция.

**Введение.** Использование оптико-электронных измерительных преобразователей совместно со средствами компьютерной обработки сигналов для оценки параметров микрорельефа механически обработанных поверхностей в настоящее время находит все более широкое применение в машиностроительном производстве [1]. При этом наибольшее распространение получили такие средства, как атомно-силовая микроскопия, оптическая микроинтерферометрия, специализированные оптические микроскопы и рефлектометры. Атомно-силовая микроскопия и современная компьютеризированная микроинтерферометрия характеризуются очень высокой разрешающей способностью, которая позволяет измерять высотные параметры микрорельефа от долей нанометров до единиц микрометров. Отмеченное определяет ее основное использование при производстве высокоточных оптических приборов и изделий микроэлектроники. При этом аппаратура, реализующая эти методы, используется только в лабораторных условиях, так как она очень чувствительна к вибрациям, отличается высокой стоимостью и имеет значительные габариты и вес.

При производстве многих механических изделий в различных отраслях машиностроения такая высокая точность при измерении параметров микрорельефа не требуется. В этом случае применяются наряду с контактными профилометрами оптические приборы, использующие методы светового сечения, теневой проекции, растровый и рефлектометрический методы [2], позволяющие измерять высотные параметры микрорельефа (шероховатости) исследуемой поверхности в диапазоне 0,01 – 0,5 мкм по параметру  $Ra$  – среднему арифметическому отклонению профиля поверхно-

---

*Алексей Дмитриевич Абрамов (к.т.н., доц.), доцент каф. электронных систем и информационной безопасности.*

сти от средней линии. При производстве таких изделий на первое место выходят такие характеристики измерительной аппаратуры, как способность оперативно оценивать параметры микрорельефа непосредственно в ходе технологического процесса и в труднодоступных местах изготавливаемых изделий (внутренние полости штампов и прессформ, различные детали подшипников, отверстия небольшого диаметра и т. п.). Кроме того, аппаратура, обладающая такими характеристиками должна быть малогабаритной, обеспечивать простоту эксплуатации, иметь возможность цифровой обработки измерительной информации; обеспечивать энергосберегающий режим использования измерительных средств и иметь низкую стоимость, соизмеримую с щуповыми приборами – профилографами-профилометрами. Оптические приборы, использующие методы светового сечения, теневой проекции и растровый метод, предполагают использование специализированных микроскопов и применяются также только в лабораторных условиях. При этом требуются значительные временные затраты при производстве измерений, что полностью исключает использование данных приборов непосредственно в производственных условиях для оперативного контроля параметров шероховатости.

Отмеченные недостатки во многом устранены в рефлектометрических приборах, которые основаны на непосредственном определении мощности отраженного от исследуемой поверхности светового потока [2, 3]. Однако и этот метод имеет существенный недостаток, а именно зависимость отраженного светового потока не только от микрорельефа исследуемой поверхности, но и от условий эксплуатации прибора.

**Выполненные исследования.** Для проведения исследований влияния микрорельефа поверхности и внешних условий эксплуатации измерительной аппаратуры рефлектометрического типа на отраженный световой поток авторами был создан и применен измерительный комплекс, который включает в себя оптическую систему, видеокамеру, персональный компьютер и специально разработанное программное обеспечение. Данный комплекс образует информационно-измерительную систему (ИИС), которая предполагает определение таких параметров интегрального характера, как среднее арифметическое отклонение профиля исследуемой поверхности от средней линии  $Ra$ , высота неровностей профиля по конечному числу точек  $Rz$  и т. п. [4].

С помощью рассматриваемой ИИС участок анализируемой поверхности размером  $L_1 \times L_2$  считывают по строкам и столбцам строчно-кадровым растром телевизионной передающей камеры с ПЗС-матрицей и записывают в память ЭВМ. Таким образом, в памяти ЭВМ формируется кадр исходного полутонового изображения анализируемой поверхности формата  $K_1 \times K_2$  точек дискретизации – пикселей.

Для исследований были изготовлены методом бесцентрового шлифования три образца из стали ШХ15 с различной шероховатостью поверхности. Шероховатость определялась на профилографе модели SJ-201P: образец № 1 имел  $Ra = 0,56 \text{ мкм}$ , образец № 2 –  $Ra = 0,13 \text{ мкм}$  и образец № 3 –  $Ra = 0,084 \text{ мкм}$ .

Оптико-электронная система комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер  $3 \times 2,5 \text{ мм}$ . Световой поток падал на исследуемую поверхность под углом  $45^\circ$ . Формат видеокadra, записываемого в память компьютера, составлял  $K_1 \times K_2 = 320 \times 240$  пикселей [4].

Отметим, что при использовании черно-белой видеокамеры на каждый пиксель изображения поверхности в памяти компьютера отводится один байт. Следовательно,

сигнал яркости может принимать значения, лежащие в диапазоне 0 – 255 относительных единиц. Анализ полученных видеосигналов показал, что с уменьшением шероховатости поверхности наблюдается существенное уменьшение амплитуды переменной составляющей сигнала  $U_{cp}$  и, кроме того, ее сильная зависимость от освещенности исследуемой поверхности.

Для выбранных образцов с заданным микрорельефом были выполнены исследования влияния изменений интенсивности опорного светового потока  $\Phi_{om}$  на традиционные характеристики видеосигнала, такие как его среднее значение  $B_{cp}$  по всему кадру изображения, средняя амплитуда переменной составляющей видеосигнала  $U_{cp}$  и средний период его колебания  $T_{cp}$  на уровне  $B_{cp}$ . Анализ полученных результатов показал, что наиболее информативной характеристикой из них, по которой можно идентифицировать (распознавать) микрорельефы с различными параметрами шероховатости, является средняя амплитуда переменной составляющей видеосигнала  $U_{cp}$ . График зависимости  $U_{cp} = f(\Phi_o)$  представлен на рис. 1.

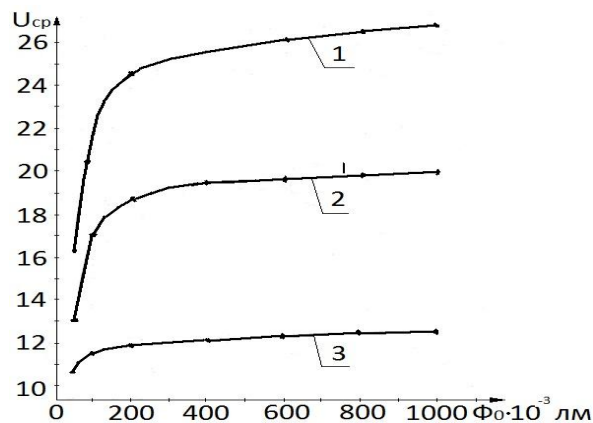


Рис. 1. Влияние изменения интенсивности опорного светового потока на среднюю амплитуду переменной составляющей видеосигнала  $U_{cp}$ :

1 –  $Ra = 0,56$  мкм, 2 –  $Ra = 0,13$  мкм, 3 –  $Ra = 0,084$  мкм

Примем за номинальное значение опорного светового потока величину  $\Phi_{on} = 600 \cdot 10^{-3}$  лм, а для величин  $\Phi_{o \min}$ ,  $\Phi_{o \max}$  – значения  $200 \cdot 10^{-3}$  лм и  $1000 \cdot 10^{-3}$  лм соответственно. Выбранный диапазон значений вполне соответствует рабочим значениям светового потока, встречающимся в практике применения рассматриваемых ИИС в производственных условиях. Отмеченные изменения светового потока могут происходить по разным причинам, например вследствие колебаний напряжения питания источников света, изменения прозрачности атмосферы на рабочем месте при выполнении технологического процесса изготовления изделия, неконтролируемых бликов на исследуемой поверхности от посторонних источников света и т. п.

Отметим, что величина отраженного светового потока  $\Phi_{om}$  от микрорельефа исследуемой поверхности является величиной промежуточной, на основании которой определяется параметр микрорельефа  $Ra$ . На основе полученных эксперимен-

тальных данных был построен график зависимости  $U_{CP} = f(Ra)$  для разных значений  $\Phi_o = \text{const}$ , приведенный на рис. 2. Его анализ показал, что если в результате измерения величина  $U_{CP}$  приняла значение 24 отн. ед., то при опорном световом потоке  $\Phi_{o\text{min}} = 200 \cdot 10^{-3}$  лм этому значению  $U_{CP}$  будет соответствовать значение  $Ra = 0,48 \text{ мкм}$ . При номинальном световом потоке  $\Phi_{o\text{н}} = 600 \cdot 10^{-3}$  лм – значение  $Ra = 0,35 \text{ мкм}$  и при значении светового потока  $\Phi_{o\text{max}} = 1000 \cdot 10^{-3}$  лм будет соответствовать значению  $Ra = 0,29 \text{ мкм}$ . Таким образом, изменение светового потока от нижней границы рабочего диапазона до его верхней границы под действием влияющей величины создает абсолютную погрешность в определении  $Ra$ , равную  $\Delta = 0,19 \text{ мкм}$ . При этом относительная погрешность  $\delta$ , определяемая как отношение  $(\Delta / Ra_{\text{НОМИН}}) \cdot 100\%$ , составит величину  $\delta = 54,3\%$ , где  $Ra_{\text{НОМИН}} = 0,35 \text{ мкм}$ .

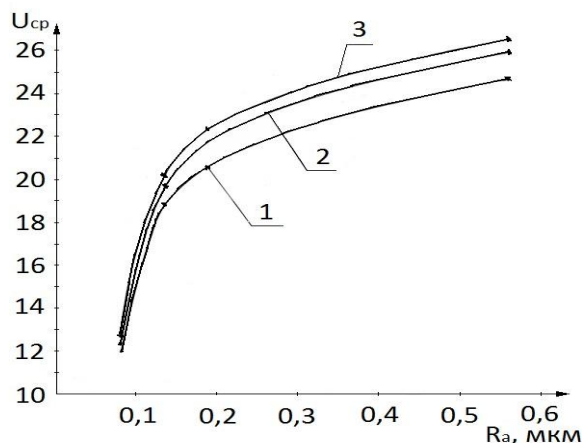


Рис. 2. Зависимость  $U_{CP} = f(Ra, \text{мкм})$  для различных значений опорного светового потока: 1 –  $\Phi_o = 200 \cdot 10^{-3}$  лм, 2 –  $\Phi_{o\text{н}} = 600 \cdot 10^{-3}$  лм, 3 –  $\Phi_o = 1000 \cdot 10^{-3}$  лм

Таким образом, определение высотных параметров микрорельефа на основе непосредственного измерения средней амплитуды видеосигнала  $U_{CP}$  может привести к значительным погрешностям. Эти непредусмотренные воздействия на освещенность исследуемой поверхности можно охарактеризовать с помощью функции влияния  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$  [5]. Для определения доминирующего характера этой функции были вычислены отношения величин  $U_{CP}$  для разных параметров  $Ra$  при значениях светового потока  $\Phi_{o\text{min}}$ ,  $\Phi_{o\text{н}}$ ,  $\Phi_{o\text{max}}$ . Обозначив эти отношения как  $K_{1,2} = U_{CP(Ra=0,56\text{мкм})} / U_{CP(Ra=0,13\text{мкм})}$ ,  $K_{1,3} = U_{CP(Ra=0,56\text{мкм})} / U_{CP(Ra=0,084\text{мкм})}$  и  $K_{2,3} = U_{CP(Ra=0,13\text{мкм})} / U_{CP(Ra=0,084\text{мкм})}$ , получим их соответствующие значения: при световом потоке  $\Phi_{o\text{min}}$   $K_{1,2} = 1,31$ ,  $K_{1,3} = 2,09$ ,  $K_{2,3} = 1,59$ ; при световом потоке  $\Phi_{o\text{н}}$   $K_{1,2} = 1,32$ ,  $K_{1,3} = 2,10$ ,  $K_{2,3} = 1,60$  и при световом потоке  $\Phi_{o\text{max}}$   $K_{1,2} = 1,33$ ,  $K_{1,3} = 2,19$  и  $K_{2,3} = 1,60$ . Полученные значения указанных отношений позволяют

обоснованно утверждать, что функция влияния  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$  нестабильности опорного светового потока и соответственно дополнительная погрешность, вызываемая действием данного оптического фактора, имеют мультипликативный характер.

Наличие мультипликативного характера функции  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$ , воздействующей на выходную величину оптико-электронного преобразователя (видеокамеры), диктует выбор логометрического способа устранения рассматриваемой дополнительной погрешности [6]. Однако применение логометрического способа предусматривает введение в состав рассматриваемой аппаратуры дополнительного осветительного канала и второй ПЗС-матрицы, содержащих компенсационные величины. Требуемое введение дополнительных устройств в измерительную аппаратуру существенно увеличивает ее габариты и усложняет ее использование в производственных условиях. Поэтому применительно к используемой разновидности измерительного преобразования был выдвинут иной принцип коррекции дополнительной погрешности, основанный на применении специальной математической обработки исследуемого изображения микрорельефа поверхности.

Реализация предлагаемого принципа коррекции осуществлена с привлечением теории оптимальной линейной фильтрации сигналов известной формы [7, 8]. Известно, что если на входе приемника-фильтра действует двумерная величина  $x(n_1, n_2)$ , по отношению к которой этот фильтр согласован, то выходной сигнал  $y(n_1, n_2)$  будет пропорционален автокорреляционной функции двумерного входного сигнала и, кроме того, будет достигнуто максимальное отношение сигнала к помехе на выходе фильтра.

Нахождение двумерной автокорреляционной функции в рамках рассматриваемой задачи осуществляется согласно известному выражению [8]

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \quad (1)$$

где через  $u(n_1, n_2)$  обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри зоны поиска  $x(n_1, n_2)$ , а  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – средние квадратические отклонения величин  $u(n_1, n_2)$  и  $x(n_1, n_2)$  от их математических ожиданий  $m_u$  и  $m_x$ . Анализируя выражение (2), можно отметить, что его числитель и знаменатель представляют собой суммы произведений сигналов текущего фрагмента изображения  $x(n_1, n_2)$  и эталона  $u(n_1, n_2)$ . Следовательно, эти сигналы будут подвержены, как было показано выше, мультипликативному воздействию функции влияния  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$ . Тогда выражение для нормированного коэффициента корреляции (2) с учетом воздействия функции влияния примет вид

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)}{\sigma_1 \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi) \cdot \sigma_2 \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)}.$$

Как видно из приведенного выражения для  $r_{xu}(k_1, k_2)$ , функции влияния  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$ , стоящие в числителе и знаменателе, сокращаются. Таким образом, ис-

пользуемая автокорреляционная функция обладает искомым компенсационным свойством, не требуя при этом введения дополнительной аппаратуры.

Для вычисления двумерной автокорреляционной функции в кадре формата  $K_1 \times K_2$  точек дискретизации по специально разработанной программе начиная с первой строки выделялась полоса шириной  $N_2$  пикселя. По центру этой полосы задавался эталон размером  $N_1 \times N_2$  пикселей. Затем эталон начиная с крайней левой позиции исходного изображения перемещался по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. Схема формирования и перемещения эталона по исходному изображению исследуемой поверхности приведена на рис. 3. При каждом совмещении эталона  $u(n_1, n_2)$  и текущего фрагмента полутонового изображения  $x(n_1, n_2)$  подсчитывался коэффициент корреляции по формуле (1). В связи с тем, что сравниваемые фрагменты  $x(n_1, n_2)$  и  $u(n_1, n_2)$  берутся из одного и того же изображения поверхности,  $r_{xm}(k_1, k_2)$  является коэффициентом автокорреляции.

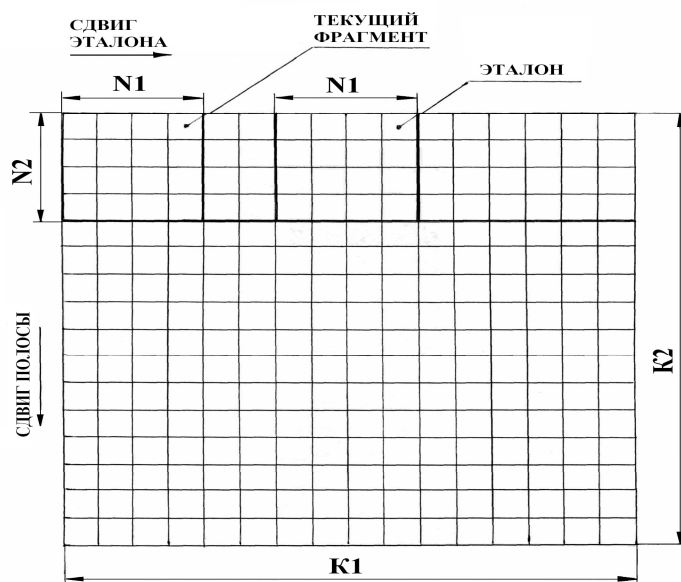


Рис. 3. Схема формирования и перемещения эталона

По окончании вычисления коэффициентов автокорреляции в первой полосе задавалась следующая полоса того же формата в исходном изображении, но смещенная вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задавался новый эталон, но с теми же размерами, что и предыдущий, и выполнялись те же самые действия для вычисления коэффициента автокорреляции и т. д. После обработки всего кадра исходного изображения по отмеченной методике в запоминающем устройстве ИИС формировалась матрица размерностью  $M_1 \times M_2$  коэффициентов автокорреляции, то есть двумерная автокорреляционная функция. Для этой функции определялось среднее значение переменной составляющей  $U_{ср}$ .

**Заключение.** Экспериментальная проверка предложенного метода коррекции дополнительной погрешности показала, что средний уровень переменной составляющей двумерной автокорреляционной функции остается постоянным для поверх-

ности с  $Ra = const$  при изменении светового потока от  $\Phi_{o\min}$  до  $\Phi_{o\max}$ . График зависимости  $U_{cp} = f(\Delta\Phi)$  представлен на рис. 4.

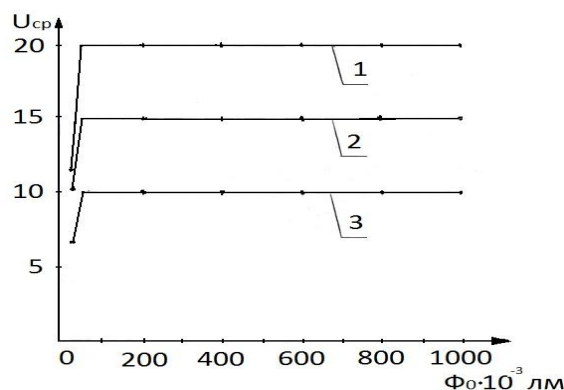


Рис. 4. Влияние изменения опорного светового потока на величину  $U_{cp}$  :

1 –  $Ra = 0,56$  мкм, 2 –  $Ra = 0,13$  мкм, 3 –  $Ra = 0,084$  мкм

Сам принцип определения неизвестной шероховатости по рассматриваемому методу заключается в следующем. Для эталонных образцов с известной шероховатостью, определенной по гостовским методикам, например с помощью профилографа, строится зависимость  $Ra = f(U_{cp})$  и для заданной вероятности распознавания  $Ra$  определяется доверительный интервал  $I_B = f(U_{cp})$ . Для неизвестной, исследуемой шероховатости по рассмотренному алгоритму обработки изображения вычисляют  $U_{cp}$ . Используя зависимость для доверительного интервала, находят  $U_{cp\min}$  и  $U_{cp\max}$ . Затем для найденных значений  $U_{cp}$ ,  $U_{cp\min}$  и  $U_{cp\max}$  по уравнению  $Ra = f(U_{cp})$  определяют  $Ra$ ,  $Ra_{\min}$  и  $Ra_{\max}$  для исследуемой поверхности. Практическая реализация корреляционного метода при оценке шероховатости цилиндрической поверхности бомбинированного ролика подшипника ступицы колеса автомобиля ВАЗ приведена в [4]. На данный метод определения шероховатости поверхности получен патент Российской Федерации № 2413179 «Способ контроля шероховатости поверхности».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы: Научное издание / Д. Уайтхауз. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 472 с.
2. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М: Машиностроение, 1987. – 232 с.
3. Ким К.Ю. Исследование и разработка оптического метода бесконтактного контроля шероховатости поверхностей. Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: Гос. техн. ун-т электронной техники, 2009. 150 с.
4. Абрамов А.Д. Определение микрогеометрии поверхности деталей машин и механизмов на основе компьютерной обработки их видеоизображений. – М.: Вестник компьютерных и информационных технологий, 2008. – № 11. – С. 18-25.
5. ГОСТ 8.009-72. Нормируемые метрологические характеристики. Средства измерения.
6. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

7. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Том 2. – М.: Мир, 1982. – 790 с.
8. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. – М.: Мир, 1988. – 486 с.

*Статья поступила в редакцию 13 марта 2012 г.*

## **INFLUENCES OF OPTICAL FAKTOR ON ESTIMATE OF SURFACE ROUGHNESS BY OPTICO-ELECTRONIC COMPLEX**

***A.D. Abramov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*This paper presents a method of compensation of the supplementary measurement error by the optic-electronic means of the surface microgeometry parameters, which appears as a result of the value of reference incident light deviation. The Method is based on determining autocorrelative functions by the vision of surfaces being analyzed.*

***Keywords:*** *method, optic-electronic complex, measurement, convertes, surface, reference incident light, image, error, compensation, autocorrelation.*

---

*Aleksey D. Abramov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*