

УДК 621.517

## УСТРАНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОНЫМИ СРЕДСТВАМИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА

© 2014 А.Д. Абрамов, Ф.Ф. Буканов

Самарский государственный технический университет

В статье рассматривается метод компенсации дополнительной погрешности измерения опτικο-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.

*Метод, опτικο-электронный комплекс, измерение, преобразователь, поверхность, световой поток, изображение, погрешность, компенсация, автокорреляция.*

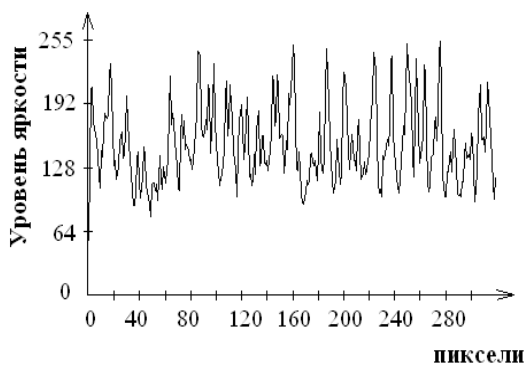
Микрорельеф рабочих поверхностей деталей машин и механизмов во многом может определять их надёжность и долговечность. Использование опτικο-электронных средств совместно со средствами компьютерной обработки сигналов для оценки параметров микрорельефа в настоящее время находит всё более широкое применение в машиностроении. [1]. При этом анализу возникающих при этом погрешностей определения параметров микрорельефа при изменении внешних условий эксплуатации опτικο-электронной аппаратуры, а также оптимальным методом устранения этих погрешностей в литературе уделено недостаточное внимание.

Для выявления характера погрешностей был создан комплекс аппаратуры, включающий оптическую систему с механической частью, видеокамеру, ПЭВМ и специально разработанное программное обеспечение [2]. Методом шлифования были изготовлены три образца из стали ШХ15 с различным микрорельефом исследуемой поверхности. Одной из характеристик микрорельефа, широко используемой в машиностроении, является его шероховатость. Она оценивается рядом гостовских параметров, в частности средним арифметическим отклонением профиля поверхности от средней линии

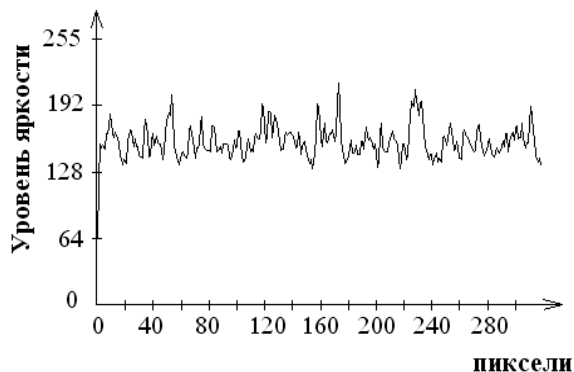
$Ra$ , мкм. Шероховатость определялась на профилографе модели SJ - 201P: образец № 1 имел  $Ra=0,56$  мкм, образец № 2 –  $Ra=0,13$  мкм и образец № 3 –  $Ra=0,084$  мкм. Оптическая часть комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер  $3 \times 2,5$  мм. Световой поток мощностью  $\Phi_o = 600 \cdot 10^{-3}$  лм падал на исследуемую поверхность под углом  $\alpha = 45^\circ$ . Формат видеокadra, записываемого в память компьютера, составлял  $320 \times 240$  пикселей. Характерные изменения яркости видеосигналов, характеризующие отражённый световой поток  $\Phi_\mu$  по строке видеокadra исследуемых поверхностей приведены на рис. 1.

Так как на один пиксель изображения микрорельефа в памяти ПЭВМ отводится один байт, то амплитуда видеосигнала измерялась в относительных единицах в диапазоне от  $00H$  до  $OFFH$ . Анализ приведённых видеосигналов показывает, что наиболее заметное влияние микрорельефа поверхности оказывает на амплитуду переменной составляющей видеосигнала  $U_{cp}$ .

В работе были выполнены исследования влияния светового потока  $\Phi_o$  на  $U_{cp}$ , результаты представлены на рис. 2.



Образец №1



Образец №3

Рис. 1. Изменения уровня яркости видеосигналов

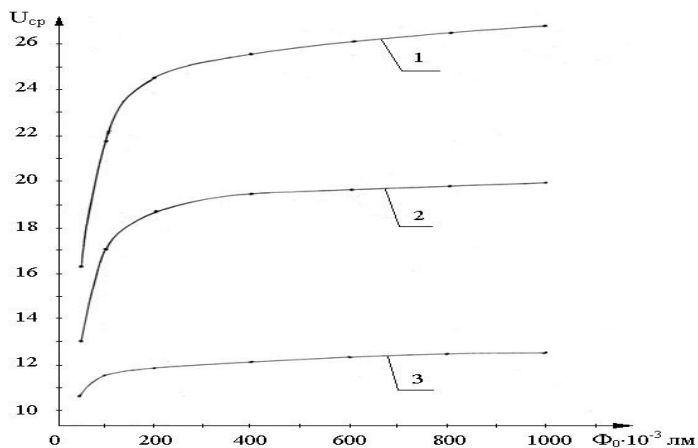


Рис. 2. Зависимость  $U_{cp} = f(\Phi_o)$  для поверхностей с различной шероховатостью: 1 –  $Ra=0,56$  мкм, 2 –  $Ra=0,13$  мкм, 3 –  $Ra=0,084$  мкм.

Их анализ показывает, что наиболее существенно  $U_{cp}$  видеосигнала изменяется при изменении светового потока  $\Phi_o$  от  $100 \cdot 10^{-3}$  до  $300 \cdot 10^{-3}$  лм, особенно для поверхности с  $Ra=0,56$  мкм. Для поверхности с меньшей шероховатостью этот показатель изменяется менее резко. При дальнейшем увеличении светового потока  $\Phi_o$  от  $300 \cdot 10^{-3}$  лм до  $1000 \cdot 10^{-3}$  лм происходит более медленное возрастание  $U_{cp}$  для всех исследуемых поверхностей. Отметим, что в данном случае функция преобразования светового потока  $\Phi_o$  в выходную величину  $U_{cp}$  зависит как от мощности светового потока, так и от параметров

исследуемого микрорельефа поверхности, то есть  $U_{cp} = f(\Phi_o, Ra)$ .

Примем за номинальное значение опорного светового потока величину  $\Phi_{он} = 600 \cdot 10^{-3}$  лм, а для величин  $\Phi_{о min}$ ,  $\Phi_{о max}$  – значения  $200 \cdot 10^{-3}$  лм и  $1000 \cdot 10^{-3}$  лм, соответственно. Выбранный диапазон значений  $\Phi_o$  вполне соответствует рабочим значениям светового потока, которые могут встретиться в практике применения рассматриваемой аппаратуры в заводских условиях. Отмеченные изменения светового потока можно охарактеризовать с помощью функции влияния. Согласно ГОСТ 8.009 – 72 “Нормируемые метрологические характе-

ристики. Средства измерения". Функция влияния – это зависимость изменений метрологической характеристики средств измерений от изменений влияющих величин или неинформативных параметров входного сигнала в пределах рабочих условий эксплуатации.

Для определения характера функции влияния, используя полученные зависимости  $U_{cp} = f(\Phi_o, Ra)$ , были вычислены отношения величин  $U_{cp}$  для разных значений  $Ra$  при значениях светового потока  $\Phi_{o\min}$ ,  $\Phi_{oH}$ ,  $\Phi_{o\max}$ . Обозначив эти отношения как

$$K_{1,2} = U_{cp(Ra=0,56\text{мкм})} / U_{cp(Ra=0,13\text{мкм})},$$

$$K_{1,3} = U_{cp(Ra=0,56\text{мкм})} / U_{cp(Ra=0,084\text{мкм})} \quad \text{и}$$

$K_{2,3} = U_{cp(Ra=0,13\text{мкм})} / U_{cp(Ra=0,084\text{мкм})}$  получили следующие значения: при световом потоке  $\Phi_{o\min} - K_{1,2} = 1,31$ ,  $K_{1,3} = 2,09$ ,  $K_{2,3} = 1,59$ ; при световом потоке  $\Phi_{oH} - K_{1,2} = 1,32$ ,  $K_{1,3} = 2,10$ ,  $K_{2,3} = 1,60$  и при световом потоке  $\Phi_{o\max} - K_{1,2} = 1,33$ ,  $K_{1,3} = 2,19$  и  $K_{2,3} = 1,60$ . Найденные значения отношений позволяют обоснованно предположить, что функция влияния носит мультипликативный характер [3]. Анализ зависимостей  $U_{cp} = f(\Phi_o, Ra)$  показал, что если в результате измерения величина  $U_{cp}$  приняла значение 24 отн.ед., то при опорном световом потоке  $\Phi_{o\min} = 200 \cdot 10^{-3}$  лм этому значению  $U_{cp}$  будет соответствовать значение  $Ra = 0,48\text{мкм}$ . При номинальном световом потоке  $\Phi_{oH} = 600 \cdot 10^{-3}$  лм – значение  $Ra = 0,35\text{мкм}$  и при значении светового потока  $\Phi_{o\max} = 1000 \cdot 10^{-3}$  лм будет соответствовать значение  $Ra = 0,29\text{мкм}$ . Таким образом, изменение светового потока от  $\Phi_{o\min}$  до  $\Phi_{o\max}$  под действием влияющей величины создаёт абсолютную погрешность определения  $Ra$  на основе измерения  $U_{cp}$ , равную  $\Delta = 0,19\text{мкм}$ . Отно-

сительная погрешность  $\delta$ , определяемая как отношение  $(\Delta / Ra_{\text{норм}}) \cdot 100\%$ , составит величину  $\delta = 54,3\%$ , где  $Ra_{\text{норм}} = 0,35\text{мкм}$ . Следовательно, определение высотных параметров микрорельефа на основе непосредственного измерения амплитуды видеосигнала  $U_{cp}$ , что характерно для рефлектометрической аппаратуры рассматриваемого назначения, может привести к значительным погрешностям при колебаниях светового потока  $\Delta\Phi = \Phi_{o\max} - \Phi_{o\min}$ .

Наличие мультипликативного характера функции  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$  диктует выбор логометрического способа устранения приведённой дополнительной погрешности [3]. Однако традиционное применение логометрического способа предусматривает введение в состав измерительной аппаратуры дополнительного осветительного канала и второй ПЗС-матрицы, что существенно увеличивает её габариты. В работе был предложен иной принцип коррекции дополнительной погрешности. Принцип сформулирован в форме требования соблюдения однозначных соответствий между набором величин  $(Y_{\text{э}i}(X_{\mu i}))$ ,  $i = 1, \dots, r$ , и двумя функционалами  $G_x(Y_{\text{э}i}(X_{\mu i}))$ ,  $i = 1, \dots, r$ ,  $x = 1, 2$ , где  $Y_{\text{э}i}$  характеризует отражательную способность  $i$ -го фрагмента анализируемой поверхности с шероховатостью  $X_{\mu i}$ ,  $r$  – количество фрагментов в анализируемой поверхности, которые определяется видом обработки поверхности. При реализации частного

$$G_1(Y_{\text{э}i}(Y_{\mu i}), i = 1, \dots, r) / G_2(Y_{\text{э}i}(Y_{\mu i}), i = 1, \dots, r) \quad (1)$$

одинаковые мультипликативные компоненты числителя и знаменателя  $f_{\text{вл}}(\Delta\Phi)$  сокращаются. Следовательно, реализация отношения (1) не ведёт к увеличению габаритов оптико-электронной аппаратуры для определения параметров шероховатости.

Реализация предлагаемого принципа коррекции дополнительной погрешности осуществлена с привлечением теории оптимальной линейной фильтрации сигналов известной формы [4]. Известно, что если на входе приёмника-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. Нахождения двумерной автокорреляционной функции с учётом воздействия функции влияния осуществлялось согласно известному выражению [5]

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) f_{вл}(\Delta\Phi) (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) f_{вл}(\Delta\Phi)}{\sigma_u f_{вл}(\Delta\Phi) \sigma_x f_{вл}(\Delta\Phi)}, \quad (2)$$

где через  $u(n_1, n_2)$  обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри зоны поиска  $x(n_1, n_2)$ , а  $\sigma_u$  и  $\sigma_x$  – средние квадратические отклонения величин  $u(n_1, n_2)$  и  $x(n_1, n_2)$  от их математических ожиданий  $m_u$  и  $m_x$ . Как видно из приведённого выражения для  $r_{xu}(k_1, k_2)$ , его структура соответствует структуре выражения (1), и функции влияния  $f_{вл}(\Delta\Phi)$ , стоящие в числителе и знаменателе, сокращаются. Следовательно, используемую автокорреляционную функцию можно рассматривать как частный случай отношения (1) и утверждать, что она обладает искомым компенсационным свойством.

Для вычисления 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 [2]. 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. При каждом совмещении эталона  $u(n_1, n_2)$  и текущего фрагмента полу-

тонового изображения  $x(n_1, n_2)$  подсчитывался коэффициент корреляции по формуле (2). 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, то  $r_{xu}(k_1, k_2)$  является коэффициентом автокорреляции. После окончания вычислений коэффициентов автокорреляции в первой полосе задавалась следующая полоса того же формата в исходном изображении, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе выполнялись те же самые действия для вычисления коэффициента автокорреляции и т.д. После обработки всего кадра исходного изображения по отмеченной методике в запоминающем устройстве ПЭВМ формировалась матрица размерностью  $M_1 \times M_2$  коэффициентов автокорреляции, то есть двумерная автокорреляционная функция.

Анализ полученных зависимостей  $r_{xu}(k_1, k_2)$  показал, что наиболее информативной характеристикой, по которой можно идентифицировать микрорельеф поверхностей с различной шероховатостью, является амплитуда переменной составляющей автокорреляционной функции  $U_{ср}$ . В работе были выполнены исследования влияния мощности светового потока на  $U_{ср}$ . Полученные зависимости  $U_{ср} = f(Ra, \Phi_o)$  приведены на рис.3.

Как видно из приведённых данных,  $U_{ср}$  остаётся постоянной для поверхности с  $Ra = const$  при изменении светового потока от  $\Phi_{o\min}$  до  $\Phi_{o\max}$ . Следовательно, предложенный метод позволит компенсировать негативное воздействие колебаний светового потока без усложнения оптико-электронной аппаратуры.

Сам принцип определения неизвестной шероховатости микрорельефа базируется на сравнении  $U_{ср}$  автокорреляционных функций исследуемой и образцовых поверхностей, для которых заранее определены параметры шероховатости по известным методикам [1].

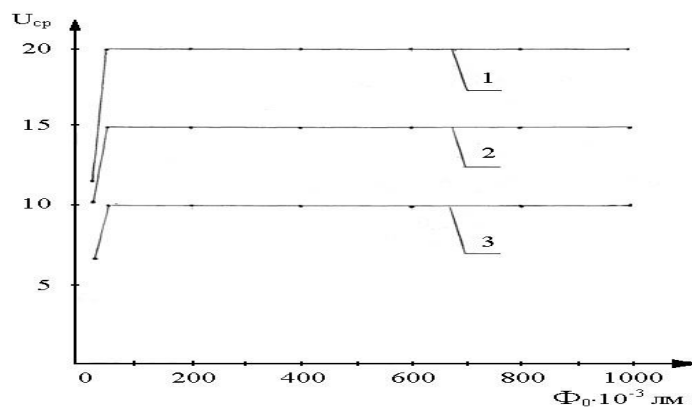


Рис. 3. Влияние изменения мощности светового потока на  $U_{cp}$ :  
 1 –  $Ra=0,56$  мкм, 2 –  $Ra=0,13$  мкм, 3 –  $Ra=0,084$  мкм.

В результате сравнения определяется, какой образцовой поверхности с заданной вероятностью идентификации соответствует найденное значение  $U_{cp}$  для ис-

следуемой поверхности и делается вывод, что исследуемая поверхность имеет такие же гостовские параметры шероховатости, как и образцовая поверхность.

### Библиографический список

1. Суслов А.Г., Корсакова И.М. Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин. Учеб. пособие для вузов. М.: МГИУ, 2010. 111 с.
2. Абрамов А.Д. Определение микрогеометрии поверхности деталей машин и механизмов на основе компьютерной обработки их видеоизображений. Вестник компьютерных и информационных технологий. №11, 2008. С. 18-25.
3. Шабалдин Е.Д., Смолин Г.К., Уткин В.П., Зарубин А.П. Метрология и электрические измерения. Учеб. пособие для вузов. Екатеринбург. Изд-во ГОУ ВПО "Рос. гос. проф.-пед. ун-т", 2006. 282 с.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2003. 462 с.
5. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М., Мир, 1988. 488с.

### Информация об авторах

**Абрамов Алексей Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [Esib@Samgtu.ru](mailto:Esib@Samgtu.ru). Область научных интересов: информационно-измерительные системы, обработка изображений с помощью компьютерных технологий.

**Буканов Фёдор Фёдорович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность» Самарский государственный технический университет. E-mail: [Esib@Samgtu.ru](mailto:Esib@Samgtu.ru). Область научных интересов: информационно-измерительные системы, информационная безопасность.

# TROUBLE ERROR PARAMETERS DETERMINATION MICRORELIEF OPTOELECTRONIC MEANS ON THE BASIS OF CORRELATION ALGORITHM

© 2014 A.D. Abramov, F.F. Bukanov  
Samara State Technical University

In this article the method of compensation of auxiliary measurement error by means of optical and electronic complex of the parameters of surface microrelief which appears as a result of the deflection of the light flux level from its nominal meaning is viewed. The method is based on the determination of autocorrelative functions by the image of analyzed surface.

*Optic-electronic method, measurement, convertes, surface, reference incident light, image, error, compensation, autocorrelation.*

## References

1. Suslov A.G., Korsakov I.M. Assigning, marking and control parameters of surface roughness of machine parts. Textbook. manual for schools. M.: MGIU, 2010. 111p.
2. Abramov A.D. Determination of surface micro-geometry of machinery parts based on computer processing of their videos. Herald of computer and information technologies. Number 11, 2008. P. 18-25.(In Russ.)
3. Shabaldin E.D., Smolin G.K., Utkin V.P., Zarubin AP Metrology or electrical measurements. Textbook. manual for schools. Yekaterinburg. Publ HPE "Ros. Reg. Prof.-ped. Univ ", 2006. 282p.
4. Baskakov SI Radio Circuits and Signals. Moscow: Higher School, 2003. 462 p.
5. Dadzhion D., Mersereau R. Digital processing of multidimensional signals. Wiley, New York, 1988. 488p.

## About the authors

**Abramov Alexey Dmitrievich**, Candidat of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Electronic Systems and Information Security. E-mail: [Esib@Samgtu.ru](mailto:Esib@Samgtu.ru). Area of research: information-measuring systems, image processing using computer technology.

**Bukanov Fedor Fedorovich**, Candidat of Technical Sciences, Head of Department of Electronic Systems and Information Security. E-mail: [Esib@Samgtu.ru](mailto:Esib@Samgtu.ru). Area of research: information-measuring systems, information security.