



Научная статья

УДК 621.002:658.011:681.3

<https://elibrary.ru/zidlhw><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>

## Разработка методики построения трёхмерного изображения структуры поверхности деталей по их профилограммам

А.Д. Абрамов<sup>1✉</sup>, Н.В. Носов<sup>2</sup>, Р.В. Ладыгин<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

**Резюме.** Целью исследования является получение трехмерных изображений исследуемого микрорельефа рабочих поверхностей деталей машин с использованием более простых и доступных средств получения информации о структуре поверхности, а именно – с помощью профилографа. Для получения информации о трехмерном распределении высотных параметров микрорельефа необходимо перейти от профильных параметров микрогеометрии к параметрам ее структуры. Для построения 3D-модели изображений исследуемого микрорельефа прецизионных поверхностей деталей используется профилограмма поверхности, полученная стандартными ГОСТовскими методами. Цифровые значения сигнала вводятся в компьютер в виде одномерного массива (при этом количество элементов данного массива будет определять размер формируемого изображения). В процессе моделирования сформулированы новые требования к характеристикам микрогеометрии рабочих поверхностей. Предложено одномерный массив рассматривать как одну случайную реализацию видеосигнала вдоль горизонтальной оси X, полученного с видеокамеры, а его повторение вдоль оси Y позволит сформировать 3D-модель исследуемой поверхности детали машин. Для устранения недостатка неадекватного изображения 3D-модели исследуемой поверхности авторами предложено ввести случайную компоненту с использованием генератора псевдослучайных чисел для зашумления каждой последующей строки строящегося изображения. Такой генератор реализован в языке программирования C++. Установлено, что графики видеосигналов для разных строк существенно отличаются друг от друга, что отражает структуру реального микрорельефа. Таким образом, рассмотренный программный метод построения изображений позволяет получить 3D-модель структуры исследуемой поверхности для дальнейшей обработки данных сигналов оптико-электронным методом, не прибегая к использованию сложной и дорогостоящей аппаратуры.

**Ключевые слова:** структура, поверхность, изображение, цифровая обработка, зашумление, генератор псевдослучайных чисел

**Для цитирования:** Абрамов А.Д., Носов Н.В., Ладыгин Р.В. Разработка методики построения трёхмерного изображения структуры поверхности деталей по их профилограммам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 230–240. EDN: ZIDLHW, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Development of a method for constructing a 3D image of the surface structure of parts based on their profilograms

Aleksy D. Abramov<sup>1✉</sup>, Nikolay V. Nosov<sup>2</sup>, Roman V. Ladyagin<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Samara Polytech Flagship University, Samara, Russia

**Abstract.** This work is aimed at obtaining 3D images of the microrelief of working surfaces of machine parts using a profilograph, which represents a simple and convenient approach to analyzing the surface structure. To obtain information about the 3D distribution of height parameters of a microrelief, its structural parameters, rather than microgeometry profile, should be used. To build a 3D model of the microrelief of precision parts, a profilogram obtained by conventional GOST methods is used. The digital values of a signal are entered into a computer in the form of a one-dimensional

array (the number of elements of this array will determine the size of the generated image). In the process of modeling, new requirements for the microgeometry characteristics of working surfaces are formulated. It is proposed to consider the one-dimensional array as a single random realization of a video camera signal along the X axis. Then its replication along the Y axis will form a 3D model of the examined surface. In order to eliminate the drawback of inadequate imaging of the 3D model of the studied surface, it is proposed to introduce a random component using a pseudorandom number generator to add noise to each successive line of the image under construction. This generator is implemented in the C++ programming language. It was established that video signal graphs for different lines differ significantly, thereby reflecting the real microrelief structure. The proposed method for constructing digital images can be used to obtain a 3D model of the surface structure under examination for further processing of these signals by an optical electronic method, without using complex and expensive equipment.

**Keywords:** structure, surface, image, digital processing, noise contamination, pseudorandom number generator

**For citation:** Abramov A.D., Nosov N.V., Ladyagin R.V. Development of a method for constructing a 3D image of the surface structure of parts based on their profilograms. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):230-240. (In Russ.). EDN: ZIDLHW, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>.

## ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными исследованиями установлено, что шероховатость (или микрогеометрия рабочих поверхностей) деталей машин оказывает существенную, а порой и определяющую роль в надежности и долговечности промышленных изделий при их эксплуатации [1–3]. В связи с этим важную роль приобретают и вопросы контроля параметров микрогеометрии поверхности изделий, как на этапе их изготовления, так и в процессе эксплуатации. До недавнего времени основными документами, регламентирующими набор необходимых параметров микрогеометрии поверхности деталей, характеризующими ее качество, являлись ГОСТ 2789-73<sup>4</sup> и ГОСТ 25142-82<sup>5</sup>, а также ISO 468:1982<sup>6</sup>. При этом предполагалось, что сами показатели определялись на основе информации, полученной, как правило, профильными методами, в частности с помощью профилографов. Достоинства и недостатки этих методов рассмотрены в работах [4, 5].

Очевидно, что применение профилографов в классическом варианте для получения информации о микрогеометрии исследуемой поверхности [6–9] не позволяет использовать

эту информацию для вычисления параметров структуры поверхности<sup>7</sup> [10–13].

На практике для получения трехмерных изображений в технических системах, в частности в робототехнике, широкое распространение получили системы стереозрения [14]. Однако применение этих средств для получения 3D-изображений исследуемого микро рельефа прецизионных поверхностей, имеющих шероховатость меньше 0,15 мкм, не представляется возможным ввиду ограниченной разрешающей способности оптических систем, накладываемой на них дифракционным эффектом. Согласно ГОСТ 25502-82<sup>8</sup> и литературным данным [15], разрешающая способность объектива микроскопа зависит от значений нумерической (числовой) апертуры (A) объектива и конденсора и длины волны источника света ( $\lambda$ ). Для пучка лучей, параллельных оптической оси микроскопа, разрешающую способность объектива микроскопа определяют по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{A}.$$

<sup>4</sup> ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975 (с изм. 2018). М.: Стандартиформ, 2018.

<sup>5</sup> ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введ. 18.02.1982. (с изм. 2018). М.: Стандартиформ, 2018.

<sup>6</sup> ISO 468:1982. Шероховатость поверхности. Параметры, их значения и общие правила установления технических требований. Введ. 01.08.1982. (отм. 01.04.1998). М.: Рос. ин-т стандартизации.

<sup>7</sup> Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 24530. Алгоритм моделирования структуры трехмерной поверхности деталей машин из неоднородных конструкционных материалов с учетом доли объемных несплошностей / И.Н. Бобровский. Заявл. 25.05.2020; опублик. 01.06.2020.

<sup>8</sup> ГОСТ 25502-82. Объективы. Метод определения фотографической разрешающей способности. Введ. 10.11.1982. М.: Гос. комитет по стандартам СССР, 1982.

Для наклонных лучей разрешающая способность в 2 раза выше:

$$d = \frac{\lambda}{2A},$$

где  $\lambda$  – длина волны, нм;  $A$  – числовая апертура объектива.

Длина волны лучей источника света в видимой части спектра может меняться от 0,4 мкм (400 нм) для фиолетовых лучей до 0,7 мкм (700 нм) для красных. При освещении объекта наклонными лучами разрешающая способность объектива микроскопа в 2 раза выше, чем при освещении прямо падающими лучами. Освещая препарат синими лучами ( $\lambda = 0,47$  мкм), то есть, применяя в осветителе синий светофильтр, можно изучать более тонкие структуры, чем при освещении обычным белым светом. Например: для объектива с  $A = 1,4$  при освещении белым светом ( $\lambda = 0,55$  мкм) диаметр наименьшей видимой частицы при прямо падающем свете равен 0,39 мкм, при косом освещении – 0,20 мкм, а при освещении синим светом – 0,34 и 0,17 мкм, соответственно. Максимальное разрешение, которое можно получить при использовании светового микроскопа, 0,20–0,35 мкм. Увеличить разрешающую способность можно при использовании ультрафиолетового света (длина волны 0,26–0,28 мкм), однако и в этом случае разрешение меньше, чем 0,13–0,14 мкм получить не удастся.

Для получения трехмерных изображений

с высокой разрешающей способностью в настоящее время используются интерферометры и конфокальные микроскопы [16–18], которые позволяют получать разрешение порядка 5 нм. Однако эта аппаратура имеет значительные габариты, относительную сложность в эксплуатации, и ее использование возможно только в лабораторных условиях. Кроме того, разработка и использование программного обеспечения для получения трехмерных изображений с помощью этой аппаратуры требует привлечения специалистов высокой квалификации.

В связи с этим целью исследования является получение трехмерных изображений исследуемого микрорельефа с помощью более простых и доступных средств получения информации о структуре поверхности, а именно – с помощью профилографа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения 3D-модели изображений исследуемого микрорельефа прецизионных поверхностей используется профилограмма поверхности, полученная стандартными ГОСТовскими методами. Вид такой профилограммы приведен на рис. 1.

На этой профилограмме значения полученных высотных параметров в микрометрах ставятся в соответствие значений яркостного сигнала, показанные слева на рис. 1. Эти значения яркостного сигнала в относительных безразмерных единицах будут соответствовать стандартным видеосигналам, используемым в мониторах персональных компьютеров.

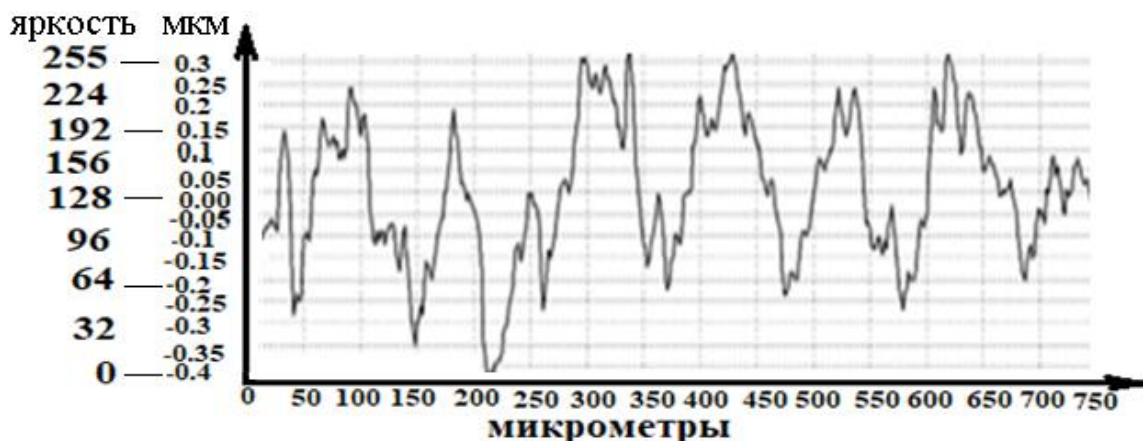


Рис. 1. Вид профилограммы  
 Fig. 1. Profilogram image

Далее эти цифровые значения сигнала, расположенные вдоль оси профилограммы «микрометры» вводятся в компьютер в виде одномерного массива. При этом количество элементов этого массива будет определять размер формируемого изображения в пикселях по оси X. Этот одномерный массив рассматривается как одна случайная реализация видеосигнала вдоль горизонтальной оси X, как бы полученного с видеокамеры, а его повторение вдоль оси Y позволит сформировать 3D-модель исследуемой поверхности. Затем с использованием программных средств библиотеки OpenCV [19] строится трехмерное изображение исследуемого микрорельефа, то есть сигнал яркости и будет отображать высотный параметр микрорельефа. Для этого в компьютер вводится какое-либо полутоновое изображение в формате BMP. При этом размер одномерного массива должен соответствовать размеру изображения по оси X. В общем случае размер изображения по оси Y может задаваться пользователем произвольно. В данном конкретном случае было использовано изображение участка исследуемой поверхности с размерами 3×2,5 мм, а формат изображения этого участка составлял 320×240 пикселей. Отметим также, что для этого микрорельефа, полученного шлифованием, и была сделана профилограмма, приведенная на рис. 1. Изображение этого микрорельефа приведено на рис. 2, а характерный график видеосигна-

ла для этого изображения приведен на рис. 3. Графики видеосигналов анализируются в специальном программном обеспечении, которое позволяет определять параметры микронеровностей поверхности по формулам, приведенным в работах [9–11].

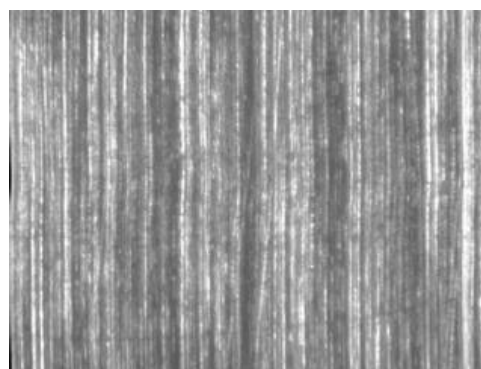


Рис. 2. Изображение микрорельефа исследуемого участка поверхности  
Fig. 2. Microrelief image of the investigated surface area

Для программного построения трехмерного изображения этого же микрорельефа высотные значения с профилограммы были использованы последовательно 4 раза для формирования одномерного массива. Результат такого построения – 3D-модель исследуемой поверхности микрорельефа, когда каждая строка изображения строится по исходной профилограмме (рис. 4), а вид полученного видеосигнала с этого изображения приведен на рис. 5.

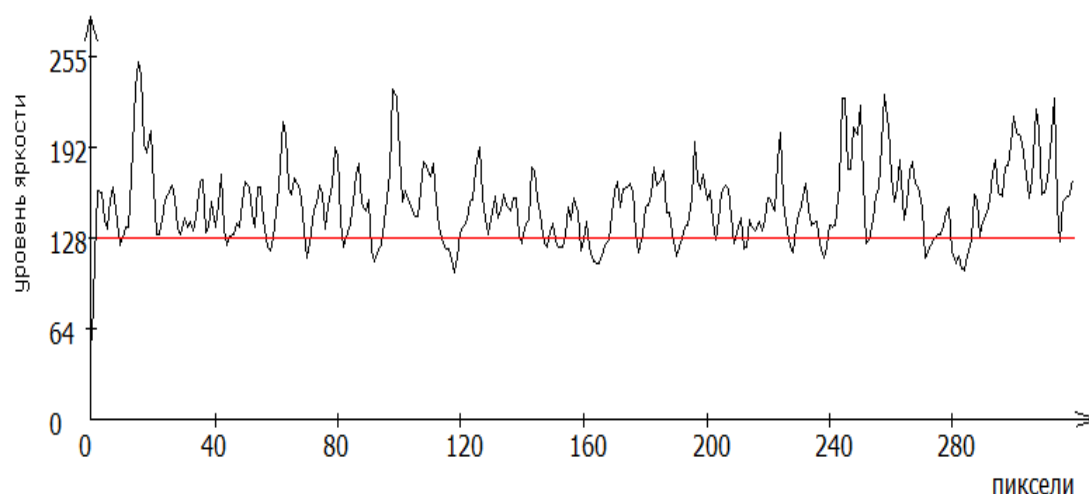
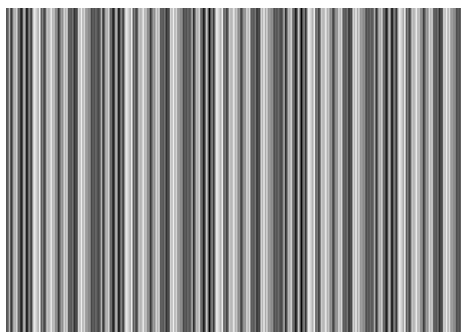
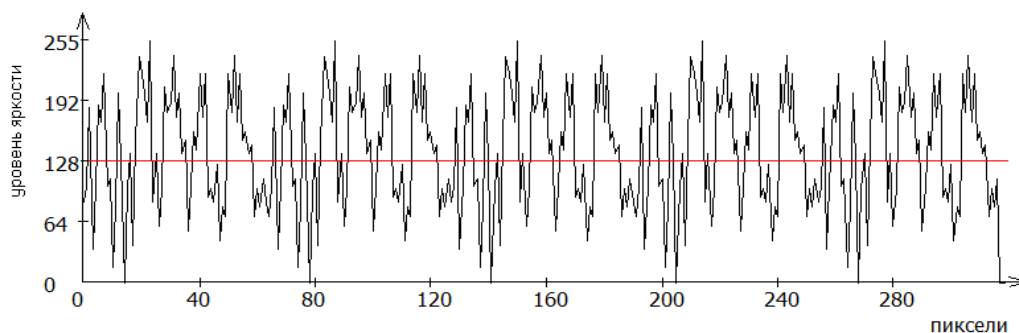


Рис. 3. Вид видеосигнала для изображения исследуемого микрорельефа  
Fig. 3. Type of the video signal for the studied microrelief image



**Рис. 4. Изображение построенного по профилограмме микрорельефа**  
**Fig. 4. The microrelief image constructed according to the profilogram**



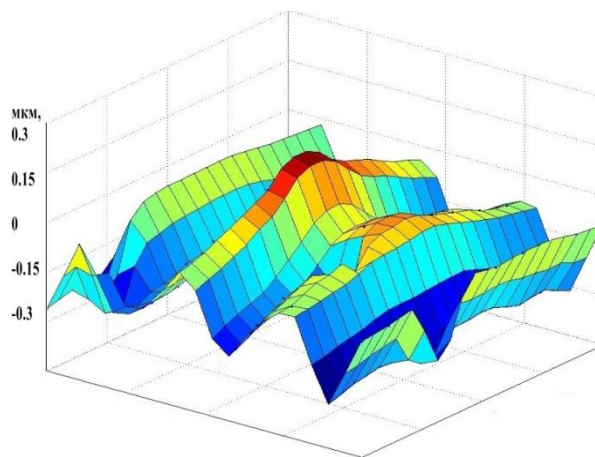
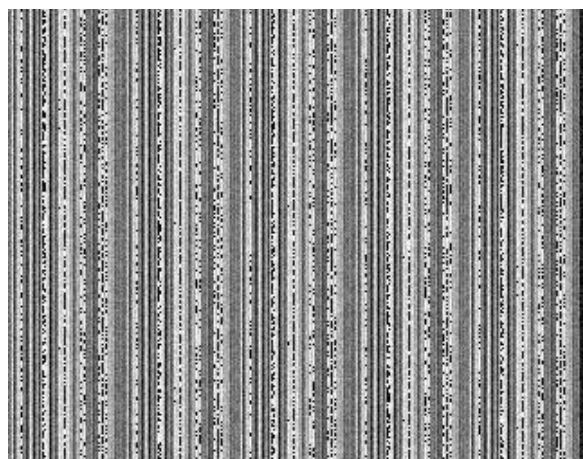
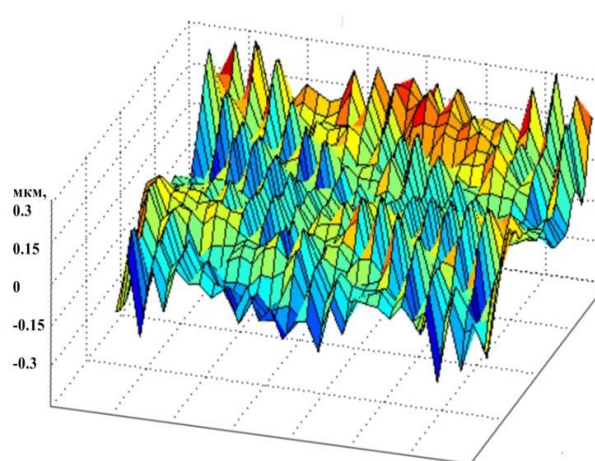
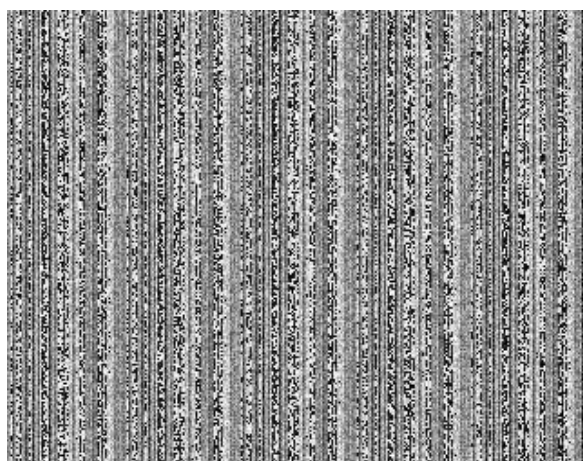
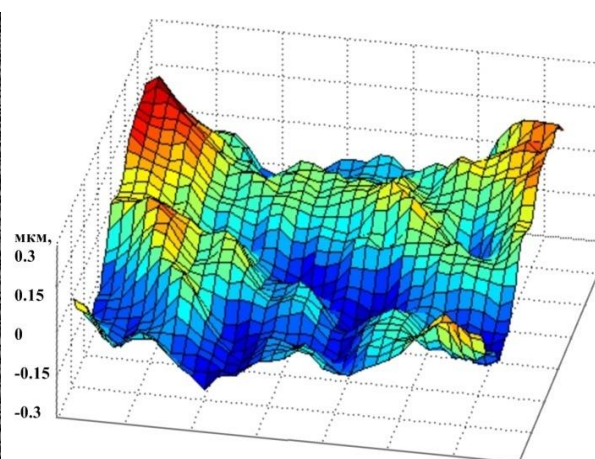
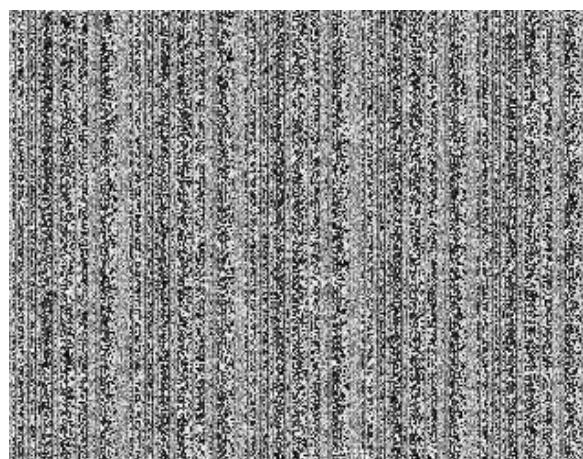
**Рис. 5. Вид видеосигнала для изображения 3D-модели микрорельефа**  
**Fig. 5. Type of the video signal for the 3D microrelief model image**

Как видно из рис. 5, характер видеосигнала в точности повторяет рисунок профилограммы, что дает полное основание утверждать, что 3D-модель исследуемой поверхности, полученная в результате программного метода, вполне адекватна реальному микрорельефу исследуемой поверхности, а полученная 3D-модель микрорельефа может быть использована для вычисления его характеристик в соответствии с новым ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014<sup>9</sup>. Следует также отметить, что использование обычного изображения исследуемого микрорельефа, приведенного на рис. 1, не может служить источником достоверной информации для непосредственного вычисления структурных характеристик исследуемого микрорельефа. Отмеченное обстоятельство вытекает из сильных отличий видеосигнала, приведенного на рис. 2, и профилограммы, что также подтверждает ранее сделанные выводы о применимости обычной микроскопии для вычисления струк-

турных параметров микрорельефа.

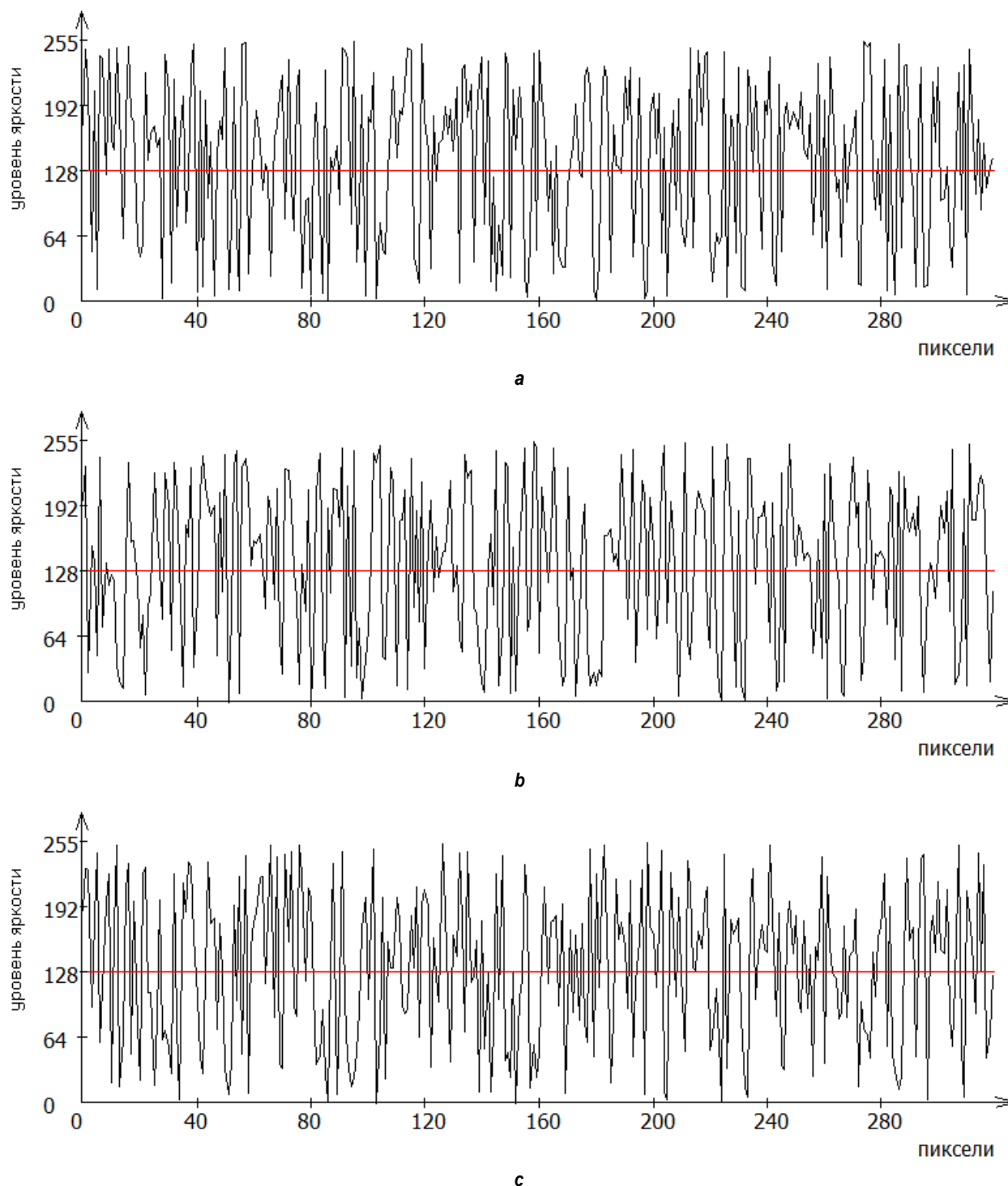
Однако полученное изображение 3D-модели исследуемой поверхности не вполне адекватно отражает настоящий микрорельеф этой поверхности, так как каждая последующая строка данного изображения полностью повторяет предыдущую, построенную по исходной профилограмме. Для того, чтобы устранить отмеченный недостаток, при построении изображения нам необходимо бы было иметь набор профилограмм, последовательно полученных с исследуемого микрорельефа по координате Y. Например, для построения изображения формата 100×100 пикселей потребовалось бы получить 100 профилограмм, последовательно снятых по координате Y с анализируемого участка поверхности с шагом в один мм/пиксель. Естественно, что выполнить такие измерения на существующих в настоящее время профилографах/профилометрах не представляется возможным.

<sup>9</sup> ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Введ. 01.01.2016. М.: Стандартинформ, 2015.

**a****b****c**

**Рис. 6. Изображения программно сформированных 3D-изображений исследуемой поверхности с разной степенью зашумления генератора псевдослучайных чисел: a – rand() % 50; b – rand() % 100; c – rand() % 150**

**Fig. 6. Images of software generated 3D images of the studied surface with varying noise degrees of the pseudorandom number generator: a – rand() % 50; b – rand() %100; c – rand() % 150**



**Рис. 7. Графики видеосигналов с соответствующими 3D-моделями структуры для разных строк зашумленного изображения: а – для строки № 50; б – для строки № 100; с – для строки № 150**

**Fig. 7. Graphs of video signals with corresponding 3D models of the structure for different lines of the noisy image: a – for the line no. 50; b – for the line no. 100; C – for the line no. 150**

В связи с этим в данной работе был предложен подход к построению 3D-модели исследуемой поверхности, заключающийся в

использовании генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ)<sup>10</sup> [20] для зашумления каждой последующей строки строящегося изображе-

<sup>10</sup>Шилдт Г. Полный справочник по C++. 4-е изд. / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 800 с.

ния. Такой генератор реализован в языке программирования C++. Следует также отметить, что этот язык используется и для составления программ средствами OpenCV. Фрагмент программы при использовании ГПСЧ для зашумления строк изображения приведен ниже.

```
//ВЫПОЛНЯЕМ РАНДОМИЗАЦИЮ ГПСЧ
srand(rand_value);
//ФОРМИРУЕМ ЗАШУМЛЕННЫЙ МИКРО-
РЕЛЬЕФ
for( int i = 0; i <img.rows; i++ )
//for( int i = 0; i <img.rows; i=i+4 )
for( int j = 0; j <img.cols; j++ )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+2 )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+3 )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+4 )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+6 )
{
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
20;
img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
50;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
75;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
100;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
150;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
200;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
250;
img.at<Vec3b>(i,j)[1] = img.at<Vec3b>(i,j)[0];
img.at<Vec3b>(i,j)[2] = img.at<Vec3b>(i,j)[0];
}
//ПОКАЗЫВАЕМ СОЗДАННЫЙ МИКРО-
```

## РЕЛЬЕФ

```
imshow("СФОРМ.РЕЛЬЕФ_2", img );
//ЗАПОМИНАЕМ СОЗДАННЫЙ МИКРО-
РЕЛЬЕФ
imwrite("СФОРМИРОВАННОЕ ЗАШУМ-
ЛЕННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ.bmp", img );
```

В данной программе предусмотрены разные проценты зашумления строк изображения.

Результаты программного формирования 3D-изображений исследуемой поверхности с разной степенью зашумления строк изображения генератором ГПСЧ приведены на рис. 6, а графики видеосигналов для разных строк зашумленного изображения при состоянии ГПСЧ + rand() % приведены на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из приведенных рисунков, видеосигналы для разных строк существенно отличаются друг от друга, что более реально отражает структуру реального микрорельефа. Таким образом, рассмотренный программный метод построения изображений позволяет получить 3D-модель структуры исследуемой поверхности для дальнейшей обработки данных сигналов опико-электронным методом, не прибегая к использованию сложной и дорогостоящей аппаратуры [4, 5]. Кроме того, предложенный метод позволяет прогнозировать качество выполнения технологической операции через определение процента зашумления изображения, то есть оценивать влияние случайной компоненты, полученной в процессе обработки.

## Список источников

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
2. Клевцов Г.В., Фролова О.А., Клевцова Н.А. Влияние поверхностной обработки на микрорельеф и структурные изменения материала в поверхностных слоях // Фундаментальные исследования. 2005. № 4. С. 71.
3. Приходько В.М., Медеяев И.А., Фатюхин Д.С. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография. М.: МАДИ, 2015. 264 с.
4. Абрамов А.Д., Носов Н.В. Оценка параметров микрорельефа поверхностей деталей машин на основе квази-оптимальных корреляционных алгоритмов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 9. С. 19–25.
5. Abramov A.D., Grishin R.G., Nosov N.V. Electrooptic estimation of texture parameters of precision surfaces // Journal of Physics: Conference Series. The IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology. 2018. Vol. 1096. С. 168–175. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012021>.
6. Носов Н.В., Михайлова Л.Н. Исследование шероховатости поверхностей конических роликовых подшипников //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-2. С. 232–237.

7. Зибров П.Ф., Бобровский И.Н., Бобровский Н.М. Исследование профиля шероховатого слоя, микронеровности которого ограничены сложной кривой, состоящей из вогнутых и выпуклых полуокружностей в двумерном пространстве // СТН. 2020. № 6. С. 27–30.

8. Bobrovskij I., Khaimovich A., Bobrovskij N., D'yakonov A. Determination of wide burnishing energy-force parameters based on constructing the kinematically admissible velocity field // Metals. 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 46. <https://doi.org/10.3390/met10010046>.

9. Носов Н.В., Костин Н.А., Ладыгин Р.В. Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 24–31. <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-24-31>.

10. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Анализ и корреляционный метод устранения погрешности оптико-электронного определения микрорельефных параметров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 3–9.

11. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Костин Н.А. Анализ структурных параметров профилограммы поверхности в оптико-электронных системах // Высокие технологии в машиностроении: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Самара, 10–11 ноября 2022 г.). Самара: СамГТУ, 2022. С. 3–5.

12. Иванкин В.Ю., Пепеляева Т.Ф. Методика конструирования поверхности по заданным параметрам шероховатости // Перспективы науки. 2014. № 3. С. 73–75.

13. Носов Н.В., Якубович Е.А. Исследование качества поверхности профиля пера лопаток компрессора после алмазного виброконтантного полирования // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 26. С. 27–31. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2021-26-27-31>.

14. Смирнов А.В., Беззубцев А.Ю. Обход препятствий техническими средствами с использованием стереозрения // Программные системы: теория и приложения. 2016. Т. 7. № 4. С. 331–346.

15. Миланич А.И., Баранов А.А. Предельное разрешение в оптике // Труды Московского физико-технического института. 2012. Т. 4. № 2. С. 177–181.

16. Азарова В.В., Чертович И.В., Цветкова Т.В. Интерферометрический метод контроля прецизионных поверхностей и лазерных зеркал // Тр. 1-й Всерос. школы-семинара (г. Москва, 1–3 декабря 2010 г.). М.: МИЭМ, 2010. С. 209–214.

17. Пат. № 2441291, Российская Федерация, G02B21/00. Монохромный микроскоп сверхвысокого разрешения / А.И. Миланич; заявитель и правообладатель А.И. Миланич. Заявл. 20.05.2010; опубл. 27.01.2012.

18. Либенсон. М.Н. Преодоление дифракционного предела в оптике // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 3. С. 99–104.

19. Кэлдер А., Брэдки Г. Изучаем OpenCV 3. Разработка программ компьютерного зрения на C++ с применением библиотеки OpenCV / пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2017. 826 с.

20. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Оптико-электронные системы и методы измерительной оценки параметров микрорельефа: монография. Самара: Изд-во СамГТУ, 2012. 207 с.

## References

1. Suslov A.G. *The quality of machine part surface layer*. Moscow: Mashinostroenie; 2000, 320 p. (In Russ.).
2. Klevtsov G.V., Frolova O.A., Klevtsova N.A. The effect of surface treatment on the material microrelief and structural changes in the surface layer. *Fundamental'niye issledovaniya = Fundamental research*. 2005;4:71-73. (In Russ.).
3. Prihod'ko V.M., Medelyaev I.A., Fatyuhin D.S. *Formation of machine part operational properties by ultrasonic methods: monograph*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; 2015, 264 p. (In Russ.).
4. Abramov A.D. Estimation of machine part surface microrelief parameters based on quasi-optimal correlation algorithms. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*. 2016;9:19-25. (In Russ.).
5. Abramov A.D., Grishin R.G., Nosov N.V. Electrooptic estimation of texture parameters of precision surfaces. *Journal of Physics: Conference Series. The IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. 2018;1096:168-175. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012021>.
6. Nosov N.V., Mikhailova L.N. Research surface roughness of the tapered roller bearing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(4-2):232-237. (In Russ.).
7. Zibrov P.F., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M. Profile study of a rough layer with microroughnesses limited by a complex curve consisting of concave and convex semicircles in a two-dimensional space. *STIN*. 2020;6:27-30. (In Russ.).
8. Bobrovskij I., Khaimovich A., Bobrovskij N., D'yakonov A. Determination of wide burnishing energy-force parameters based on constructing the kinematically admissible velocity field. *Metals*. 2020;10(1):46. <https://doi.org/10.3390/met10010046>.
9. Nosov N.V., Kostin N.A., Ladyagin R.V. Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasi-optimal correlation algorithms. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta = Science Vector of Togliatti State University*. 2021;1:24-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-24-31>.

10. Abramov A.D., Nikonov A.I. Analysis and correlation method for eliminating the errors of opto-electronic determination of microrelief parameters. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*. 2016;1:3-9. (In Russ.).
11. Abramov A.D., Nosov N.V., Kostin N.A. Analysis of surface profilogram structural parameters in optical-electronic systems. In: *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XIX Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = High technologies in mechanical engineering: materials of the 19<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 10–11 November 2022, Samara: Samara Polytech Flagship University; 2022, p. 3-5. (In Russ.).
12. Ivankin V.Yu., Pepelyaeva T.F. Surface design technique based on specified roughness parameters. *Perspektivy nauki = Science Prospects*. 2014;3:73-75. (In Russ.).
13. Nosov N.V., Yakubovich E.A. Research of the surface quality of the compressor blades feather after diamond vibro-contact polishing. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2021;26:27-31. (In Russ.).
14. Smirnov A.V., Bezzubcev A.Yu. Bypass obstacles mobile technical unit using stereo vision. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Program systems: Theory and applications*. 2016;7(4):331-346. (In Russ.).
15. Milanich A.I., Baranov A.A. Limit resolution in optics. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*. 2012;4(2):177-181. (In Russ.).
16. Azarova V.V., Chertovich I.V., Cvetkova T.V. Interferometric monitoring method for precision surfaces and laser mirrors. In: *Trudy I Vserossijskoj shkoly-seminara*. 1–3 December 2010, Moscow. Moscow: HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; 2010, p. 209-214. (In Russ.).
17. Milanich A.I. *Monochrome microscope of ultra-high resolution*. Patent RF, no. 2441291; 2012. (In Russ.).
18. Libenson M.N. Overcoming diffraction limit in optics. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal = Soros Educational Journal*. 2000;6(3):99-104. (In Russ.).
19. Keler A., Bredski G. Izuchaem OpenCV 3. Learning OpenCV 3 Computer Vision in C++ with the OpenCV Library, 2017, 826 p. (Russ. ed.: *Razrabotka programm komp'yuternogo zreniya na C++ s primeneniem biblioteki OpenCV*. Moscow, DMK Press; 2017, 826 p.)
20. Abramov A.D., Nikonov A.I. *Optoelectronic systems and estimation methods of microrelief parameters*. Samara: Samara Polytech Flagship University; 2012, 207 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Абрамов Алексей Дмитриевич,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Электронные системы и  
информационная безопасность»,  
Самарский государственный технический  
университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
✉ esib@samgtu.ru

**Носов Николай Васильевич,**

д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология  
машиностроения, станки и инструменты»,  
Самарский государственный технический  
университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
nosov.nv@samgtu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>

**Ладягин Роман Владимирович,**

старший преподаватель кафедры «Технология  
машиностроения, станки и инструменты»,  
Самарский государственный технический  
университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
konferencia-isap@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksey D. Abramov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electronic  
Systems and  
Information Security,  
Samara Polytech Flagship University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
✉ esib@samgtu.ru

**Nikolay V. Nosov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Engineering Technology,  
Machines and Tools,  
Samara Polytech Flagship University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
nosov.nv@samgtu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>

**Roman V. Ladyagin,**

Senior Lecturer of the Department of Engineering  
Technology,  
Machines and Tools,  
Samara Polytech Flagship University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
konferencia-isap@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 13.04.2023; принята к публикации 26.05.2023.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to the preparation of the article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 14.03.2023; approved after reviewing 13.04.2023; accepted for publication 26.05.2023.