

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения  
(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Разработка системы бесконтактного контроля шероховатости  
наружных поверхностей деталей типа вал»

Студент	<u>И.Н. Кутыржин</u> (И.О. Фамилия)	_____	_____
Научный руководитель	<u>к.т.н., доцент, А.А. Козлов</u> (ученая степень, звание, И.О. Фамилия)	_____	_____

Тольятти 2020

## Содержание

Введение.....	3
1 Анализ характеристик шероховатости поверхностей.....	6
2 Анализ методов измерения шероховатости поверхностей.....	9
3 Разработка математических моделей функционирования системы контроля.....	23
3.1 Восстановление изображений.....	23
3.2 Бинарная сегментация изображений.....	46
3.3 Текстуальный анализ изображений.....	56
4 Разработка алгоритмов функционирования и аппаратной части системы контроля.....	60
4.1 Разработка алгоритмов функционирования системы контроля.....	60
4.2 Разработка аппаратной части системы контроля.....	66
Заключение.....	69
Список используемых источников.....	71

## Введение

Одним из ключевых вопросов в обеспечении конкурентоспособности выпускаемой машиностроением продукции является повышение ее эксплуатационных характеристик. Данный вопрос достаточно сложный с технической точки зрения и для его успешного решения необходимо повышать точность, надёжность и долговечности деталей, входящих в узлы и механизмы. Один из путей решений заключается в обеспечении оптимальных характеристик сопрягаемых поверхностей. К таким характеристикам относят геометрические свойства, размеры и расположение микронеровностей сопрягаемых поверхностей. Данные параметры обеспечиваются исключительно в ходе технологического процесса изготовления детали.

Перечисленные выше характеристики сопрягаемых поверхностей нормируются ее шероховатостью, которая в конечном итоге определяет эксплуатационные характеристики деталей и их сопряжений. К ним относят сопротивление усталостному разрушению от поверхностных напряжений, стойкость к поверхностному износу при эксплуатации, устойчивость к коррозии, жесткость сопряжения, обеспечение оптимальных условий сопряжения деталей исходя из его назначения и условий эксплуатации, герметичность сопряжения и ряд других [12].

Формирование шероховатости поверхностей обеспечивается на операциях механической обработки. В случае возникновения незначительных отклонений и наличия в технологическом процессе последующих операций механической обработки, возникшие отклонения можно исправить. Если шероховатость превышает заданную конструктором после финишной операции механической обработки, то очень важно провести отбраковку данной детали с целью недопущения ее на сборочные операции. Детали, не отвечающие конструкторским требованиям, могут привести к значительному снижению срока службы узла в целом или выходу

его из строя, что может привести созданию аварийных ситуаций. В связи с этим необходимо предусматривать контрольные операции после механической обработки.

Для проведения операций по контролю характеристик шероховатости поверхностей необходимы соответствующие средства контроля, а также методики проведения измерений и анализа полученной информации.

В настоящее время широко применяются методы измерения, основанные на построении профилограммы контролируемой поверхности [16]. Для их реализации применяются различные технические средства. Наибольшее распространение получили контактные и оптические профилографы. Однако, данные технические средства имеют относительно низкое быстродействие и зачастую требуют создания специальных производственных условий, поэтому в условиях серийного производства их применяют чаще всего для выборочного контроля. Такой подход не всегда дает удовлетворительные результаты, так как в реальных условиях влияние быстроменяющихся внешних факторов производственной системы, таких как износ режущего инструмента, колебания припуска под обработку, изменение твердости заготовки приводит к значительному рассеиванию шероховатость поверхности.

В производственных условиях для решения этой проблемы используется метод визуального контроля путем сравнения с эталоном [16]. Основным его недостатком является субъективность контроля, что может привести к пропуску бракованных деталей. Данный метод подразумевает использование достаточно дорогих эталонов шероховатостей поверхностей, которые производятся для различных типов поверхностей и методов обработки. В случае смены материала требуется замена эталонов, что также приводит к увеличению стоимости контроля.

Наиболее актуальным в производственных условиях является контроль шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал. Доля таких деталей в общем объеме производства достаточно велика и разработка

системы для контроля ориентированной на данный тип деталей позволит существенно сократить затраты на проведение контрольных операций, а также снизит количество ошибок при контроле.

На основе вышесказанного цель данной работы заключается в том, чтобы повысить качество и быстродействие контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал на основе анализа известных средств и методик, используемых для измерения шероховатости, а также теории цифровой обработки изображений путем разработки системы бесконтактного контроля.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ методов, средств и алгоритмов контроля шероховатостей поверхностей используемых на современных предприятиях машиностроительного профиля;
- разработать математические модели функционирования системы контроля;
- разработать алгоритмы функционирования;
- разработать аппаратную часть системы контроля.

## 1 Анализ характеристик шероховатости поверхностей

Для характеристики микронеровностей поверхностей применяется понятие шероховатости.

Шероховатость поверхности - это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности определяется по ее профилю, который представляет собой ломаную линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей [9].

Оценка шероховатости поверхности производится путем определения соответствующих параметров микрорельефа контролируемой поверхности в сечении, направление которого направлено нормально относительно контролируемой поверхности [9]. Пример такого сечения представлен на рисунке 1.

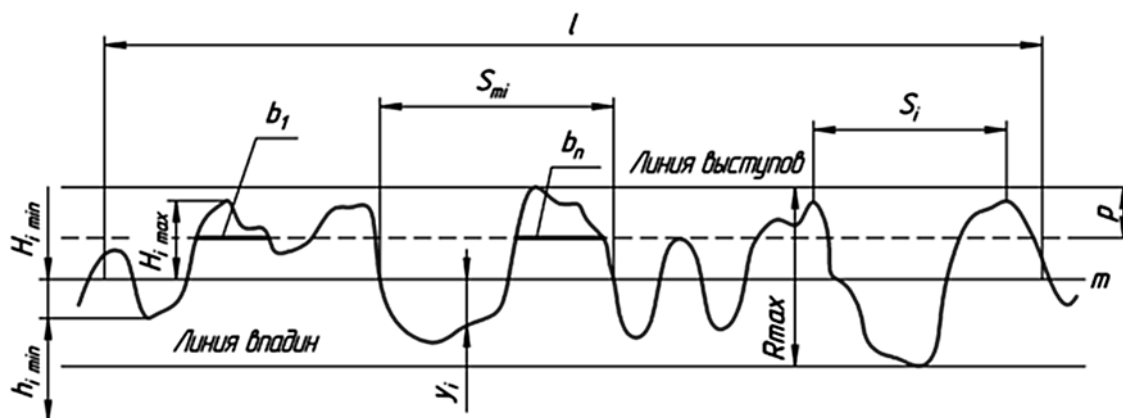


Рисунок 1 – Параметры шероховатости поверхности в нормальном профиле

«Для получения количественных характеристик профиля в данном сечении проводится средняя линия  $m$ , которая представляет собой линию относительно которой точки профиля, расположенные выше и ниже, имеют минимальную сумму квадратов отклонений» [9]. Еще одной важной характеристикой профиля являются линии выступов и впадин. «Они

представляют собой линии параллельные средней линии и проходящие через высшую и низшую точки профиля соответственно» [9]. Все измерения проводятся на базовой длине  $l$ .

«Все контролируемые параметры можно разделить на две большие группы – это шаговые параметры и высотные параметры.

К шаговым параметрам относят:  $S_{mi}$  – средний шаг неровностей профиля;  $S_i$  – средний шаг местных выступов профиля;  $t_p$  – относительная опорная длина профиля, которая определяется из уравнения (1).

$$t_p = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_n \quad (1)$$

где:  $b_n$  – длина отрезков, отсекаемых на уровне сечения профиля, мм;

$n$  – количество отрезков, отсекаемых на уровне сечения профиля.»

[9].

Уровень сечения профиля принимается из стандартного ряда.

К высотным параметрам относят: « $H_{imax}$  – отклонение пяти наибольших максимумов профиля;  $H_{imin}$  – отклонение пяти наибольших минимумов профиля;  $h_{imax}$  – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль;  $h_{imin}$  – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль;  $R_{max}$  – наибольшая высота профиля;  $y_i$  – отклонения профиля от средней линии;  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля на базовой длине, определяется по формуле (2);  $Rq$  – среднеквадратическое отклонение профиля на базовой длине, определяется по формуле (3);  $Rz$  – сумма абсолютных значений высоты неровностей на базовой длине пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов» [9], определяется по формуле (4).

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \approx \frac{\sum_0^n |y_i|}{n} \quad (2)$$

где:  $n$  – количество точек измерения.

$$Rq = \sqrt{\frac{\sum_0^n y_i^2}{n}}. \quad (3)$$

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 |H_{imax}| + \sum_{i=1}^5 |H_{imin}|}{5}. \quad (4)$$

Конструктор, как правило, не задает все перечисленные параметры. Это связано с тем, что контроль всех вышеперечисленных параметров с практической точки зрения избыточен и требует больших затрат времени на его проведение, поэтому конструктор чаще всего для задания характеристик шероховатости поверхности использует параметры  $Ra$  или  $Rz$ , заданные в микрометрах. В связи с этим большинство систем контроля, используемых в производственных условиях, контролируют один или оба из этих параметров.

Проведенный анализ общих характеристик шероховатости показал, что при создании системы контроля необходимо обеспечить контроль параметров  $Ra$  и  $Rz$  как наиболее информативных и получивших наибольшее применение на практике.



## 2 Анализ методов измерения шероховатости поверхностей

Проведем анализ известных методов контроля шероховатости и устройств реализующих их с целью определения наиболее подходящего для создания системы контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал.

Методы контроля шероховатости поверхностей по способу их реализации можно разделить на контактные и бесконтактные. Классификация применяемых методов контроля шероховатостей представлена на рисунке 2 [13].

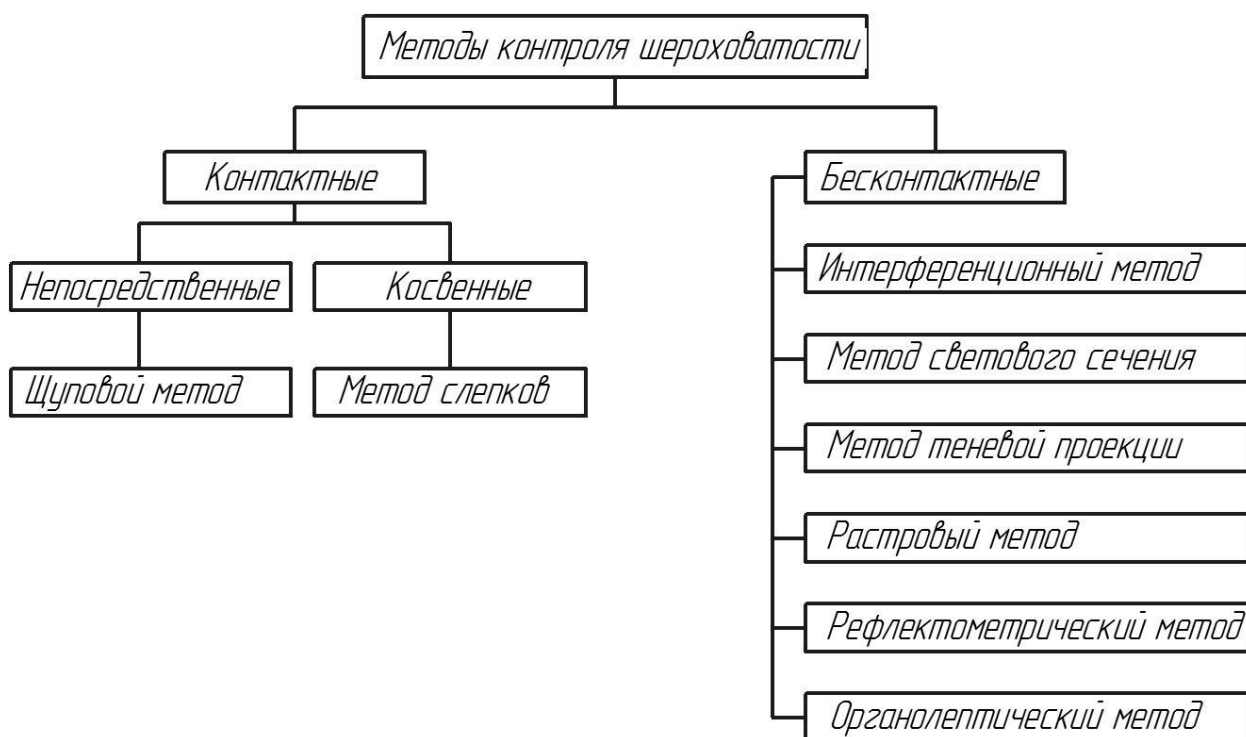
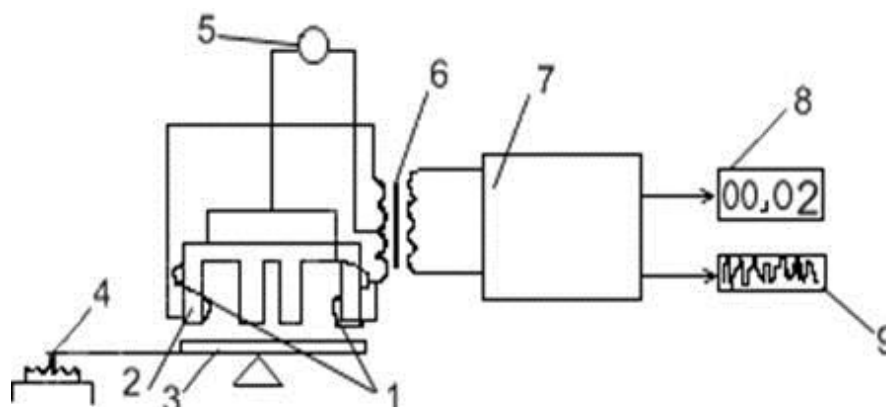


Рисунок 2 – Классификация методов контроля шероховатости поверхностей

Щуповой метод контроля является одним из наиболее распространенных. Это связано с тем, что данный метод позволяет получать количественные значения параметров шероховатости контролируемой поверхности и достаточно просто реализуется. На рисунке 3 показан один из

вариантов реализации данного метода в виде профилографа с индукционным преобразователем [13].



1 – катушки; 2 – сердечник; 3 – коромысло; 4 – игла; 5 – генератор; 6 – входной трансформатор; 7 – электронный блок; 8 – циферблат; 9 – устройство записи информации.

Рисунок 3 – Профилограф с индукционным преобразователем

Данный прибор имеет следующий принцип работы. Игла перемещается по контролируемой поверхности огибая ее профиль. При этом коромысло совершает колебательные движения тем самым изменяя расстояние между якорем и сердечником. В результате изменится напряжение на трансформаторе. Электронный блок трансформирует полученное напряжение в соответствующие значения контура профиля и выдает их на циферблат и устройство записи информации.

Метод слепков является косвенным методом [23]. В данном случае измеряется шероховатость не самой поверхности, а слепка полученного с нее. Слепок выполняется из различных пластичных материалов (воск, пластичные полимеры, глины и так далее). Данный метод удобен для контроля сложнопрофильных, труднодоступных поверхностей, отверстий малого диаметра и других поверхностей доступ щупа к которым затруднен или невозможен.

Рассмотренные контактные методы контроля, кроме неоспоримых преимуществ имеют ряд существенных недостатков:

- в зоне контакта иглы и контролируемой поверхности возникают деформации, что приводит к снижению точности контроля;
- игла имеет определенный радиус закругления и диаметр, это накладывает определенные ограничения на контроль глубоких впадин;
- под действием сил инерции игла может отрываться от контролируемой поверхности;
- возможно отклонение иглы от выбранного направления контроля под действием измерительного усилия;
- при контроле поверхностей с малыми значениями шероховатости возможно повреждение контролируемой поверхности;
- значительные временные затраты, которые не позволяют применять контактные методы в тех случаях когда необходимо получение информации в реальном режиме времени.

Рассмотрим более подробно бесконтактные методы контроля [19].

Интерференционный метод контроля шероховатости поверхностей основан на использовании физического эффекта когерентных пучков света. Суть данного эффекта заключается в том, что свет пропускается через делительную призму. Затем один пучок света направляется на контролируемую поверхность, а другой пучок на опорное зеркало. После отражения соответственно от контролируемой поверхности и зеркала пучки света сходятся, в результате чего происходит их интерференция. По полученной интерференционной картине, пример которой представлен на рисунке 4, судят о шероховатости контролируемой поверхности.

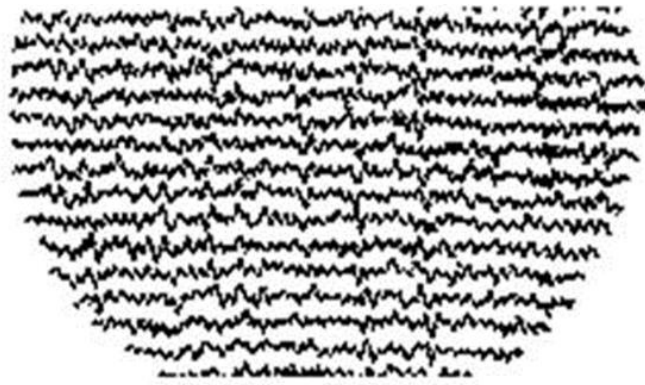
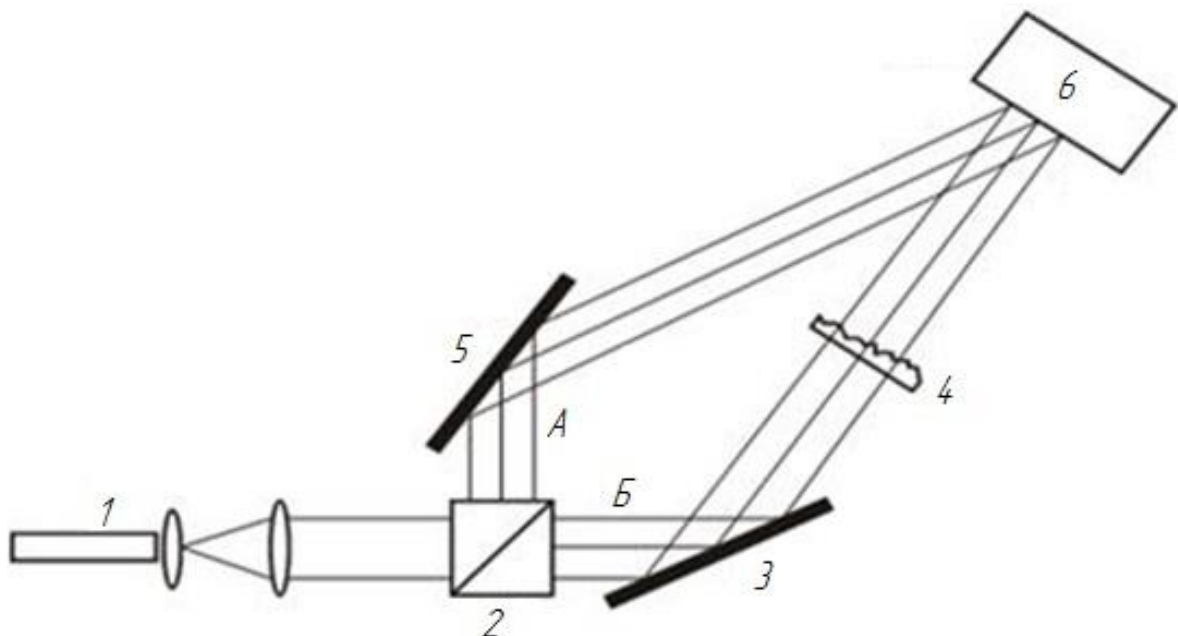


Рисунок 4 – Интерференционная картина контролируемой поверхности

Полученная картина интерференции поверхности нуждается в дальнейшей математической обработке. С развитием компьютерной техники данный этап существенно упростился и стал занимать меньше времени.

На рисунке 5 приведена принципиальная схема одного из вариантов реализации данного метода контроля шероховатости поверхностей в виде оптического профилометра, работающего на основе метода построения спел-интерферограмм.



1 – лазер; 2 – призма; 3 – зеркало; 4 – контролируемая поверхность; 5 – зеркало; 6 – цифровая камера.

Рисунок 5 – Принципиальная схема оптического профилометра

Профилометр работает следующим образом. Луч, создаваемый лазером 1, разбивается на два пучка *A* и *B* делительной призмой 2. Пучок *A* отражается от зеркала 5, а пучок *B* отражается от зеркала 3 и контролируемой поверхности 4. Затем оба пучка попадают на цифровую камеру 6, которая фиксирует полученную интерференционную картину и передает для дальнейшей обработки.

Пример оптического профилометра, работающего на основе данной схемы, представлен на рисунке 6.

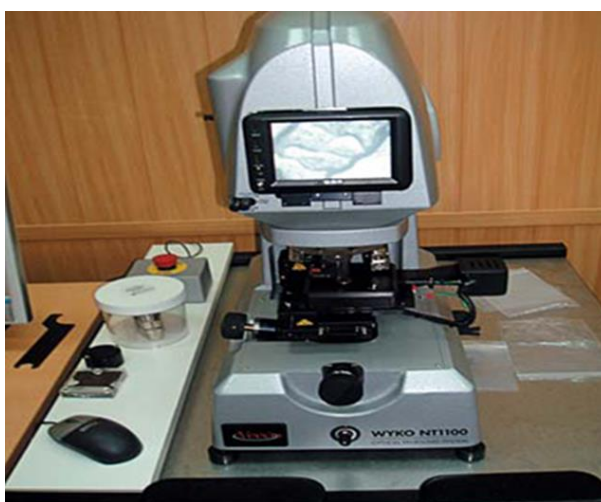


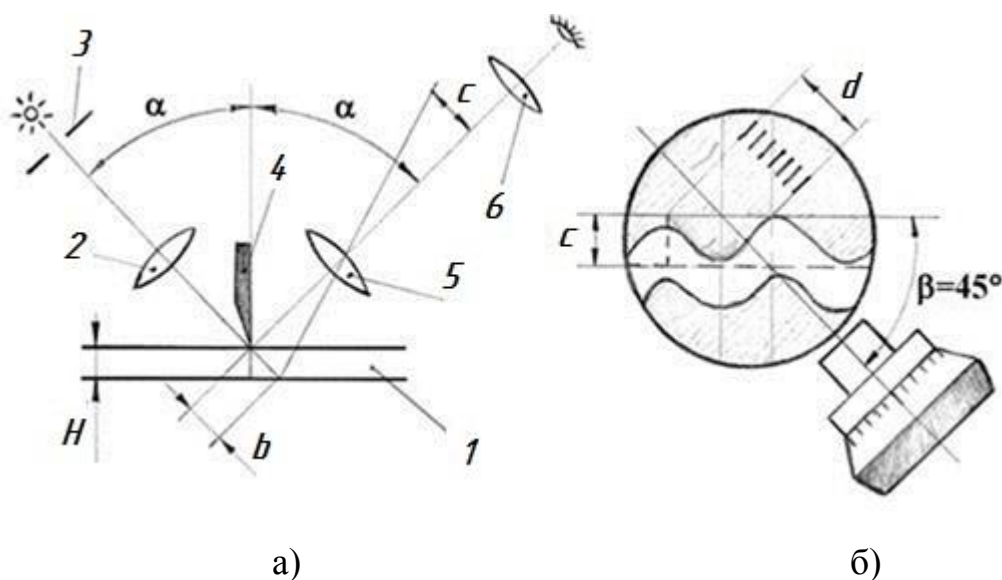
Рисунок 6 – Оптический профилометр

Недостатками данного метода являются:

- большие габариты оборудования;
- высокая стоимость аппаратного и программного обеспечения;
- длительность процесса измерения и обработки полученной информации;
- повышенная чувствительность оборудования, входящего в измерительный комплекс, к воздействию вибраций.

Исходя из перечисленных недостатков, можно сделать вывод о том, что интерференционный метод наиболее применим для использования в лабораторных условиях и малоэффективен в производственных условиях, так как не обеспечивает требуемой мобильности и оперативности контроля.

Далее рассмотрим метод светового сечения. Принципиальная схема метода светового сечения представлена на рисунке 7. Сущность данного метода заключается в следующем (рис. 7а). Световой луч попадает на контролируемую поверхность 1, пройдя через отверстие 3 диаметром 0,1 мм и линзу 2, которая расположена под углом  $\alpha$  относительно нормали к поверхности 1. После отражения от контролируемой поверхности луч попадает в окуляр 6, пройдя через линзу 5, которая также расположена под углом  $\alpha$  относительно нормали к поверхности 1. Любое углубление будет наблюдаться в окуляре как искривленная светящаяся линия (рис. 7б). Если поверхность идеально ровная, то линия в окуляре будет прямой.



1 – контролируемая поверхность; 2 – линза; 3 – отверстие; 4 – линейка;  
5 – линза; 6 – окуляр.

Рисунок 7 – Принципиальная схема метода светового сечения

Глубина канавки  $H$  определяется по ее ширине светового сечения  $b$ , размер которого в плоскости объектива определяется увеличением объектива, углом  $\alpha$  и равен величине  $c$ . Угол установки объектива  $\beta$  равен  $45^\circ$ , поэтому в объективе оценивается величина  $d$ .

Пример прибора, работающего на основе данного метода, представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Микроскоп светового сечения

К недостаткам метода теневого сечения можно отнести:

- ограниченный диапазон измерений (от 0,8 до 63 мкм);
- длительность процесса измерения и обработки информации;
- невозможность применения для контроля труднодоступных и участков с малым радиусом;
- в ряде случаев высокая погрешность измерений (до 7,5%);
- контроль небольшого участка, отсутствие оценки всей поверхности в целом.

Метод теневой проекции является дальнейшим развитием метода светового сечения. Отличие схемы данного метода контроля шероховатости поверхности заключается в том, что на расстоянии около 0,1 мм от контролируемой поверхности устанавливается линейка 4 (рис. 7а), имеющая скошенную грань. При прохождении луча часть его отсекается данной линейкой и на контролируемую поверхность попадет тень от линейки. Ее верхний край отразит профиль контролируемой поверхности, который попадет в объектив.

На рисунке 9 представлен прибор, реализующий данный метод

контроля шероховатости поверхностей.



Рисунки 9 – Микроскоп теневого сечения

При использовании метода теневого сечения к недостаткам метода светового сечения добавляется недостаток, связанный с возможностью контроля только грубо обработанных поверхностей с параметрами шероховатости  $R_z$  от 80 до 320 мкм.

Исходя из перечисленных недостатков методов светового и теневого сечения, можно сделать вывод о том, что данные методы применимы в основном в лабораторных условиях и для проведения оперативного контроля непосредственно на производстве малопригодны.

Суть растрового метода заключается в получении муаровых полос. Для этого на контролируемую поверхность накладывается прозрачная пластинка, на которую нанесена растровая сетка, представляющая собой повторяющиеся штрихи с малым шагом. При направлении на пластину луча наблюдается наложение отраженной сетки и исходной сетки, что приводит к появлению муаровых полос (рисунки 10). Шероховатость контролируемой поверхности



вызовет искривление данных полос, которое пропорционально высоте контролируемых неровности. Шаг полос  $T$  определяется углом наклона штрихов раstra  $\theta$  и его шагом  $d$ .

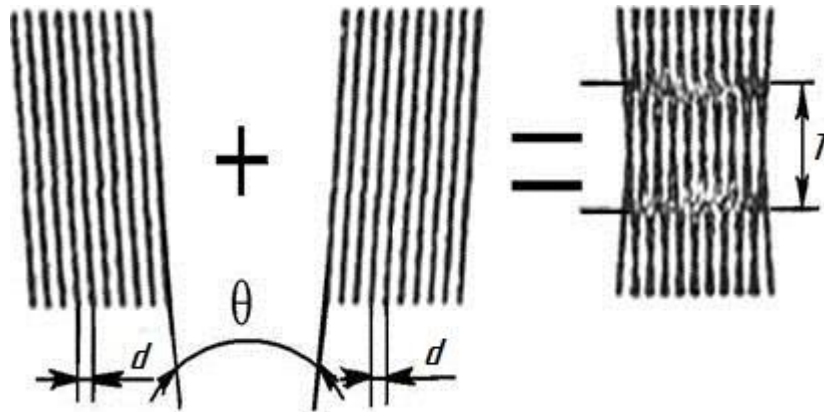


Рисунок 10 – Схема получения муаровых полос

На рисунке 11 представлен микроскоп, реализующий растровый метод контроля шероховатости поверхностей. Данный микроскоп позволяет производить контроль шероховатости в диапазоне от 0,4 до 40 мкм для наружных поверхностей, при этом микронеровности должны иметь ориентацию в одном преимущественном направлении.



Рисунок 11 – Микроскоп объективный растровый измерительный

Основные недостатки данного метода измерения:

- сложность процесса измерения из-за необходимости предварительной настройки;
- длительность процесса измерения и обработки информации;
- высокая погрешность измерений (до 16%);
- контроль небольшого участка, отсутствие оценки всей поверхности в целом.

Рассмотренный метод имеет существенные недостатки не позволяющие применять его в условиях производственного участка с целью проведения оперативного контроля.

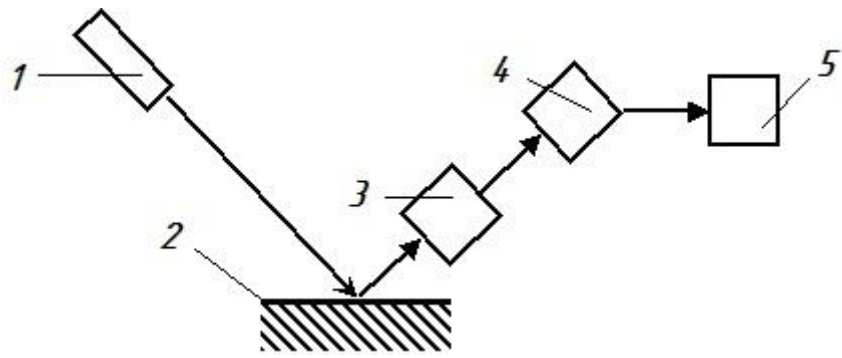
Рассмотрим рефлектометрический метод контроля шероховатости поверхностей. Данный метод основан на измерении характеристик пучка света, который отражается от контролируемой поверхности. Оценке могут подвергаться такие характеристики светового потока как: поглощённая, отраженная или пропущенная энергия.

В случае контроля шероховатости используют оценку отраженного света. При этом существуют методики определения шероховатости по зеркальному и диффузионному световому потоку.

Наибольшее распространение получили методики определения шероховатости по зеркальной составляющей светового потока. В данном случае оценивается интенсивность отраженного светового потока, которая зависит от длины и угла падения светового потока. Шероховатость контролируемой поверхности определяется путем сравнения интенсивности отражения от нее с интенсивностью отражения от эталонной поверхности.

Еще одним направлением определения шероховатости по зеркальной составляющей светового потока является оценка зависимости интенсивности отраженного светового потока от падающего светового потока и среднеквадратичного отклонения профиля контролируемой поверхности.

На рисунке 12 приведена схема устройства, реализующего рефлектометрический метод.



1 – источник светового потока; 2 – контролируемая поверхность; 3 – поляризатор; 4 – трехточечный приемник; 5 – блок обработки.

Рисунок 12 – Схема рефлектметра

Рефлектметр работает следующим образом. Световой поток от источника 1 попадает на контролируемую поверхность 2 и отражается от нее, при этом поляризуясь. Отраженный поляризованный световой поток попадает в тройной поляризатор 3, в результате чего образуется три пучка, которые направляются на трехточечный приемник 4 под углом  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . В приемнике происходит преобразование электромагнитного излучения в электрические сигналы, которые затем обрабатываются в блоке обработки 5 по одной из известных методик. В результате по степени поляризации светового потока получается информация о шероховатости контролируемой поверхности.

Основные недостатки рефлектметрического метода:

- необходимость создания стабильной мощности светового потока;
- необходимость выдержки постоянного угла падения светового потока;
- необходимость использования эталонов;
- высокая погрешность измерений (до 50%);
- значительные габариты применяемой аппаратуры.

Из проведенного анализа рефлектметрического метода можно сделать вывод о его малой пригодности для контроля шероховатости поверхностей в

производственных условиях, а также для проведения контроля труднодоступных поверхностей.

Органолептический метод заключается в использовании эталонов шероховатостей (рисунок 13) [10] или эталонных деталей для их сравнения с контролируемой поверхностью. Данный метод наиболее прост и экономичен, в связи с чем, часто используется для проведения контроля шероховатости поверхностей на рабочем месте.

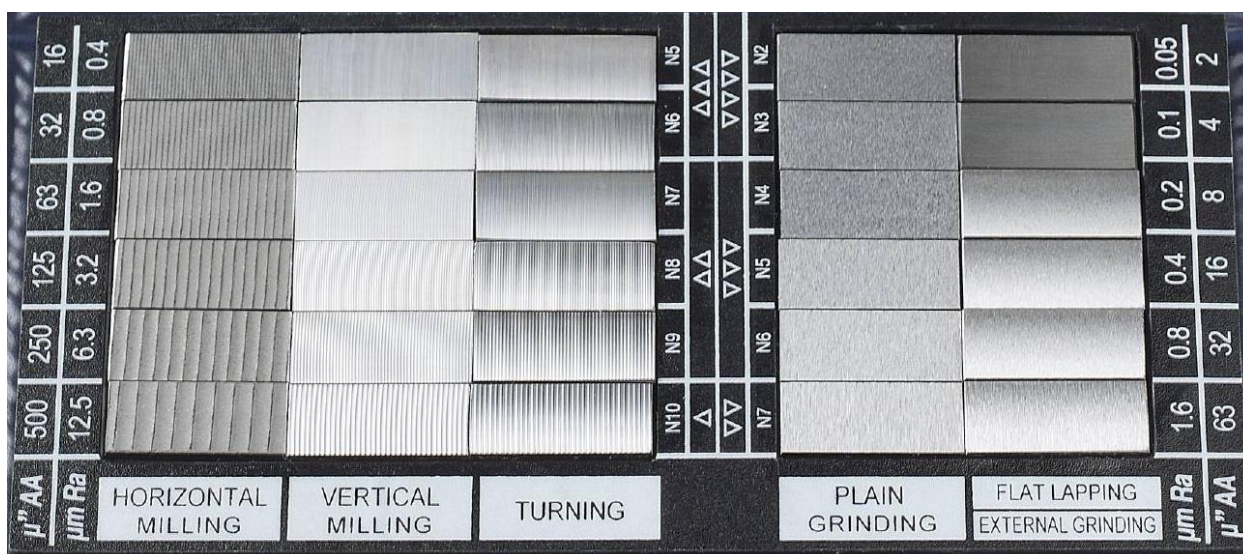


Рисунок 13 – Эталоны шероховатостей

Сравнение контролируемой поверхности с эталоном производится чаще всего при помощи визуального сравнения или при помощи ощупывания поверхности. Иногда для проведения процедуры сравнения используются компараторные микроскопы, лупы и комбинации различных способов осмотра поверхностей. Основные требования к эталонам заключаются в том, что они должны иметь следы того метода обработки, который контролируется, иметь такую же форму поверхности, одинаковый с контролируемой поверхностью цвет, блеск и материал изготовления.

К основным недостаткам данного метода контроля шероховатости поверхностей можно отнести следующие:

- субъективность контроля;
- высокая квалификация контролера;
- высокая трудоемкость;
- низкая точность ( $R_a$  до 2,5 мкм,  $R_z$  до 10 мкм).

Данный метод контроля достаточно универсален, однако его применение в производственных условиях в данный момент наиболее целесообразно. Однако, метод имеет ряд недостатков, которые ограничивают область его применения и могут привести к существенным ошибкам при проведении контроля.

Анализ методов измерения шероховатости поверхностей позволяет сделать вывод о том, что на данный момент времени для контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал в производственных условиях эффективных, экономичных и достаточно точных методов не существует. Это может привести к существенному снижению эксплуатационных свойств машин и механизмов, преждевременному их выходу из строя, авариям и значительным экономическим потерям. В связи с этим создание системы контроля шероховатости поверхностей для контроля непосредственно на рабочем месте является перспективной задачей.

Решение данной задачи возможно на основе использования технологий цифровой обработки изображения контролируемой поверхности, полученной при помощи цифровой камеры. За основу берем метод визуального контроля, который обладает высокой производительностью и методы цифровой обработки изображений. Суть данного оптико-цифрового метода заключается в том, что исходное контролируемое изображение получается при помощи цифровой камеры, что позволяет обработать полученное изображение путем сравнения с базой данных эталонов при помощи алгоритмов компьютерной обработки изображений.

К основным достоинствам данного метода следует отнести:

- данный способ обладает необходимой для использования в производственных условиях универсальностью;
- возможно изменение и пополнение используемой базы данных эталонов, что делает его пригодным для контроля после различных методов обработки;
- влияние внешних факторов, таких как, вибрация, загрязнение поверхности и ряда других минимальны, так как время экспозиции мало, так же возможно использование алгоритмов, выполняющих предварительную обработку изображения с целью повышения его качества;
- не требуется высококвалифицированного персонала, достаточно минимальных навыков использования цифровой техники и ЭВМ;
- высокая производительность;
- возможность применения в различных типах производства;
- бесконтактность;
- возможность контроля 100% изготавливаемых деталей.

Последующие разделы данной работы посвящены разработке данной системы контроля шероховатости поверхностей деталей типа вал.

### 3 Разработка математических моделей функционирования системы контроля

#### 3.1 Восстановление изображений

Изображение, полученное при помощи цифровой камеры, как правило, содержит искажения. Наиболее часто встречаемые причины связаны с несовершенством матрицы камеры из-за ограниченной разрешающей способности, расфокусировкой, воздействием факторов окружающей среды, относительными сдвигами контролируемого объекта и камеры и ряд других [14]. Воздействие данных причин на изображение приводит к снижению его четкости, что делает затруднительным или невозможным его обработку. Для решения данной проблемы применяются различные методы восстановления изображений [15, 18, 34, 37].

На рисунке 15 представлена схема получения изображения.

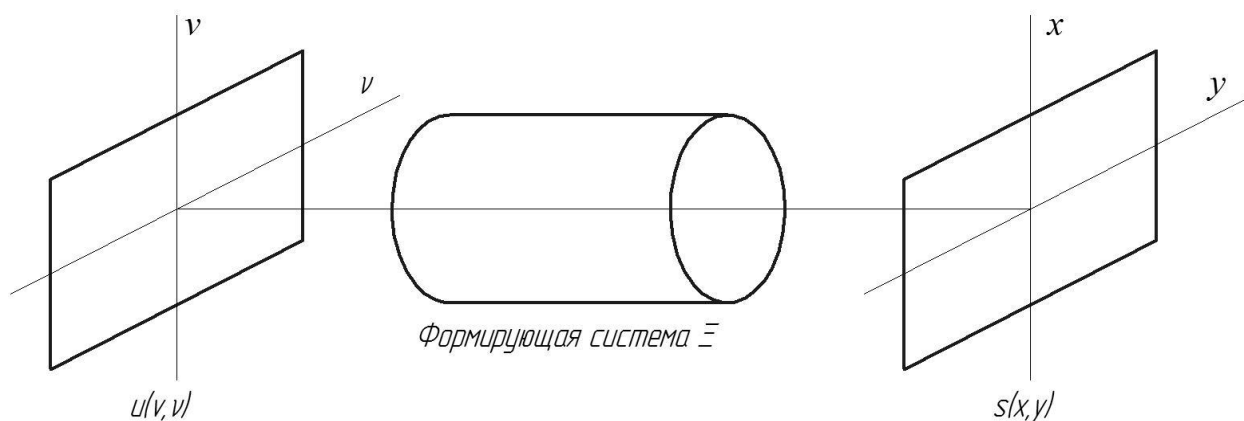


Рисунок 15 – Схема получения изображения

Функция распределения яркости контролируемого объекта  $u(v, v)$ , которая описывается зависимостью от переменных  $(v, v)$ . Изображение контролируемого объекта  $s(x, y)$  получается при помощи преобразования  $u(v, v)$  известным оператором искажения  $\Xi$  в соответствии с формулой (5).

$$s(x, y) = \Xi u(v, v). \quad (5)$$

Оператор искажения  $\Xi$  выбирается исходя из вида формирующей системы. Функция  $u(v, v)$  является исходным изображением. Восстановление изображения заключается в том, чтобы по наблюдаемому изображению контролируемого объекта  $s(x, y)$  определить изображения  $\hat{u}(v, v)$ , которое оценивает исходное изображение  $u(v, v)$ , то есть необходимо устранить искажения от оператора формирующей системы  $\Xi$ .

Рассмотрим процесс формирования изображений подробнее. Используемые формирующие системы в условиях сдвига являются инвариантными и линейными, поэтому механизм возникновения искажений является линейным и одинаковым для точек изображения  $(x, y)$ . Такого рода искажения влияют на верхние частоты исходного изображения и визуально проявляются в виде снижения его резкости. Процесс записи изображения происходит дополнительное искажение полученного изображения аддитивными независимыми от исходного изображения шумами, которые имеются во всех физических устройствах.

Исходя из изложенных выше соображений, сформируем графическую модель формирования изображения (рисунок 16).

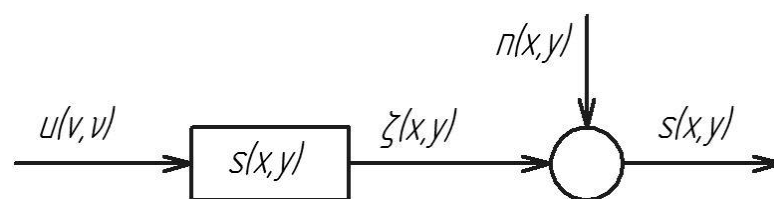


Рисунок 16 – Графическая модель формирования изображения

Математическая модель процесса формирования нерезкого изображения будет выглядеть как:



$$s(x, y) = \zeta(x, y) + n(x, y), \quad (6)$$

где  $\zeta(x, y)$  – линейно искаженное изображение без учета шума;

$n(x, y)$  – шум, вносимый физическим устройством записи изображения.

Линейно искаженное изображение без учета шума определяется как:

$$\begin{aligned} \zeta(x, y) &= h(x, y) \otimes \otimes u(x, y) = \iint_{(v,v) \in \Theta(u)} h(x - v, y - v) u(v, v) dv dv = \\ &= \iint_{(v,v) \in \Theta(u)} h(x, y) u(x - v, y - v) dv dv, (x, y) \in \Theta^{(s)} \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\otimes \otimes$  – обозначает двумерную свертку;

$h(x, y)$  – импульсная характеристика искажающей системы.

Исходное изображение в точке с координатами  $(v, v)$  с функцией яркости  $u(v, v)$  будет искажено в соответствии со значениями функции  $h(x, y)$  искажения в точке и аддитивного шума  $n(x, y)$ .

С практической точки зрения выражение (7) учитывает, что реальные изображения имеют определенный размер. Соответственно яркость изображения принимается равной нулю на всех участках, кроме области с четко обозначенными границами. Данная область называется кадром и имеет обозначение  $\Theta^{(\cdot)}$ . Индекс кадра  $\Theta^{(\cdot)}$  является символом изображения или функции размытия точки. В данных обозначениях кадр изображения  $s(x, y)$  обозначается  $\Theta^{(s)}$ .

На практике при использовании стандартных камер получаемые кадры являются прямоугольными, а их стороны расположены параллельно координатным осям  $x$  и  $y$ . В таком случае размеры кадра  $\Theta^{(s)}$  будут определяться длинами его вертикальной  $L_x^{(s)}$  и горизонтальной  $L_y^{(s)}$  сторон. Наиболее удобно совместить центр кадра изображения и начало координат в плоскости изображения. Математически данное условие выглядит следующим образом:

$$s(x, y) = 0, \text{ при } |x| \geq \frac{L_x^{(s)}}{2}, |y| \geq \frac{L_y^{(s)}}{2} \text{ или } (x, y) \notin \Theta^{(s)}. \quad (8)$$

В выражении (7) конечность относительных размеров кадров изображения и импульсной характеристики искажающей системы значительно усложняет решение задачи восстановления. Исходя из того, что системы формирования изображений формируют изображения, имеющие определенные границы, размеры кадров  $\Theta^{(s)}$ ,  $\Theta^{(\zeta)}$ ,  $\Theta^{(n)}$  равны между собой (рисунок 17).

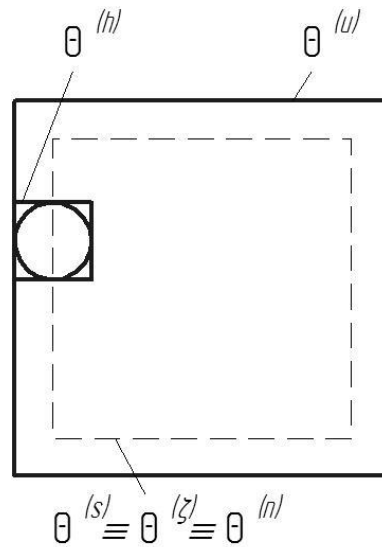


Рисунок 17 – Относительные размеры изображения и функции рассеяния точки

Функции рассеяния точки кадра  $\Theta^{(h)}$  содержит все точки с координатами  $(x, y)$  и является минимальным прямоугольником. При этом величина абсолютного значения функции размытия в точках не равна нулю, например, когда:

$$|h(x, y)| \geq 10^{-10} \max |h(x, y)| \quad (9)$$

Заметим, что кадр  $\Theta^{(h)}$  может быть как симметричен так и не симметричен относительно начала координат. Каузальные линейные системы всегда обладают не симметричными функциями размытия точки. «Границы кадра  $\Theta^{(h)}$  показывают действие функции размытия точки. Очевидно, что все точки исходного изображения  $u(v, v)$  «размазываются» в некоторую определенную область. Если перемещать кадр  $\Theta^{(h)}$  по кадру наблюдаемого изображения  $\Theta^{(s)}$ , то получится кадр исходного изображения  $\Theta^{(u)}$ , который будет являться областью всех точек, охватываемых кадром  $\Theta^{(h)}$  при данном перемещении» [18]. Тогда, для любых размеров контролируемой поверхности, наблюдаемое изображение представляет собой только какую-то его часть. Исходя из этого размеры кадра исходного изображения обычно больше размеров кадра наблюдаемого изображения. Их равенство возможно только в случае, когда дельта-функция и функция размытия точки  $h(x, y)$  искажающей системы равны, то есть линейные искажения отсутствуют.

Для решения рассматриваемой задачи достаточно восстановить изображение в пределах кадра  $\Theta^{(s)}$ . При определенных условиях, возможно добиться восстановления изображения исходного изображения кадра  $\Theta^{(u)}$ . Это обусловлено тем, что часть кадра  $\Theta^{(u)}$ , находящаяся за пределами кадра  $\Theta^{(s)}$ , воздействует на наблюдаемое изображение  $s(x, y)$ .

«Заменяя в формуле (7) для изображений, представленных в цифровой форме, двумерными массивами отсчетов, взятых на прямоугольных решетках с одинаковыми расстояниями  $\Delta = \Delta x = \Delta y$  между узлами двумерные функции  $u(v, v)$ ,  $\zeta(x, y)$ ,  $h(x, y)$ ,  $s(x, y)$ ,  $n(x, y)$  с непрерывными аргументами, получим следующий вид модели наблюдаемого изображения» [18]:

$$s(i_1, i_2) = \zeta(i_1, i_2) + n(i_1, i_2), \quad i_1 = -\frac{L_1^{(s)}}{2}, \frac{L_1^{(s)}}{2}, \quad i_2 = -\frac{L_2^{(s)}}{2}, \frac{L_2^{(s)}}{2}, \quad (10)$$

где:

$$\zeta(i_1, i_2) = h(i_1, i_2) \otimes \otimes u(i_1, i_2) = \sum_{(j_1, j_2) \in \Theta^{(h)}} \sum h(j_1, j_2) u(h(i_1 - j_1, i_2 - j_2)) \quad (11)$$

где:  $i_1$  – номер строки;

$i_2$  – номер столбца.

Так как кадр является дискретным, то для определения его размеров  $L_{i_1}^{(\cdot)}$  и  $L_{i_2}^{(\cdot)}$  необходимо для аналогового изображения определить отношение длин вертикальной и горизонтальной сторон кадра к значению интервала дискретизации  $\Delta$ .

В дискретном случае операцию свертки можно заменить на операцию умножения в частотной области [11]. Тогда можно заменить обычную свертку на циклическую, тем самым выполнить быструю имитацию линейных искажений с помощью двумерного дискретного преобразования Фурье. Перед проведением данного преобразования необходимо дополнить нулями массив  $h(i_1, i_2)$ . Данная необходимость вызвана тем, что размеры кадра  $\Theta^{(h)}$  значительно меньше размера кадра  $\Theta^{(u)}$ . Полагая, что изображения и функция размытия точки являются периодически продолженными, определяем спектр линейно искаженного изображения  $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$ :

$$\tilde{Z}(k_1, k_2) = \tilde{U}(k_1, k_2) \tilde{H}(k_1, k_2) \quad (12)$$

где  $\tilde{U}(k_1, k_2)$  – спектр исходного изображения  $\tilde{u}(i_1, i_2)$ ;

$\tilde{H}(k_1, k_2)$  – передаточная функция искажающей системы;

$k_1$  и  $k_2$  – пространственные частоты.

Выполнив обратное двумерное дискретное преобразования Фурье от  $\tilde{Z}(k_1, k_2)$  получим изображение  $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$ , размеры которого равны размерам кадра  $\Theta^{(u)}$ . Далее изображение  $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$  «обрезается» до размеров кадра изображения и добавляется аддитивная помеха  $n(i_1, i_2)$ .

Для удобства записи результатов преобразования Фурье от функций в пространственной области в дальнейшем обозначим их соответствующими прописными буквами.

Наиболее часто встречаемыми искажениями при получении изображения шероховатости поверхности детали типа вал являются «смаз» и «расфокусировка». Это связано, прежде всего, с особенностями работы систем в производственных условиях, где возможно воздействие вибраций от производственного оборудования и технологического транспорта, а также снижение изменение освещенности контролируемой поверхности в силу различных причин.

Рассмотрим более подробно характеристики дефекта изображения «смаз» [11, 28, 32]. Возникновение данного дефекта обусловлено движением относительно друг друга регистрирующего устройства и контролируемой поверхности во время получения изображения. Полученное при этом изображение, по сути, является результатом фиксации нескольких исходных изображений, возникающих при смещении.

Вероятнее всего возникновение «смаза» при перемещении камеры с постоянной скоростью по горизонтали относительно контролируемой поверхности. В данном случае функция размытия точки  $h(x, y)$  определяется из выражения:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \delta(x), & \text{при } 0 \leq y \leq \alpha \\ 0 & \text{– в остальных случаях} \end{cases}, \quad (13)$$

где  $\alpha$  – длина «смаза».

Передаточная функция  $H(\omega_x, \omega_y)$  определяется из выражения:

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin(\alpha\omega_y)}{\omega_y} \quad (14)$$

Длину «смаза»  $\alpha$  можно рассчитать как произведение времени экспозиции камеры на скорость ее перемещения. Тогда для дискретного случая для  $\alpha$  функция размытия точки определяется уравнением:

$$h(i_1, i_2) = \begin{cases} \frac{1}{L_{i_2}^{(h)}}, & \text{при } 0 \leq i_2 \leq L_{i_2}^{(h)} - 1 \text{ и } i_1 = 0 \\ 0 & \text{– в остальных случаях} \end{cases} \quad (15)$$

В данном выражении размеры кадров равны:  $L_{i_2}^{(h)} = [\alpha/\Delta]$ ,  $L_{i_1}^{(h)} = 1$ . Квадратные скобки применены в данном случае как операция округления до целого. На рисунке 18 представлено взаимное расположение при «смазе» исходного изображения и функции размытия точки.

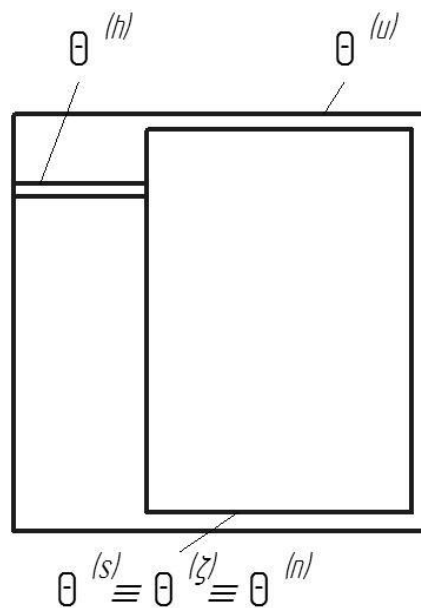


Рисунок 18 – Взаимное расположение при «смазе» исходного изображения и функции размытия точки

Для получения частотной характеристики искажающей системы необходимо в выражении (15) дополнить функцию размытия точки нулями до размеров кадра исходного изображения и применить двумерное дискретное преобразование Фурье. В результате для всех  $k_1$  получим:

$$\tilde{H}(k_1, k_2) = \frac{1}{L_{i2}^{(h)} \sqrt{L_{i2}^{(u)}}} \cdot e^{j(\pi(L_{i2}^{(h)}-1)k_2/L_{i2}^{(u)})} \cdot \frac{\sin(\pi(L_{i2}^{(h)}-1)k_2/L_{i2}^{(u)})}{\sin(\pi k_2/L_{i2}^{(u)})} \quad (16)$$

Для примера на рисунке 19 приведено изображение модуля частотной характеристики искажающей системы  $\tilde{H}(k_1, k_2)$  для размеров исходного изображения 185 на 170 пикселей и  $L_{i2}^{(h)} = 15$ .

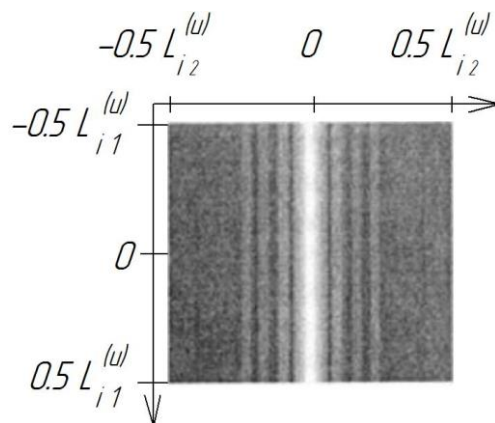


Рисунок 19 – Модуль частотной характеристики искажающей системы

Для исходного изображения шероховатости (рисунок 20) размером 185 на 170 пикселей приведем пример горизонтального «смаз» на 15 пикселей (рисунок 21). Заметим, что искаженное изображение будет иметь размер 170 на 170 пикселей.



Рисунок 20 – Шероховатость поверхности без искажения

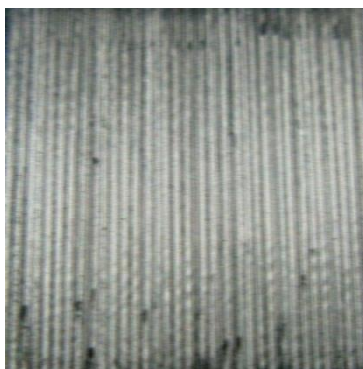


Рисунок 21 – Шероховатость поверхности с искажением «смаз»

Рассмотрим более подробно характеристики дефекта изображения «расфокусировка» [11, 25, 31, 33].

Расфокусировка подразумевает снижение четкости изображения. Под четкостью понимается возможность считывания и воспроизведения мелких деталей изображения контролируемой поверхности. Четкость зависит от разрешающей способности применяемой системы формирующей изображение. В нашем случае в качестве системы формирующей изображение применяется цифровая камера. «Её разрешающая способность численно выражается количеством пар черных и белых линий на 1 мм изображения, формируемого объективом камеры. При попадании в фокус объектива плоскости формируемого изображения пучок лучей, формируемый точкой на объекте, будет сходиться в точку на изображении. В случае появления на изображении расфокусировки точка изображения выглядит как пятно, которое принято называть кругом размытия. В результате близко расположенные точки исходного изображения на наблюдаемом изображении сольются в одну. На размер круга размытия влияют: фокусное расстояние объектива, расстояния от объектива до объекта, расстояние от объектива до плоскости формируемого изображения. Если шаг дискретизации наблюдаемого изображения  $\Delta$  больше чем диаметр круга размытия, то изображение можно считать сфокусированным. В случае если данное условие не выполняется, то линейные искажения становятся



заметными. Непосредственная обработка такого изображения для целей определения шероховатости поверхностей нецелесообразна, так как результат будет заведомо ложным. Для изображения точечного источника, формируемого тонкой линзой с круговой апертурой распределение интенсивности дефекта «расфокусировка» будет постоянной в круге размытия радиусом  $r$  и равна нулю за его пределами. Математически это описывается цилиндрической функцией размытия» [11]:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & \text{при } x^2 + y^2 \leq r^2; \\ 0 & \text{– в остальных случаях} \end{cases} \quad (17)$$

Тогда, размеры кадра  $L_x^{(h)} = L_y^{(h)} = 2r$ . Для определения передаточной функции необходимо выполнить двумерное преобразование Фурье полученного выражения. Искомая передаточная функция равна:

$$H(\omega_x, \omega_y) = \frac{J_1(r\rho)}{r\rho}, \quad \rho^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2, \quad (18)$$

где  $J_1(\cdot)$  – функция Бесселя первого порядка.

В дискретном случае выражение (17) примет вид:

$$h(i_1, i_2) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & \text{при } i_1^2 + i_2^2 \leq r^2; \\ 0 & \text{– в остальных случаях.} \end{cases} \quad (19)$$

Пример иллюстрации выражения функции размытия точки (19) для тонкой линзы представлен на рисунке 22. Пример иллюстрации модуля передаточной функции представлен на рисунке 23. В примере взят кадр изображения размером 200 на 200 пикселей и радиус круга размытия  $r = 10$  пикселей.

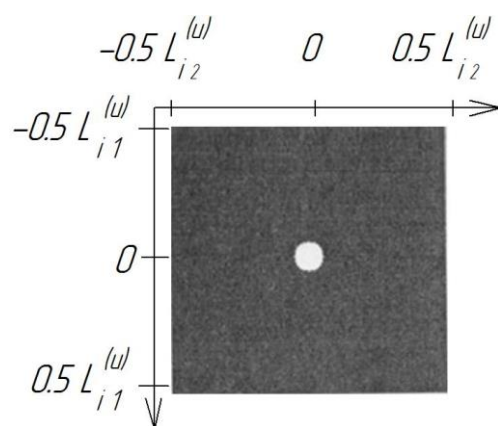


Рисунок 22 – Функция размытия точки для тонкой линзы

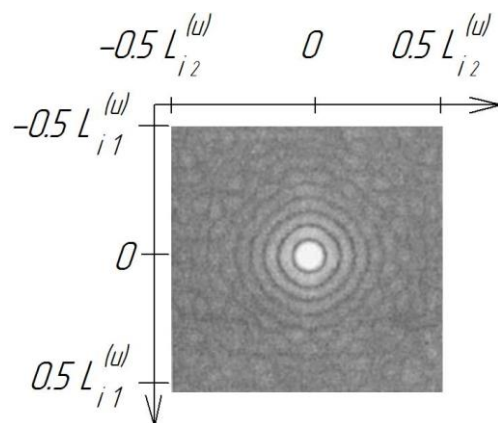


Рисунок 23 – Модуль частотной характеристики для тонкой линзы

Кадр функции размытия точки симметричен относительно начала координат, поэтому дефекта «расфокусировка» соотношения между различными кадрами изображений будут соответствовать приведенным на рисунке 17.

На рисунке 24 приведен пример наблюдаемого изображения с дефектом «расфокусировка» для изображения шероховатости, представленного на рисунке 20. Заметим, что размер наблюдаемого изображения отличается от размера исходного изображения и равен 170 на 170 пикселей.

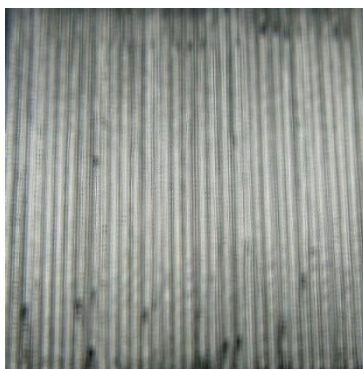


Рисунок 24 – Шероховатость поверхности с дефектом «расфокусировка»

Рассмотренные выше характеристики дефектов «смаз» и «расфокусировка» позволяют выделить основные проблемы восстановления изображения.

«Исходя из того, что устройства получения изображения это по сути фильтры низких частот, то «смаз» и «расфокусировка» являются ослаблением изображения в верхних его частотах. На данных частотах формируется четкость изображения. Отношение сигнала и шума в таком случае для данных частот значительно ухудшится по сравнению с остальным изображением. Алгоритмы восстановления изображения в этом случае должны усилить сигнал на данных частотах в той же мере, что они были ослаблены при его получении. Однако, при этом сигнал шумов также будут усиливаться и улучшение изображения по резкости приведет к увеличению количества шумов.

Другой проблемой при восстановлении изображения является так называемый краевой эффект. Суть данного эффекта заключается в том, что яркость на краях наблюдаемого изображения зависит от яркости окружающих контролируемую поверхность объектов. В результате возникает свертка исходного изображения и функции размытия точки. Краевой эффект появляется из-за отсутствия полной информации о яркости вне кадра. Наличие данного эффекта в ряде случаев может снизить эффективность восстановления изображения больше, чем шум» [24].

Наличие нулей в передаточных функциях из-за их осциллирующего характера при искажениях от движения камеры или ее расфокусировки в соответствующих частотах приводит к утрате данных об исходном изображении. Это является причиной невозможности восстановления исходного изображения даже при отсутствии шумов и ограничений размеров кадра.

Алгоритмы решения задач восстановления изображения могут быть как математическими, так и эвристическими. В зависимости от характера искажения изображения и его природы в случае возможности описания его уравнением свертки применяются «алгоритмы построенные на основе системы алгебраических уравнений, алгоритмы частотной фильтрации и итерационные алгоритмы» [8].

Применительно к решаемой в данной работе задаче по контролю шероховатости поверхностей детали типа вал наиболее применимыми являются алгоритмы, построенные на основе системы алгебраических уравнений и алгоритмы частотной фильтрации. Итерационные алгоритмы для данного случая слишком сложны в реализации, поэтому их для проектируемой системы контроля применять не будем.

Алгебраические алгоритмы требуют большого количества вычислений, но при этом самые простые в реализации. При появлении шумов количество вычислений и время обработки изображения значительно увеличивается, что ограничивает область его применения. Решение этой проблемы достигается путем применения алгоритмов частотной фильтрации. Однако, данные алгоритмы неустойчивы к возникновению краевого эффекта. В связи с этим в проектируемой системе предлагается в зависимости от условий ее эксплуатации предлагаться использовать как алгебраические, так и частотные алгоритмы.

Алгебраические алгоритмы восстановления изображений [8, 27, 35] основаны на построении системы линейных алгебраических уравнений для выражения (11) относительно исходного изображения  $u(i_1, i_2)$ , то есть задача

восстановления при известной функции размытия точки  $h(i_1, i_2)$  заключается в решении данной системы.

Выражения (10) и (11) преобразуем в матричную форму. Алгоритм преобразования следующий. Двумерный массив  $s(i_1, i_2)$ , имеет размер:

$$L^{(s)} = (L_1^{(s)} + 1) \times (L_2^{(s)} + 1). \quad (20)$$

Данный массив преобразуем в вектор-столбец  $s$  с размером  $L^{(s)} \times 1$ , путем проведения построчной развертки массива  $(i_1, i_2)$ . Аналогично преобразуем искаженное изображение  $\zeta(i_1, i_2)$ , исходное изображение  $u(i_1, i_2)$  и шум  $n(i_1, i_2)$  в вектор-столбцы соответственно  $z, u, n$ .

Размеры  $z, u, n$  составляют:

$$L^{(u)} = L^{(\zeta)} = L^{(n)} = (L_1^{(u)} + 1) \times (L_2^{(u)} + 1). \quad (21)$$

Изображения между собой будут связаны выражением:

$$s = z + n. \quad (22)$$

В данной формуле искаженное без присутствия шума изображение определяется выражением:

$$z = hu, \quad (23)$$

где  $h$  – матрица при помощи которой происходит преобразование вектора исходного изображения в вектор искаженного изображения размером  $L^{(\zeta)} \times L^{(u)}$ .

Элементы матрицы  $h$  представляют собой отсчеты функции размытия точки и имеют блочную структуру.

В случае наличия и отсутствия шумов подходы к восстановлению изображений при помощи алгебраических методов существенно отличаются.

При отсутствии шумов для восстановления изображения достаточно найти решения оценки  $\hat{u}$  выражения (23), выполняющие условие:

$$z = h\hat{u}. \quad (24)$$

В случае, когда матрица  $h$  является квадратной, то существует обратная матрица  $(h)^{-1}$ . Решение такой системы:

$$\hat{u} = (h)^{-1}z. \quad (25)$$

Исходя из того, что размеры кадра исходного изображения всегда больше размеров кадра искаженного изображения, то есть количество неизвестных  $L^{(u)}$  больше числа уравнений в системе  $L^{(\zeta)}$ , то выражение (23) является неопределённой системой линейных алгебраических уравнений. Тогда  $h$  будет представлять собой прямоугольную матрицу размером  $L^{(\zeta)} \times L^{(u)}$ . При условии разрешимости недоопределенной системы (23), из всех ее решений выбирается одно, которое и будет оценкой  $\hat{u}$ . Для этого необходимо рассчитать норму ошибки восстановления с использованием критерия наименьших квадратов:

$$\varepsilon_1^2 = e_1(\hat{u})^T e_1(\hat{u}) = \sum_{i=1}^{L^{(u)}} (u_i - \hat{u}_i)^2 = \min_{\hat{u}}, \quad (26)$$

где  $T$  – транспонирование матрицы;

$$e_1(\hat{u}) = u - \hat{u} - \text{вектор ошибки при восстановлении.}$$

Рассматриваемый критерий будет минимальным при условии, что выполняется равенство:

$$\hat{u} = h^+ z, \quad (27)$$

где  $h^+ = h^T (hh^T)^{-1}$  – обобщенная обратная матрица.

Как правило, норма ошибки не равна нулю.

Восстановление изображения данным методом возможно в случае выполнения ряда условий. Как указывалось ранее, изображение не должно содержать шумов. Получение изображения должно обеспечиваться циклической сверткой. Исходное изображение должно находиться в центре кадра при условии обеспечения постоянной яркости. Апертура функции размытия точки должна быть меньше, чем расстояние от объектов изображения до границ кадра. Выполнение данных условий позволит исключить влияние на яркость наблюдаемого изображения объектов, находящихся вне кадра, поэтому число неизвестных и число уравнений будут совпадать. Это позволяет сделать вывод о том, что при отсутствии шумов полное восстановление изображения происходит при отсутствии потери информации из-за ограничения размеров кадра наблюдаемого изображения.

В случае присутствия искажения изображения шумами в уравнении (24) к  $z$  добавится вектор-столбец  $n$ . Полученная таким образом система станет неразрешимой, то есть невозможно найти тождественную оценку исходного изображения. Для неразрешимых систем ищется приближенное решение из условия обеспечения минимума нормы ошибки восстановления по критерию наименьших квадратов:

$$\varepsilon_2^2 = e_2(\hat{u})^T e_2(\hat{u}) = (s - h\hat{u})^T (s - h\hat{u}) = \min_{\hat{u}}. \quad (28)$$

Оптимальным оператором для формирования оценки  $\hat{u}$  будет обобщенная обратная матрица  $h^+$ , которая обеспечит минимум нормы оценки:

$$(\hat{u})^T \hat{u} = \sum_{i=1}^{L^{(s)}} \hat{u}_i^2. \quad (29)$$

Как при наличии, так и при отсутствии шума в наблюдаемом изображении для получения оптимального решения по критерию наименьших квадратов необходимо использование обобщенного обращения матриц. Данные критерии не являются одинаковыми, несмотря на одинаковое название. В случае с разрешимой недоопределенной системы норма ошибки восстановления  $e_2(\hat{u})$  равна нулю, а в случае неразрешимой системой точное решение системы уравнений отсутствует, поэтому норма ошибки восстановления  $e_2(\hat{u})$  не равна нулю.

Присутствие в алгебраических алгоритмах восстановления изображений операций преобразования матриц с учетом их размеров существенно увеличивает трудоемкость алгоритмов и время обработки изображений. Наличие операции обращения матриц значительных размеров, а также учитывая, что матрица  $h$  представляет собой произведение исходного и наблюдаемого изображений, для проведения всех необходимых вычислений потребуются значительные мощности. В случае для формирования искаженного изображения из исходного применяется циклическая свертка с функцией размытия точки объемы вычислений уменьшаются. На рисунке 25 представлен пример работы алгоритмов алгебраических методов восстановления применительно к изображению, представленному на рисунке 24.

На практике применение алгебраических методов не всегда дает хороший результат, поэтому рассмотрим возможность применения алгоритмов пространственной частотной фильтрации для решения задач восстановления изображений шероховатости наружных поверхностей вращения [29, 36, 38].



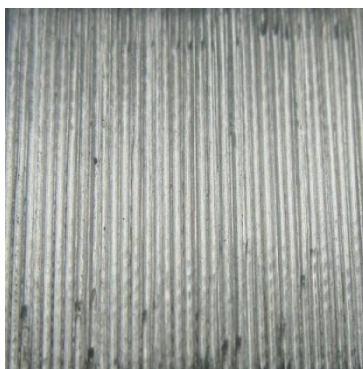


Рисунок 25 – Восстановленное изображение шероховатости поверхности

Алгоритмы пространственной фильтрации построены на дискретном преобразовании Фурье, а обычная свертка в модели формирования искаженного изображения и в процедуре его восстановления заменяется циклической. Функция размытия точки и изображения  $\tilde{s}(i_1, i_2)$ ,  $\tilde{\zeta}(i_1, i_2)$ ,  $\tilde{n}(i_1, i_2)$ ,  $\tilde{u}(i_1, i_2)$  в данном случае будут иметь одинаковый размер кадра  $L = L_1 \times L_2$  и периодически продолженными. Применение процедуры замены сверток в данных алгоритмах позволяет исключить изменение яркости на краях искаженного изображения вследствие влияния объектов вне поля зрения объектива. Основной проблемой использования данных фильтров является появление краевых эффектов, устранение которых сложная задача.

В случае применения циклической свертки формирование изображения будет происходить согласно уравнению:

$$\begin{aligned} \tilde{s}(i_1, i_2) &= \tilde{\zeta}(i_1, i_2) + \tilde{n}(i_1, i_2) = \tilde{h}(i_1, i_2) \otimes \otimes \tilde{u}(i_1, i_2) + \tilde{n}(i_1, i_2), \\ (i_1, i_2) &\in \Theta, \end{aligned} \quad (30)$$

где  $\Theta$  – кадр, одинаковый для функции размытия точки и изображений.

Данный кадр имеет размер, соответствующий функции размытия точки и периоду повторения изображений.

Преобразуем полученное выражение при помощи дискретного преобразования Фурье [17]:

$$\begin{aligned} \tilde{S}(k_1, k_2) &= \tilde{Z}(k_1, k_2) + \tilde{N}(k_1, k_2) = \tilde{H}(k_1, k_2)\tilde{U}(k_1, k_2) + \tilde{N}(k_1, k_2), \\ (k_1, k_2) &\in \Theta. \end{aligned} \quad (31)$$

Восстановление при помощи алгоритмов пространственной фильтрации основано на применение двумерного пространственно-инвариантного фильтра, выходом которого является оценка исходного изображения:

$$\hat{u}(i_1, i_2) = \tilde{h}(i_1, i_2) \otimes \otimes \tilde{s}(i_1, i_2). \quad (32)$$

Тогда для пространственно-частотной области выражение (31) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \hat{U}(k_1, k_2) &= \tilde{H}(k_1, k_2)\tilde{S}(k_1, k_2) = \tilde{H}(k_1, k_2)(\tilde{H}(k_1, k_2)\tilde{U}(k_1, k_2) + \\ &+ \tilde{N}(k_1, k_2)). \end{aligned} \quad (33)$$

Основными фильтрами являются инверсный и фильтр Винера. Инверсный фильтр неустойчив к помехам, так как в нем не учтены шумы наблюдаемого изображения, поэтому данный фильтр применительно к системе контроля шероховатости не подходит. Фильтр Винера более устойчив к помехам, это связано с использованием в нем информации о спектральных областях мощности изображения и шума, а не только информации о виде функции размытия точки. Рассматриваемый фильтр для периодически продолженных изображений имеет следующую частотную характеристику:

$$\tilde{H}_{\text{Вин}}(k_1, k_2) = \frac{\tilde{G}_{u,s}(k_1, k_2)}{\tilde{G}_s(k_1, k_2)} = \frac{\tilde{H}^*(k_1, k_2)\tilde{G}_u(k_1, k_2)}{|\tilde{H}(k_1, k_2)|^2\tilde{G}_u(k_1, k_2) + \tilde{G}_n(k_1, k_2)}, \quad (34)$$

где  $\tilde{G}_n(k_1, k_2)$  – спектральная плотность мощности периодически продолженного шума;

$\tilde{G}_s(k_1, k_2)$  – спектральная плотность мощности периодически продолженного наблюдаемого изображения;

$\tilde{G}_u(k_1, k_2)$  – спектральная плотность мощности периодически продолженного исходного изображения.

Комплексное сопряжение в данном выражении обозначено символом \*.

Произведем преобразование выражения (34):

$$\tilde{H}_{\text{Вин}}(k_1, k_2) = \frac{\tilde{H}^*(k_1, k_2)}{|\tilde{H}(k_1, k_2)|^2 + \frac{\tilde{G}_n(k_1, k_2)}{\tilde{G}_u(k_1, k_2)}}. \quad (35)$$

Следует отметить, что обработка при помощи данного фильтра происходит в частотной области.

Из полученного соотношения следует. В случае отсутствия шумов в области низких частот передаточные функции фильтров Винера и инверсионного совпадают. Значит, фильтры также будут совпадать. На верхних частотах передаточная функция фильтра Винера будет приближаться к нулю. При частоте передаточной функции формирующей системы соответствующей нулю, для фильтра Винера передаточная функция также равна нулю. Это позволяет избежать сингулярности восстанавливающей системы.

Пример восстановления искаженного изображения (рисунок 21) представлен на рисунке 26.

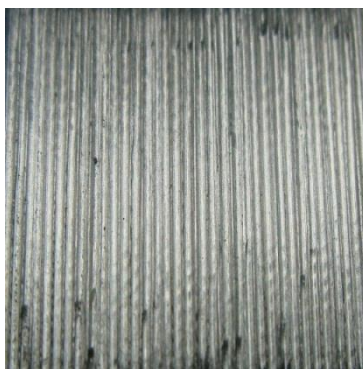


Рисунок 26 – Восстановленное изображение шероховатости поверхности

Размер восстановленного изображения 170 на 170 пикселей.

Как видно из приведенного примера фильтр Винера устойчив к помехам, отсутствует сингулярность, что объясняется использованием при его формировании спектральных характеристик изображения и шума.

Однако в ряде случаев при применении данного фильтра возможно возникновение осциллирующих помех, это объясняется тем, что объясняется возникновением краевых эффектов, описанных ранее.

Компенсация краевых эффектов при восстановлении изображений одна из ключевых задач. Основной причиной возникновения данного эффекта является то, что кадр искаженного изображения имеет конечный размер. В таком изображении теряется информация, которая содержится вблизи границ исходного изображения. В результате при восстановлении возникают полосы или рябь. Особенно данный эффект заметен, когда искажение изображения произошло в результате смаза или когда функция размытия точки имеет цилиндрическую форму. Решение уравнения Винера-Хопфа в данном случае не представляется возможным, поэтому для устранения краевого эффекта используются эвристические алгоритмы. Существует достаточно много различных вариантов данных алгоритмов [6, 8]. Исходя из специфики решаемой задачи наиболее приемлемым будет алгоритм на основе функций окна [20, 21, 22]. Рассмотрим его подробнее.

В рассматриваемом случае интерес представляет центральная часть изображения. Учитывая, что его размеры больше размеров кадра функции размытия точки, компенсация краевых эффектов необходимо умножить наблюдаемое изображение на функцию окна  $w(i_1, i_2)$ . На краях кадра наблюдаемого изображения  $\Theta^{(s)}$  функция окна равна нулю. При этом функция окна должна уменьшаться до нуля плавно, а за пределами  $\Theta^{(s)}$  всегда равна нулю. После обработки функцией окна изображение производится дальнейшее его восстановление фильтром Винера.

Предполагается, что функция окна разделима относительно координат:

$$w(i_1, i_2) = w(i_1)w(i_2). \quad (36)$$

В случае смаза по горизонтали или вертикали применяются умножение одномерной функции окна на соответствующие строчки или столбцы наблюдаемого изображения. Одна из наиболее эффективных функций окна выражается:

$$w_r(i | \gamma, \beta) = 0,5 \left( th \left( \left( i + \frac{\gamma}{2} \right) / \beta \right) - th \left( \left( i - \frac{\gamma}{2} \right) / \beta \right) \right), \quad (37)$$

где  $\gamma$  – параметр размера окна;

$\beta$  – параметр скорости спада краев окна к нулю.

Результаты восстановления изображения искаженного дефектом «смаз» (рисунок 21) при помощи описанного выше алгоритма представлен на рисунке 27.

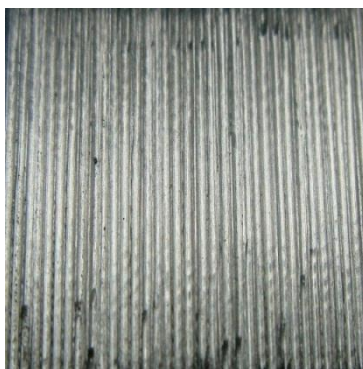


Рисунок 27 – Восстановленное изображение шероховатости поверхности

Как видно результат восстановления изображения шероховатости при помощи фильтра Винера с компенсацией краевых эффектов достаточно хороший.

Исходя из полученных результатов задачу восстановления искаженного изображения применительно к контролю параметров шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал можно считать достигнутой.

### **3.2 Бинарная сегментация изображений**

Для проведения процедуры сравнения восстановленного изображения с эталоном необходимо провести его предварительную бинаризацию сегментацию [2, 3, 22].

Получаемые от камеры изображения представляют собой однородные участки, которые отличаются определенным набором характеристик. С этой точки зрения изображение представляет собой непересекающиеся области изображений одного из типов, количество которых не большое. Анализ данных изображений заключается в определении типа области и ее геометрических характеристик или его карты. Под сегментацией понимается процесс обработки изображения, который позволяет получить данную карту. В данном случае нас интересует бинарная сегментация (бинаризация), то есть

разделение на два типа однородных участков. Данный вид сегментации является простейшим.

Набор признаков, по которым можно отличить участок одного типа от другого может существенно отличаться. Наиболее часто используются такие признаки как: средняя яркость, дисперсия флюктуации, корреляционные свойства.

Чаще всего встречаются изображения, имеющие различную среднюю яркость участков. Анализ дисперсии флюктуации используется чаще всего, когда средняя яркость одинаковая. Под корреляционными свойствами понимается смена плавных медленных колебаний яркости существенно более быстрыми. Часто встречаются случаи, когда участки можно разделить только при использовании сразу нескольких характеристик.

На практике встречаются случаи, когда предложенный выше метод анализа моментно-корреляционных характеристик изображения для проведения бинарной сегментации непригодны. Это случаи изображений области которых не имеют различных характеристик, а представляют собой границы между разграниченными участками (например, кирпичная стена).

В случае бинаризации цветных изображений в качестве признака для бинаризации можно использовать цвет. Такой признак используется как дополнение характеристик, используемых для обработки изображений в черно-белых тонах. Бинаризацию спектрозональных изображений проводят по такому же принципу. Решение этих задач представляет значительную сложность с точки зрения их практической реализации. При этом успешное решение данных задач позволит существенно улучшить качество обработки изображений применительно к системам оптического контроля. Существует большое количество методов бинаризации. Это связано с тем, что не существует эффективного единообразного подхода к реализации данных методов. Задачи бинарной сегментации могут быть решены на основе самых разнообразных подходов [5]. Наиболее перспективным подходом

применительно к решаемой задаче является сегментация изображения на основе пороговой обработки.

Рассмотрим сущность метода бинаризации на основе пороговой обработки. Общеизвестна простота и эффективность данного метода бинаризации. Основным условием применимости данного метода является наличие на изображении отличающихся средней яркостью однородных участков. Для проведения преобразования в точки выходного изображения  $y(i, j)$  точек входного изображения  $x(i, j)$  используется выражение:

$$y(i, j) = \begin{cases} y_0, & \text{при } x(i, j) \leq x_0 \\ y_1, & \text{при } x(i, j) > x_0 \end{cases} \quad (38)$$

где  $x_0$  – порог обработки;

$y_0, y_1$  – уровни выходной яркости.

Разметка карты изображения заключается в отнесении его точек к классу  $A$  или  $B$ . Выполнение разметки выполняется при помощи произвольных уровней выходной яркости  $y_0$  и  $y_1$ , которые, по сути, являются метками для ее осуществления. В случае если необходимо визуальное восприятие результатов обработки, то наиболее удобно использовать в качестве классов уровни белого и черного. В случае если классов больше, то порогов, которые отделяют их яркости, должно быть несколько.

Наиболее значимый вопрос при осуществлении бинарной сегментации заключается в определении порогов. Решение данного вопроса возможно различными методами [7]. Применительно к использованию данной процедуры в системах контроля основным требованием является ее автоматизация. Для обеспечения выполнения данного условия предлагается использование метода основанного на анализе исходного изображения по его гистограмме.

Рассмотрим предлагаемый метод подробнее. Диапазон яркостей



исходного цифрового изображения составляет от 0 (черный цвет) до 255 (белый цвет), тогда его гистограмма примет вид  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq 255$ .

Суть метода гистограмм заключается в том, что распределения вероятностей каждого класса имеют один максимум на гистограмме (унимодальны), при этом точек находящихся на участках границ разных классов достаточно мало. Многомодальные гистограммы также должны отвечать данным предположениям. Классы определяются отдельными модами, а впадины на гистограмме соответствуют точкам граничных областей. Положение впадин являются порогами сегментации.

Применительно к случаю бинарной сегментации высказанные предположения представлены на рисунке 28.

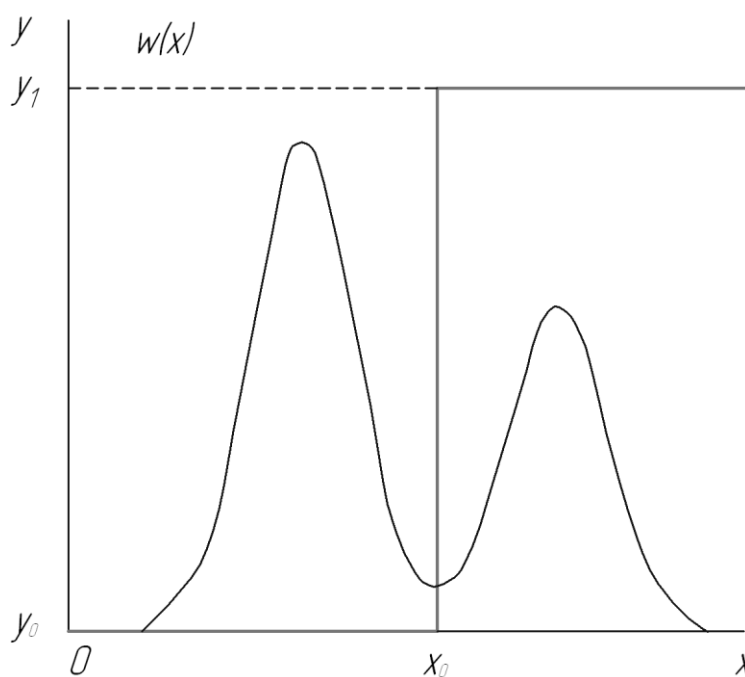


Рисунок 28 – Порог бинаризации изображения

Применительно к реальным изображениям выбор порога, исходя из таких соображений, практически трудно реализуем. Это связано с тем, что на гистограмме реального изображения присутствует много впадин и определить точки минимума достаточно трудно. Другая причина

заключается в размытости границ однородных участков изображения. В этом случае гистограмма на точках границ будет возрастать, вследствие чего впадины на гистограмме уменьшатся или будут отсутствовать.

Наиболее приемлемо в таком случае применить дискриминантный критерий для определения порога сегментации. Применительно к нашему случаю бинарной сегментации данный подход выглядит следующим образом. Предположим, что распределение  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq 255$  изображения содержит два типа участков и существует такая граница их разделения  $x_0$ , которая будет оптимальной. Поиск этой границы, то есть оптимального порога, заключается в построении дискриминантной функции  $\eta(x_0^*)$ ,  $0 \leq x_0^* \leq 255$ . В данной функции аргумент  $x_0^*$  является пробным порогом. Оптимальным будет такой порог  $x_0^*$ , который обеспечит максимум функции  $\eta(x_0^*)$ .

Построение дискриминантной функции осуществляется исходя из следующих соображений. Принимаем  $x_0^*$  за возможный порог разбиения на два класса распределения  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq 255$ . Отнесение граничных точек с яркостью  $x_0^*$  к одному из классов не играет особой роли, так как количество данных точек незначительно.

Тогда вероятность принадлежности точки к классу  $A$  определяется из выражения:

$$p_A = \sum_{x=0}^{x_0^*} w(x) = p(x_0^*). \quad (39)$$

По аналогии вероятность принадлежности точки к классу  $B$  определяется из выражения:

$$p_B = \sum_{x=x_0^*+1}^{255} w(x). \quad (40)$$

Заметим, что исходя из нормировки распределения вероятностей:

$$p_A + p_B = 1. \quad (41)$$

Таким образом, участок изображения, ограниченный яркостью  $x_0^*$  и отнесенный к классу  $A$ , описывается участком распределения  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq x_0^*$ , участок, отнесенный к классу  $B$ , описывается участком распределения  $w(x)$ ,  $x_0^* + 1 \leq x \leq 255$ . Исходя из этих соображений из распределения  $w(x)$  получаем выражения распределений  $w_A(x)$  и  $w_B(x)$  для классов  $A$  (42) и  $B$  (43):

$$w_A(x) = \frac{w(x)}{p_A}, \quad 0 \leq x \leq x_0^*, \quad (42)$$

$$w_B(x) = \frac{w(x)}{p_B}, \quad x_0^* + 1 \leq x \leq 255. \quad (43)$$

Для нормировки данных условных распределений в (42) и (43) введено деление на соответствующие вероятности.

Математические ожидания для представленных распределений вероятностей определяются по формулам:

$$\mu_A = \sum_{x=0}^{x_0^*} x w_A(x) = \sum_{x=0}^{x_0^*} x \frac{w(x)}{p_A}, \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \mu_B &= \sum_{x=x_0^*+1}^{255} x w_B(x) = \sum_{x=x_0^*+1}^{255} x \frac{w(x)}{p_B} = \frac{\sum_{x=0}^{255} x w(x) - \sum_{x=0}^{x_0^*} x w(x)}{p_B} = \\ &= \frac{\mu(255) - \mu(x_0^*)}{1 - p(x_0^*)}, \end{aligned} \quad (45)$$

где  $\mu(255) = \sum_{x=0}^{255} x w(x)$  – математическое ожидание для кадра;

$\mu(x_0^*) = \sum_{x=0}^{x_0^*} x w(x)$  – математическое ожидание для класса  $A$ .

Для определения дисперсии кадра используется выражение:

$$\sigma_T^2 = \sum_{x=0}^{255} [x - \mu(255)]^2 w(x). \quad (46)$$

Построение дискриминантной функции возможно на основе межклассовой дисперсии определяемой выражением:

$$\sigma_M^2 = p_A (\mu_A - \mu(255))^2 + p_B (\mu_B - \mu(255))^2. \quad (47)$$

Дискриминантная функция получается из соотношения:

$$\eta(x_0^*) = \frac{\sigma_M^2(x_0^*)}{\sigma_T^2}. \quad (48)$$

Оптимальный порог будет соответствовать выражению:

$$x_0 = \arg \max_{x_0^*} \eta(x_0^*). \quad (49)$$

В знаменателе выражения (48) дисперсия кадра не зависит от величины пробного порога  $x_0^*$ . Следовательно, максимум данного выражения совпадет с максимальным значением числителя, то есть для его определения необходимо определить межклассовую дисперсию (47). Из выражения (39) следует, что вероятность  $p_A$  будет стремиться к нулю при условии, что порог будет стремиться к нулю. В этом случае  $\mu_B \rightarrow \mu(255)$ , так как все изображение будет принадлежать классу  $B$ . Тогда выражение (47) становится равным нулю. В случае если порог займет другое крайнее положение  $x_0^* = 255$ , получится аналогичный результат.

Значения величин в выражениях (47) и (49) не могут быть отрицательными, а значение выражения (48) на краях области определения равно нулю, поэтому внутри данной области будет существовать максимум. Абсцисса данного максимума и будет искомым оптимальным порогом.

На практике при обработке изображений встречаются случаи, когда даже при наличии на нем только двух классов дискриминантная функция  $\eta(x_0^*)$  может иметь несколько максимумов. Это возможно, например, при существенном различии между занимаемыми классами  $A$  и  $B$  площадями. В связи с этим необходимо для дискриминантной функции  $\eta(x_0^*)$  установить её абсолютный максимум.

Для решения этой задачи необходимо определить математическое ожидание  $\mu(255)$  и дисперсию кадра  $\sigma_T^2$  изображения. Затем с использованием выражений (39), (40), (44), (45) определяются вероятность  $p_A$  принадлежности точки к классу  $A$ , вероятность  $p_B$  принадлежности точки к классу  $B$ , математические ожидания  $\mu_A$  и  $\mu_B$  для каждого значения пробного порога  $x_0^*$ . Исходя из полученных данных, определяется значение дискриминантной функции  $\eta(x_0^*)$ .

Для сокращения расчётов необходимо преобразовать выражение для вычисления межклассовой дисперсии  $\sigma_M^2$  (47). С применением выражений (39)...(45) получаем выражение для математических ожиданий:

$$p_A \mu_A + p_B \mu_B = \mu(255). \quad (50)$$

Затем раскрываем квадраты разностей в (47), производим преобразование с использованием (50). В результате получаем:

$$\sigma_M^2 = p_A p_B (\mu_B - \mu_A)^2. \quad (51)$$

Величину  $\mu_B$  получаем из (50). Полученный результат подставляем в (51), получаем:

$$\sigma_M^2(x_0^*) = \frac{[\mu(255)p(x_0^*) - \mu(x_0^*)]^2}{p(x_0^*)[1-p(x_0^*)]}. \quad (52)$$

Полученное соотношение требует гораздо меньший объем вычислений, так как в нем используются только ненормированное математическое ожидание  $\mu(x_0^*)$  и вероятность  $p(x_0^*)$ . С точки зрения использования данного критерия для отыскания оптимального порога в автоматическом режиме такое решение является наилучшим.

В качестве примера применим автоматическую бинарную сегментацию на основе дискриминантного критерия к изображению, представленному на рисунке 29. Результаты операции представлены на рисунке 30.

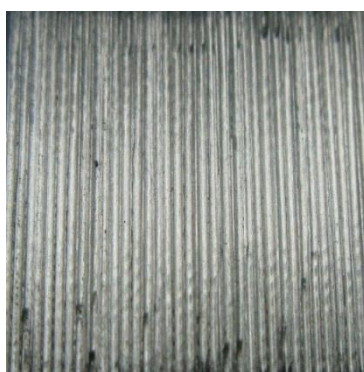


Рисунок 29 – Исходное изображение шероховатости

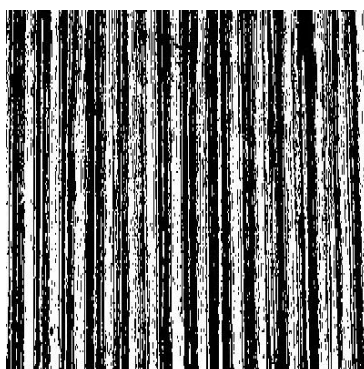


Рисунок 30 – Результаты автоматической бинарной сегментации изображения шероховатости

На рисунке 31 представлена гистограмма исходного изображения. По данной гистограмме была вычислена дискриминантная функция  $\eta(x_0^*)$ , результаты представлены на рисунке 32.

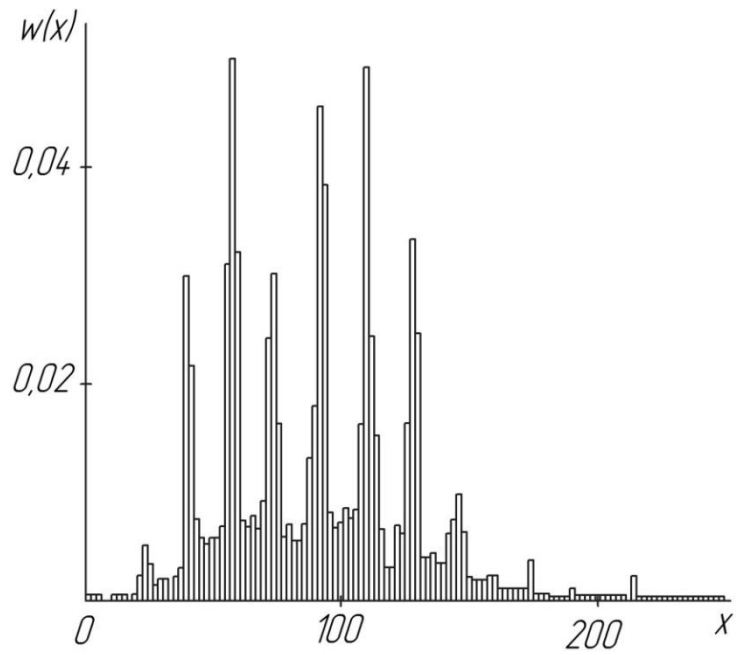


Рисунок 31 – Гистограмма изображения шероховатости

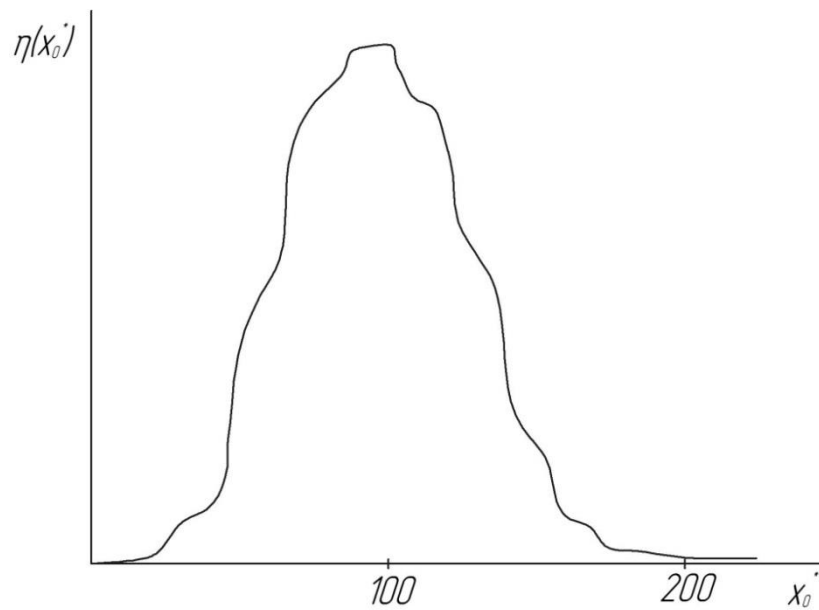


Рисунок 32 – Дискриминантная функция

Из представленной гистограммы (рисунок 31) видно, что она содержит большое количество минимумов, в связи с чем, для разделения классов невозможно определить единственный минимум. Представленная на рисунке

32 дискриминантная функция не имеет таких резких перепадов и в данном случае унимодальна. В таком случае определение порога бинарной сегментации существенно проще. Для представленного примера оптимальным является порог  $x_0 = 100$ .

Рассмотренный метод проведения бинаризации изображения дает возможность получить определенное представление о характере однородных областей наблюдаемого кадра, что дает хорошие результаты при решении поставленной задачи.

### 3.3 Текстуальный анализ изображений

С целью определения параметров шероховатости поверхности необходимо сравнить полученное бинарное изображение с эталонным бинарным изображением из базы данных. Для этого необходимо осуществить текстуальный анализ изображений [1, 26, 30].

Анализ текстуры изображения позволит: определить текстурные характеристики, как всего исследуемого изображения, так и любого его фрагмента; сохранить характеристики текстурных признаков исследуемого изображения; сравнивать текстурные признаки эталонного и исследуемого изображений.

Сравнение текстур изображений производится по алгоритму, в основу которого положен корреляционный критерий сходства.

Сравнение изображения фрагмента контролируемой поверхности  $B$  в «зоне поиска»  $\Omega$ , который ограничен размерами  $L \times L = n + m$ , производится с эталонным изображением шероховатости  $A$ , который представлен в виде матрицы  $U_0$  размера  $n \times n$ . Шаг  $h$  в плоскости  $P^2$  дискретной решетки  $hZ^2$  определяет перекрытие между фрагментами. Наблюдаемые переменные  $\{u_0(x), x = (x, y)\}$  на  $A$  или  $\{u(x)\}$  на  $B$  задаются на дискретной решетке.

Сравнение заключается в сдвиге каждого очередного фрагмента из предыдущего на один дискрет и вычислении функции сходства между



эталонным изображением фрагмента  $\{u_0(x), x \in \Gamma_A\}$  и контролируемым изображением фрагмента  $\{u(x), x \in \Gamma_B\}$ . Основное требование к функции сходства заключается в том, что она должна локализовать текстурные признаки эталонного изображения фрагмента с максимальной точностью и минимальными отклонениями. Это позволит зафиксировать на снимках точки сопряжения.

Условие соответствия элементов изображений одного объекта выглядит следующим образом:

$$u_0(x, y) = (au(x + k, y + l) + b)rect(x/n, y/n) + \varepsilon(x, y), \quad (53)$$

где  $a$  – параметр контраста;

$b$  – параметр средней освещенности;

$k, l$  – параметры относительного сдвига эталона и контролируемого образца;

$\varepsilon(x, y)$  – шум.

$$rect(x/n, y/n) = \begin{cases} 1, & x \leq n, y \leq n \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (54)$$

Как видно из выражения (53) процедура сравнения заключается в поиске параметров относительного сдвига эталона и контролируемого образца.

Для перехода к центрированным переменным при определении параметров  $k$  и  $l$  примем параметр средней освещенности неизменным по всему полю снимков. Тогда:

$$\check{u}(x, y) = u(x, y) - \bar{u}, \quad \bar{u} = \frac{1}{L^2} \sum_{(x,y) \in \Omega} u(x, y), \quad (55)$$

$$\check{u}_0(x, y) = u_0(x, y) - \bar{u}_0, \quad \bar{u}_0 = \frac{1}{n^2} \sum_{x,y=1} u_0(x, y). \quad (56)$$

Примем среднеквадратичную ошибку в точке  $(k, l)$  как характеристику отличия:

$$\varepsilon_a^2(k, l) = \sum_x \sum_y [\check{u}_0(x, y) - a\check{u}(x + k, y + l)]^2. \quad (57)$$

Минимизация данной функции осуществляется путем перебора всех допускаемых сдвигов эталона по заданной области контролируемого изображения. Схождение будет достигнуто, если будет выполнено условие:

$$\varepsilon_a^2(k, l) \leq \lambda, \quad (58)$$

где  $\lambda$  – установленный порог.

Оценку параметра контраста  $a$  находим исходя из требования обеспечения минимальной ошибки:

$$(\varepsilon_a^2(k, l))'_a = 0. \quad (59)$$

Подставляя в (57) полученное  $a$  получаем:

$$\varepsilon_a^2(k, l) = \sum_x \sum_y [\check{u}_0(x, y)]^2 - \frac{[\sum_x \sum_y \check{u}_0(x, y)\check{u}(x, y)]^2}{\sum_x \sum_y [\check{u}(x, y)]^2}. \quad (60)$$

В данном выражении первый член представляет собой постоянную величину, которая не зависит от параметров относительного сдвига эталона и контролируемого образца и не влияет на точку экстремума данной функции, поэтому можно выполнить преобразование выражения (60):

$$\bar{\varepsilon}_a^2(k, l) = \frac{[\sum_x \sum_y \check{u}_0(x, y)\check{u}(x, y)]^2}{\sum_x \sum_y [\check{u}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [\check{u}_0(x, y)]^2}. \quad (61)$$

Тогда максимум коэффициента корреляции текущего фрагмента с эталоном определяется из выражения:

$$\hat{r}(k, l) = \frac{[\sum_x \sum_y \tilde{u}_0(x, y) \tilde{u}(x, y)]^2}{\{\sum_x \sum_y [\tilde{u}(x, y)]^2 \sum_x \sum_y [\tilde{u}_0(x, y)]^2\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (62)$$

Порог  $r_{\text{пор}}$  для величины взаимной корреляции  $\max \hat{r}(k, l)$  является условием достоверности обнаружения. Обнаружение считается достоверным, если выполняется условие:

$$\max \hat{r}(k, l) \geq r_{\text{пор}}. \quad (63)$$

В этом случае гарантируется действительное сходство контролируемого элемента с эталонным изображением с заданной вероятностью.

При использовании случайных выборок для определения порога используются функция распределения коэффициента корреляции и доверительная вероятность принятия решения о действительном сходстве фрагментов.

Рассмотренные в данном разделе математические модели функционирования системы контроля позволяют качественно решить задачи связанные с обработкой полученного оптической системой изображения. В частности, решены задачи по восстановлению изображений при искажении их такими дефектами как «смаз» и «расфокусировка». Описан алгоритм бинарной сегментации полученного после восстановления изображения. Предложен алгоритм текстурного анализа изображения с целью получения характеристик шероховатости контролируемой поверхности.

## 4 Разработка алгоритмов функционирования и аппаратной части системы контроля

### 4.1 Разработка алгоритмов функционирования системы контроля

Предполагается, что проектируемая система базируется на цифровой обработке изображений при помощи ЭВМ.

Получаемое от цифровой камеры изображение сравнивается с имеющимися в базе данных образцов шероховатостями при помощи алгоритмов контроля, которые работают на основе математических моделей обработки изображений, рассмотренных в пункте 3 данной диссертации. Исходя из данных соображений, была разработана функциональная схема системы контроля шероховатости, представленная на рисунке 33.

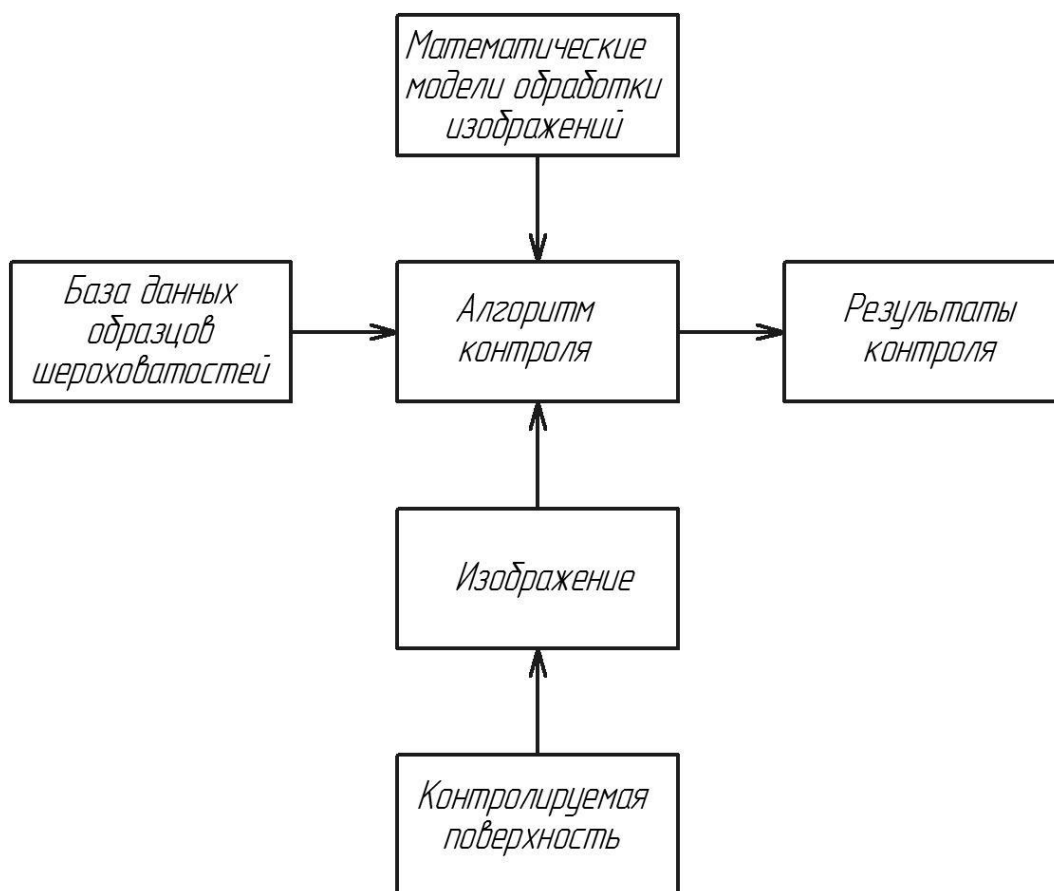


Рисунок 33 – Функциональная схема системы контроля шероховатости

Центральным вопросом при цифровой обработке изображений является создание соответствующих алгоритмов обработки отвечающих требованиям конкретной задачи. Разработаем алгоритм цифровой обработки изображения в случае контроля шероховатости поверхности (рисунок 34).

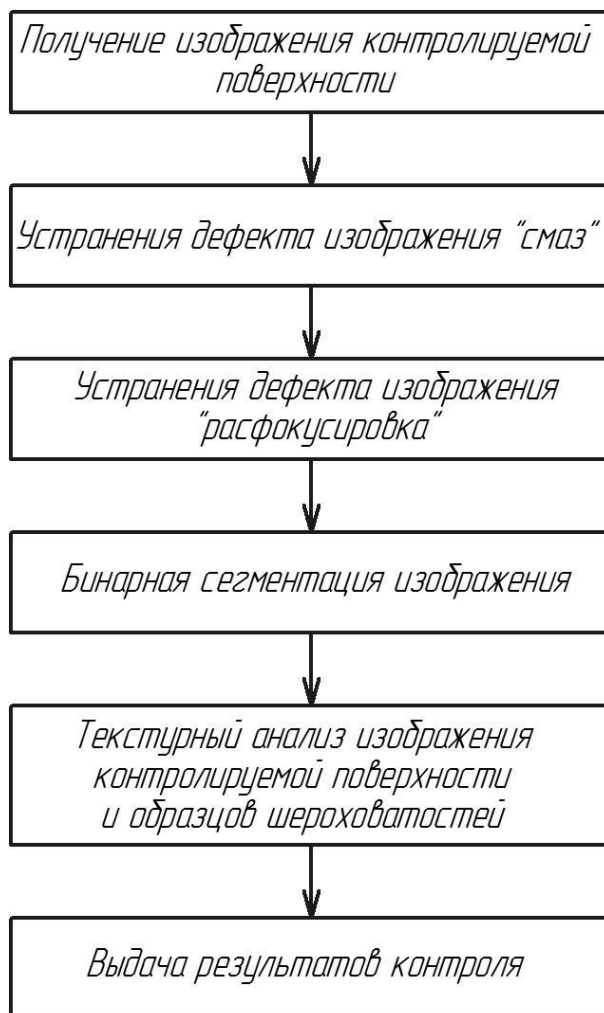


Рисунок 34 – Алгоритм цифровой обработки изображения в случае контроля шероховатости поверхности

Первым этапом является получение изображения контролируемой поверхности. Для этого предлагается использовать цифровую камеру на основе ПЗС матрицы. С точки зрения получения изображения данное решение является оптимальным, так как получаемое изображение имеет цифровой вид и не требует предварительной обработки для ввода изображения в систему обработки информации. Однако такой способ

получения исходного изображения имеет один существенный недостаток, который заключается в том, что изображение может иметь существенные дефекты, которые не позволяют выполнять непосредственную оценку изображения. Искаженное изображение содержит большое количество ложных сигналов, что приведет к некорректной работе алгоритмов оценки изображения.

Возникновение дефектов изображения связано с возможным воздействием на систему контроля внешних производственных вибраций, что приведет к движению камеры. Даже незначительные смещения камеры во время экспозиции могут привести к появлению таких дефектов изображения как «смаз» и «расфокусировка». В связи с этим необходимо провести предварительное восстановление полученного изображения, что позволит получить высокую вероятность корректного определения шероховатости поверхности по цифровому изображению. В нашем случае необходимо ввести в алгоритм цифровой обработки блоки устранения с полученного изображения соответствующих дефектов.

Возникновение дефекта «смаз» происходит при перемещении контролируемой поверхности и камеры относительно друг друга. Этот эффект связан с тем, что полученное в таких условиях изображение контролируемой поверхности будет результатом наложения со смещением нескольких исходных изображений. Математическая модель обработки изображения для устранения этого дефекта была рассмотрена в пункте 3.1.

Возникновение дефекта «расфокусировка» также происходит при перемещении контролируемой поверхности и камеры относительно друг друга. В этом случае механизм возникновения дефекта связан с изменением расстояния от поверхности до объектива и непопаданием контролируемой поверхности в объектив, то есть не выдерживается фокусное расстояние. Пучок лучей, формируемый точкой на контролируемой поверхности, не сходится в точку на изображении, если в фокус объектива не попадает плоскость формируемого изображения. Данный дефект характеризуется

четкостью изображения, которая определяется способностью системы считывать и воспроизводить мелкие детали контролируемой поверхности. Соответственно наличие или отсутствие, а также характеристики «расфокусировки» зависят, прежде всего, от разрешающей способности применяемой камеры и характеристик ее ПЗС матрицы. Математическая модель обработки изображения для устранения этого дефекта была подробно рассмотрена в пункте 3.1.

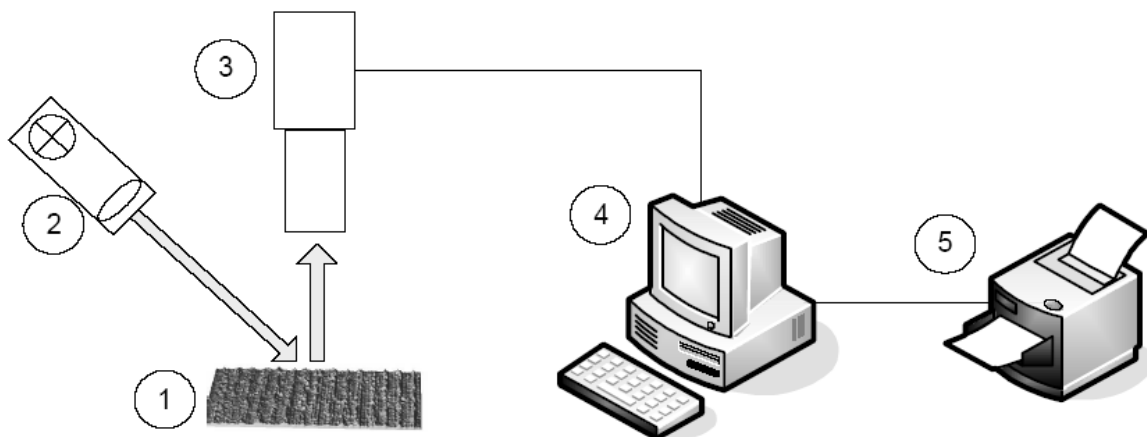
После проведения процедуры восстановления изображения выполняется бинарная сегментация изображения. Оценка информативных признаков цветного изображения задача весьма сложная с точки зрения разработки соответствующих математических моделей и их программной реализации, а также требует больших объемов вычислений. Выполнение бинаризации позволяет сократить количество характерных признаков изображения, что снижает объемы вычислений при определении информативных признаков изображения и делает возможным выполнение самой процедуры. Реализация данных соображений в виде соответствующей математической модели представлены в пункте 3.2 данной работы.

Получение оценки шероховатости контролируемой поверхности производится путем сравнения ее с образцом из банка данных шероховатостей на основе проведения текстурного анализа. Математическая модель процедуры проведения данного анализа представлена в пункте 3.3.

Выдача результатов может быть произведена как на бумажном носителе или может быть записана в электронном виде в банке данных. Кроме того, электронные результаты могут быть использованы для обработки информации и выработки управляющих воздействий в САQ-системах.

Оценка эффективности предлагаемого метода контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал, основанного на применение оптического устройства для получения изображения и цифровых методов его обработки, а также отработка алгоритмов его функционирования

проводилась на лабораторной установке, схема которой представлена на рисунке 35.



1 – контролируемая поверхность; 2 – источник света; 3 – оптическое устройство получения изображения; 4 – персональный компьютер; 5 – принтер

Рисунок 35 – Схема лабораторной установки

Оценка эффективности и отработка предлагаемого алгоритма цифровой обработки и математических моделей для его реализации выполнялась с использованием образцов шероховатостей, изготовленных из стали 45. Первичная фиксация параметров шероховатости эталонов для занесения их в базу данных, а также исследуемых образцов выполнялась с использованием профилографа SurfTest Extreme SV-3000CNC.

Установка для контроля шероховатости предлагаемым методом была настроена следующим образом: размер получаемого цифровой камерой изображения 3 мм на 2,5 мм; угол наклона светового потока по отношению к контролируемой поверхности 45°. В результате камера выдавала изображение с разрешением 320×240 пикселей. Полученные изображения поверхностей образцов показаны на рисунке 36.

Предварительные измерения при помощи профилографа показали, что образцы имеют следующие значения шероховатостей:  $Ra = 6,42$  мкм для образца №1,  $Ra = 0,65$  мкм для образца №2,  $Ra = 0,083$  мкм для образца



№3. Представленные значения являются результатом статистической обработки для 25 измерений каждого из образцов.

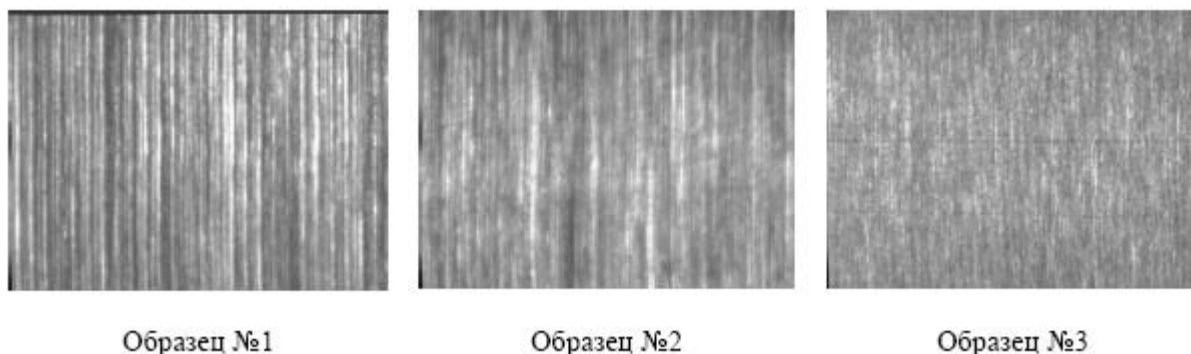


Рисунок 36 – Изображения поверхностей образцов

Отличия исследуемых образцов, представленных на рисунке 36, видны даже без использования специальных технических средств.

Определенный интерес для понимания принципа работы системы представляет результат проведения бинаризации изображений образцов (рисунок 37).

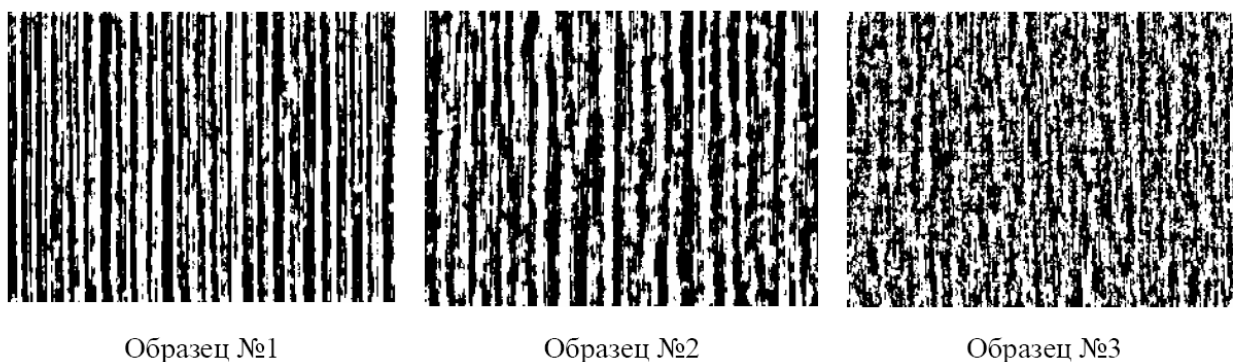


Рисунок 37 – Изображения поверхностей образцов после бинаризации

Данные изображения наглядно демонстрируют, как шероховатость контролируемых поверхностей влияет на структуру их бинарного отображения. Например, у образца №1 наблюдается четко выраженная ориентация текстуры в виде полос по вертикали, а у образца №3 четко

выраженной ориентации текстуры не наблюдается. У образца №2 наблюдается период чередования черных и белых полос в текстуре увеличен по сравнению с образцом номер №1. Расположение полос объясняется влиянием различных факторов на формирование микрорельефа в процессе обработки поверхностей. Можно предположить, что чем менее ориентирована бинарная текстура поверхности, тем больше влияние оказывали случайные факторы при формировании данной поверхности.

Обработка исследуемых образцов по предложенному алгоритму позволила получить следующие результаты значений шероховатостей:  $Ra = 6,3$  мкм для образца №1,  $Ra = 0,63$  мкм для образца №2,  $Ra = 0,08$  мкм для образца №3. Отклонения от результатов измерений при использовании профилометра объясняется тем, что система при проведении сравнения с базой данных выбирает из нее наиболее близкий по своим текстурным признакам эталон и присваивает контролируемому образцу его значение. Для увеличения точности контроля необходимо расширять базу эталонов шероховатостей поверхностей. Следует заметить, что проектируемая система не имеет цель получить абсолютное значение шероховатости, она лишь автоматизирует процесс визуального контроля шероховатости. Полученная точность измерений является достаточной для выполнения операций контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал непосредственно на рабочем месте.

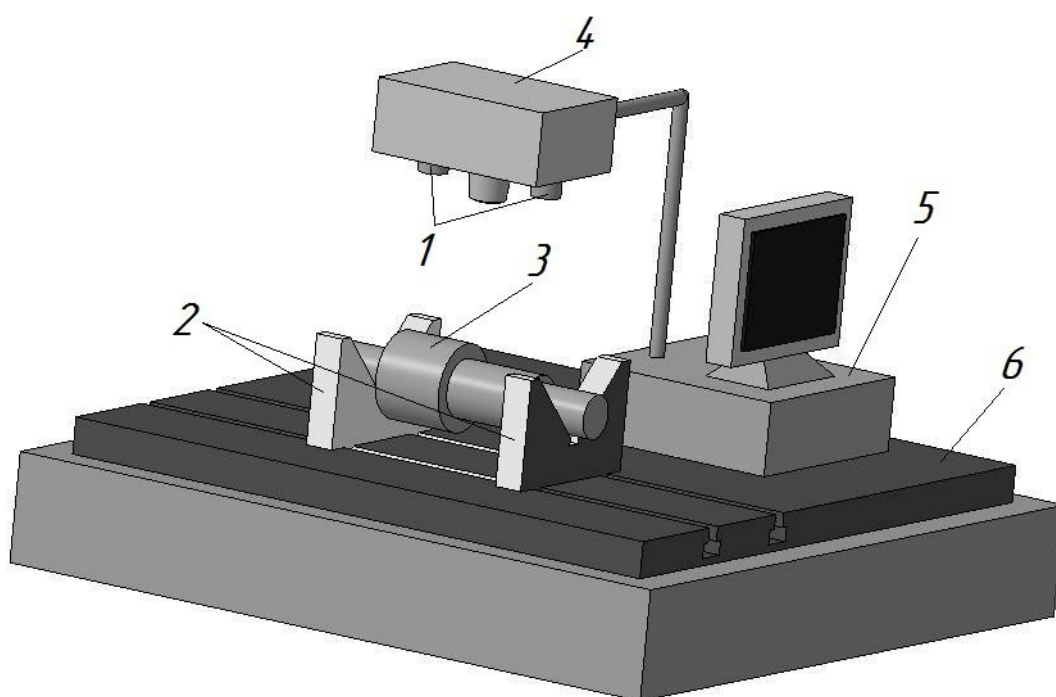
Время обработки изображения зависит от множества факторов. Основные из них: наличие и характеристики дефектов на изображении, характеристики применяемой вычислительной системы, количество эталонов в базе данных и ряд других.

## **4.2 Разработка аппаратной части системы контроля**

Основой для аппаратной части проектируемой системы контроля являются цифровая камера с ПЗС матрицей и персональный компьютер.

Схема установки для контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал с учетом особенностей контролируемых деталей представлена на рисунке 38.

Установка состоит из стола 6, на котором находятся установочные элементы 2 для контролируемого образца 3 и персональный компьютер 5 в качестве блока обработки и вывода информации. Над деталью закреплена цифровая камера 4 и осветители 1. Камера с помощью шины соединена с персональным компьютером.



1 – осветители; 2 – установочные элементы; 3 – контролируемый образец; 4 – цифровая камера; 5 – персональный компьютер; 6 – стол  
Рисунок 38 – Схема установки для контроля шероховатости

Процесс контроля выглядит следующим образом. Деталь, шероховатость поверхностей которой необходимо проконтролировать, устанавливается на установочные элементы, выполненные в виде призм. С помощью цифровой камеры получается изображение контролируемой поверхности вала. В качестве камеры может быть использована любая цифровая камера, применяемая в системах машинного оптического зрения.

При выборе камеры следует помнить о том, что ее разрешение непосредственно влияет на качество контроля. Для получения качественного изображения используется местное освещение, которое создают осветители, оснащенные галогенными лампами. Такой тип ламп выбран с целью исключения мерцания света, так как это может вызвать появление дополнительных шумов на исходном изображении. Заметим, что освещенность исследуемой поверхности должна быть равной освещенности эталонных образцов. Полученное изображение по шине передается в персональный компьютер, где происходит его обработка и сравнение с эталонными образцами, хранящимися в базе данных в соответствии с алгоритмом и математическими моделями, разработанными в пункте 3 и пункте 4.1 данной магистерской диссертации. Конечным результатом обработки является качественная оценка шероховатости исследуемой поверхности. Результат контроля выводится на экран персонального компьютера, выводится на бумажный носитель или отправляется в базу данных для дальнейшей статистической обработки и использования в других системах компьютерно-интегрированного производства.

## Заключение

Результатом проведенной работы стало повышение качества и быстродействия контроля шероховатости наружных поверхностей деталей типа вал на основе анализа известных средств и методик, используемых для измерения шероховатости, а также теории цифровой обработки изображений путем разработки системы бесконтактного контроля.

Проведенный в первом разделе анализ общих характеристик шероховатости показал, что при создании системы контроля необходимо обеспечить контроль параметров  $Ra$  и  $Rz$  как наиболее информативных и получивших наибольшее применение на практике.

Во втором разделе проведен анализ методов, средств и алгоритмов контроля шероховатостей поверхностей используемых на современных предприятиях машиностроительного профиля показал, что в настоящее время не существует систем, которые в полной мере удовлетворяли бы всем требованиям для проведения эффективного контроля непосредственно на рабочем месте. Было принято решение построить систему на базе цифровой обработке изображений.

Основными этапами при обработке изображений шероховатости поверхностей являются: восстановление, бинарная сегментация, текстурный анализ изображений. В ходе работы были выявлены наиболее часто встречаемые дефекты изображений в ходе контроля шероховатостей и предложены математические модели их устранения. С целью снижения объемов обрабатываемой информации и ускорения процесса контроля был предложен метод бинарной сегментации на основе пороговой обработки с автоматическим определением порога. Непосредственно сравнение получаемого после бинарной обработки изображения с эталоном из базы данных производится на основе математической модели текстурного анализа этих изображений. Разработке данных вопросов посвящен третий раздел.

Четвертый раздел посвящен разработке функциональной схемы и алгоритма цифровой обработки изображения проектируемой системы исходя из ее служебного назначения. Проводится оценка эффективности и отработка предлагаемого алгоритма цифровой обработки и математических моделей для его реализации на примере реальных образцов шероховатостей. Кроме того, в данном разделе предлагается реализация аппаратной части проектируемой системы в виде ее общей компоновочной схемы.

Предлагаемая система контроля шероховатости обладает универсальностью. Контроль шероховатости поверхностей может производиться для различных по габаритным характеристикам деталей, обработка которых может быть выполнена на металлорежущих станках различного типа. Измерения могут производиться в производственных или лабораторных условиях, как готовой детали, так и в течение технологического процесса в специально предусмотренное программой время. В отличие от предлагаемых отечественных и зарубежных приборов и систем данный способ менее чувствителен к загрязнениям поверхности, условиям её освещенности источником света и внешним помехам. К преимуществам спроектированной системы контроля также можно отнести отсутствие необходимости в контролерах высокой квалификации, требуются минимальные навыки эксплуатации цифровой техники.

## Список используемых источников

1. Альзаки Х.М.Х. Текстурная сегментация изображений на основе контурных образующих : автореферат дис. ... кандидата технических наук : специальность 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации / Х.М.Х. Альзаки ; Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники". – Минск, 2018. – 21 с.
2. Альмияхи О.М.Х. Адаптивная сегментация изображений на основе древовидных структур : автореферат дис. ... кандидата технических наук : по специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации / О.М.Х. Альмияхи ; Учреждение образования Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – 22 с.
3. Бериков В.Б. Методы кластерного анализа данных и сегментации изображений : учебное пособие / В.Б. Бериков ; М-во образования и науки РФ, Новосибирский гос. ун-т, Мех.-мат. фак. – Новосибирск : РИЦ НГУ, 2015. – 97 с.
4. Валужева Н.Н. Приборы для измерения шероховатости и волнистости поверхности : Учеб. пособие для заоч. курсов повышения квалификации ИТР по техн. контролю при мех. обраб. / Н.Н. Валужева, Н.А. Прохорова, Н.А. Табачникова. – М. : Машиностроение, 1983. – 47 с.
5. Введение в сегментацию растровых изображений : учебное пособие / А. А. Востриков, А. М. Сергеев, Н. В. Соловьев, Т. Н. Соловьева ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2017. – 34 с.
6. Вейвлет-анализ топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов : монография / В.А. Ткаль

[и др.] ; Федеральное агентство по образованию, Новгородский гос. ун-т им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород : Новгородский гос. ун-т, 2006. – 397с.

7. Верденская Н.В. Методы сегментации изображений и их применение в автоматических системах распознавания объектов : автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук : 05.13.18 / Радиотехн. ин-т им. А. Л. Минца. – Москва, 2002. - 23 с.

8. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс ; пер. с англ. Л И. Рубанова, П.А. Чочиа ; науч. ред. П.А. Чочиа. – Третье изд., испр. и доп. – Москва : Техносфера, 2019. – 1103 с.

9. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. требования. – Введ. 1975–01–01. – М. : Стандартиформ, 2018. – 14 с.

10. ГОСТ 9378-93 (ИСО 2632-1-85, ИСО 2632-2-85). Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия : Переизд. Март 2002. – Взамен ГОСТ 9378-75. – Изд. офиц. ; введ. 01.01.97. - Минск : Изд-во стандартов, 2003.

11. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. Пособие / И.С.Грузман, В.С.Киричук, В.П. Косых и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

12. Гуревич Ю.Е. Расчет и основы конструирования деталей машин : учебник для вузов. В 2 т. Т. 1. Исходные положения. Соединения деталей машин. Детали передач / Ю. Е. Гуревич, А. Г. Схиртладзе. – Москва : КУРС : ИНФРА-М, 2018. – 239 с.

13. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. для студентов вузов, обуч. по направлениям подготовки бакалавров и магистров, и дипломированных специалистов в обл. техники и технологии / Ю.В. Димов. – Гриф МО. – Санкт-Петербург : Питер, 2013. – 496 с.

14. Журавлев Ю.И. "Распознавание". Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. – Москва : ФАЗИС, 2006 М. : Типография "Наука"



РАН. – 176 с.

15. Кирьянов К.А. Устойчивые методы восстановления изображений во встроенных системах для повышения точности измерений механических величин на объектах : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.11.01 / Кирьянов Константин Александрович. – Санкт-Петербург, 2013. – 23 с.

16. Клименков С.С. Нормирование точности и технические измерения в машиностроении: учебник / С. С. Клименков. – Минск : Новое знание, 2017 ; Москва : ИНФРА-М, 2017. – 248 с.

17. Лебедько Е.Г. Теоретические основы передачи информации : [учеб. пособие] / Е.Г. Лебедько. – Гриф УМО. – Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. – 349 с.

18. Методы компьютерной обработки изображений : учеб. пособие для вузов / М. В. Гашников [и др.] ; под ред. В. А. Сойфера. – 2-е изд., испр. ; Гриф МО. – Москва : Физматлит, 2003. – 780 с.

19. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В.В. Клюев [и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2005. – 656 с.

20. Оборудование и методы контроля микрорельефа дифракционных оптических элементов : учебное пособие / А.В. Волков и др. ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева". – Самара : Изд-во СГАУ, 2007. – 78 с.

21. Поройков А.Ю. Кросскорреляционная обработка изображений в оптических методах диагностики потоков и деформаций : учебное пособие по курсам "Компьютерная обработка изображений" для студентов, обучающихся по направлению "Электроника и микроэлектроника" / А.Ю. Поройков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет "МЭИ". – Москва : Изд-во МЭИ, 2018. – 73 с.

22. Пылькин А.Н. Методы и алгоритмы сегментации изображений : [монография] / А.Н. Пылькин, Р.В. Тишкин. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2010. – 91 с.

23. Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. пособие / Я. М. Радкевич, А. Г. Схиртладзе, Б. И. Лактионов. – 2-е изд. – Саратов : Вузовское образование, 2019. – 790 с.

24. Савичева С.В. Система распознавания отдельных и наложенных плоских объектов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.01 / Савичева Светлана Владимировна. – Владимир, 2013. – 192 с.

25. Цапаев А.П. Методы и алгоритмы распознавания изображений для обнаружения дефектов внутренней поверхности труб с целью автоматизации визуального контроля : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.17 / Цапаев Алексей Петрович. – Нижний Новгород, 2013. – 20 с.

26. Шапиро Л. Компьютерное зрение : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Прикладная информатика (по областям)" / Л. Шапиро, Дж. Стокман ; пер с англ. А. А. Богуславского под ред. С. М. Соколова. – 2-е изд. (электронное). – Москва : Бином. Лаб. знаний, 2013. – 752 с.

27. Ширмер Т. Оцифровка и реставрация фотографий, негативов и диапозитивов : сканирование и пересъемка цветных и черно-белых фотографий, негативов и диапозитивов, реставрация выцветших фотоматериалов и их ретуширование, оптимальный подбор оборудования и программ для обработки изображений : [перевод с немецкого] / Т. Ширмер, А. Хайн. – Санкт-Петербург : БХВ–Петербург, 2010. – 216 с.

28. Chen, H. An L0 regularized cartoon-texture decomposition model for restoring images corrupted by blur and impulse noise / H. Chen, Z. Xu, Q. Feng, Y. Fan, Z. Li // Signal Processing: Image Communication 82 – 2020. P. 57 – 62.

29. Fang F. Removing moiré patterns from single images / F. Fang, T. Wang, S. Wu, G. Zhang // Information Sciences 514 – 2020. P. 56 – 70.

30. Kheirat R.A. Improved smoothness priors using bilinear transform / R.A.

Kheirati, C. Jutten // *Signal Processing* 169 – 2020. P. 107 – 118.

31. Li C. Defocus Fuzzy Image Restoration / C. Li, G. Li, Y. Sun, D. Jiang, S. Xu // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 466(1) – 2018. P. 12 – 46.

32. Nakazawa T. Wafer map defect pattern classification and image retrieval using convolutional neural network / T. Nakazawa, D.V. Kulkarni // *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. – 2018. T. 31. №2. P. 309-314.

33. Ren Y. Review of convolutional neural network optimization and training in image processing / Y. Ren, X. Cheng // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 10. Cep. "Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation" – 2019. P. 110–123.

34. Wang H. Low-rank matrix recovery via smooth rank function and its application in image restoration / H. Wang, R. Zhao, Y. Cen, F. Zhang, Q. He, L. Liang, M. Zeng / *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. – 2018. T. 9. № 9. P. 1565–1576.

35. Weber L. Registration of phase-contrast images in propagation-based x-ray phase tomography / L. Weber, A. Hänsch, F. Peyrin, S. Rit, M.Langer, A. Pacureanu, P.Cloetens, U.Wolfram // *Journal of Microscopy*. Vol. 269 №1. – 2018. P. 36–47.

36. Wu Y. Analysis and reduction of the phase error caused by the non-impulse system psf in fringe projection profilometry / Y. Wu, X. Cai, J. Zhu, H. Yue, X. Shao, // *Optics and Lasers in Engineering* 127 – 2020. P. 105–118.

37. Xue F. Recursive sure for image recovery via total variation minimization / F. Xue, J. Liu, X. Ai // *Signal, Image and Video Processing*. – 2019. T. 13. № 4. P. 795–803.

38. Zhu X. Attention-aware perceptual enhancement nets for low-resolution image classification / X. Zhu, Z. Li, X. Li, S. Li, F. Dai // *Information Sciences* 515 – 2020, P. 233 – 247.