

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)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

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

на тему Разработка системы контроля наружных дефектов поверхностей деталей типа вал

Обучающийся

А.С. Якушкин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд. техн. наук, доцент А.А. Козлов

руководитель

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

## Содержание

Введение .....	3
1 Анализ дефектов наружных поверхностей .....	5
2 Анализ методов контроля дефектов наружных поверхностей .....	18
3 Разработка математических моделей автоматизированной системы контроля .....	24
3.1 Подготовка изображения .....	24
3.2 Бинаризация изображения .....	37
3.3 Оценка геометрических характеристик дефектов .....	46
4 Разработка алгоритмов работы и структуры системы контроля .....	55
4.1 Разработка алгоритмов работы системы контроля .....	55
4.2 Разработка структуры системы контроля .....	61
Заключение .....	68
Список используемых источников .....	69

## Введение

Технологические процессы механической обработки деталей типа вал предъявляют определенные требования к качеству исходных заготовок независимо от метода их получения. Основные требования связаны с отклонениями формы, взаимного расположения поверхностей, точностью выполнения размеров, шероховатостью, наличием внутренних и внешних дефектов. От качества исходных заготовок во многом зависит качество изготавливаемых деталей. Технология изготовления деталей также, во многом, определяется качеством исходных заготовок. Большая часть допустимых дефектов должна быть исправлена или убрана в ходе выполнения черновых технологических операций механической обработки.

Наиболее распространенными дефектами заготовок являются различные внешние дефекты. Причины их возникновения связаны, прежде всего, с технологией получения заготовок, однако, часть дефектов возникают в ходе транспортировки заготовок, что делает актуальным не только контроль в заготовительном цехе, но и контроль непосредственно перед механической обработкой. На данный момент наиболее приемлемым и распространенным способом контроля внешних дефектов заготовок является визуальный контроль, что объясняется его простотой и относительно высокой скоростью. В большинстве случаев данный метод контроля показывает хорошие результаты, однако ему присущи некоторые серьезные недостатки. В первую очередь данный метод контроля не может гарантировать сто процентную вероятность обнаружения дефектов, что объясняется физиологическими особенностями контролера. Следующий недостаток возникает в случае необходимости определить не только наличие самого дефекта, но и оценить его. В таком случае классификация дефекта производится при помощи классификаторов [3], исходя из опыта контролера, что неизменно скажется на качестве контроля. Также затруднительно определение размеров дефектов, что делает невозможным использование

визуального метода в САQ-системах. Таким образом, визуальный метод контроля следует признать относительно годным только для случая необходимости проведения качественного контроля. В случае компьютеризации производственных процессов, например, при внедрении концепции компьютерно-интегрированного производства, данный метод малопригоден.

Следующий недостаток визуального метода связан с производительностью процесса контроля. В первую очередь, она зависит от опыта контролера и его навыков. Также скорость контроля может изменяться в течение рабочей смены, что объясняется психофизиологическими особенностями контролера. Это делает невозможным повышение производительности процесса контроля без увеличения количества постов контроля.

Решение проблем метода визуального контроля возможно путем применения инструментального контроля. Однако, данный метод лишь частично решает проблемы, так как непосредственно в процессе контроля участвует контролер, который выполняет ряд ключевых функций. Это приводит к влиянию человеческого фактора и, как следствие, снижению эффективности контроля.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки системы контроля наружных дефектов поверхностей деталей типа вал. Целью магистерской диссертации поставим проектирование системы контроля, позволяющей обнаружить и определить геометрические параметры дефектов поверхностей деталей типа вал, не требующей непосредственного участия контролера в процессе контроля.

Сформулируем задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели: провести анализ дефектов наружных поверхностей, а также анализ применимых методов и систем контроля; разработать математические модели автоматизированной системы контроля; разработать алгоритмы работы и структуру системы контроля.

## 1 Анализ дефектов наружных поверхностей

Проведем анализ дефектов, возникновение которых возможно в процессе получения заготовок деталей типа вал. Это позволит в дальнейшем выбрать метод контроля и определить основные технические характеристики, предъявляемые к проектируемой системе контроля.

Согласно действующему стандарту все дефекты, возникающие на поверхностях металлопродукции из стали и сплавов подразделяют на следующие группы [6]:

- дефекты поверхности непрерывнолитых заготовок, обусловленные процессами выплавки, обработки и разливки;
- дефекты поверхности металлопродукции, обусловленные качеством отливок, слитков, слябов, блюмов и непрерывнолитых заготовок;
- дефекты поверхности металлопродукции, обусловленные процессом деформации;
- дефекты поверхности металлопродукции, обусловленные процессом отделки.

Возникновение части описанных в данном стандарте дефектов не возможно на заготовках деталей типа вал вследствие особенностей их формы. Поэтому проанализируем имеющиеся данные по дефектам и приведем описание тех из них, возникновение которых наиболее вероятно в рассматриваемом случае. Наименование дефектов и их характеристические описания в соответствии со стандартом [6] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Дефекты наружных поверхностей

Термин	Определение
вдавленная окалина	дефект поверхности в виде вкраплений первичной окислы или конгломерата окислы, налипших на элементах поддерживающей и направляющей арматуры тянуще-правильного аппарата машины непрерывного литья заготовок
заворот корочки	дефект поверхности в виде несплошности, образующейся в результате попадания окисленной или шлаковой корочки металла с

Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
–	мениска на поверхность заготовки
наплыв	дефект поверхности в виде неравномерной и нерегулярной поверхностной волнистости, являющейся следствием залива металла за закристаллизовавшуюся и отошедшую от стенки кристаллизатора оболочку заготовки при колебаниях скорости разливки и уровня металла в кристаллизаторе, а также при прорывах кристаллизуемой корочки металла с последующим их "залечиванием"
неметаллическое включение	дефект поверхности в виде неметаллических частиц, образующихся в результате несоблюдения заданных режимов раскисления стали, температурных режимов, неравномерной подачи стали в кристаллизатор, применения эррозионнонестойких огнеупорных материалов и так далее
поперечная трещина	дефект поверхности в виде разрывов металла по ребрам или граням заготовки в поперечном направлении (перпендикулярно направлению разливки металла), возникших из-за увеличения сил трения между заготовкой и рабочей поверхностью кристаллизатора (избыточная конусность, деформация рабочей поверхности кристаллизатора, недостаточное количество смазки, отклонения в центровке кристаллизатора относительно технологической оси ручья и так далее)
поперечная ужимина	дефект в виде поперечного углубления, размеры которого уменьшаются по направлению к оси кристаллизатора
пояс	дефект поверхности в виде разрыва, охватывающего часть или весь периметр заготовки, образовавшийся в результате длительного перерыва в подаче металла в кристаллизатор либо при чрезмерно резком понижении скорости разливки
продольная трещина	дефект поверхности в виде разрыва металла, наблюдающегося по ребрам и прилегающим к ним участкам или граням заготовки в продольном направлении (параллельно направлению разливки металла) и образующегося из-за неравномерности первичного охлаждения, неотцентрированной струи стали из промковша в кристаллизатор, изношенности гильзы, неравномерности охлаждения заготовки в зоне вторичного охлаждения, внутренних напряжений, возникающих в процессе формирования заготовки и обусловленных пониженной прочностью
продольная ужимина	дефект в виде продольных углублений (впадин, канавок), который может сопровождаться грубыми наружными продольными или внутренними трещинами (в основном по месту расположения), а также искажением профиля заготовок
риска	дефект поверхности в виде продольного линейного углубления без выступающих кромок, представляющий собой повреждение поверхности заготовки приварами металла или шлака, находящимися на поверхности направляющих роликов, роликов правки или неподвижных направляющих
сетчатые [паукообразные] трещины	дефект, представляющий собой взаимно пересекающиеся небольшие извилистые трещины в виде сетки, локализованной вокруг центра зарождения [расходящихся лучей из центров зарождения],

Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
–	распространяющиеся вдоль и поперек поверхности непрерывнолитой заготовки и представляющие собой межзеренное разрушение поверхности непрерывнолитой заготовки и слитка
складчатость	дефект поверхности, представляющий собой поперечные впадины и обусловленный неверным соотношением между частотой качания кристаллизатора, амплитудой и скоростью разливки, нарушением технологии разливки и охлаждения
трещина напряжения	дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, направленный вглубь, и образующийся на поверхности из-за неравномерного охлаждения непрерывнолитой заготовки
волосовина	дефект поверхности в виде как единичных, так и групповых нитевидных несплошностей, вышедших на поверхность при деформации имеющихся в металле неметаллических включений
раскатанное [раскованное] загрязнение	дефект поверхности, представляющий собой вытянутое в направлении деформации поверхностное загрязнение слитка или непрерывнолитой заготовки шлаком, огнеупором, теплоизоляционной смесью
раскатанные инородные металлические частицы	дефекты поверхности в виде вытянутых в направлении деформации несплошностей или надрывов произвольной формы, образовавшихся в результате деформации имеющихся в металле посторонних металлических частиц, попавших в поверхностный слой металла при разливке
раскатанная [раскованная] корочка	дефект поверхности, представляющий собой частичное отслоение (разрыв металла), образовавшееся в результате раскатки [расковки] завернувшихся корочек, имевшихся на поверхности или затянутых в тело слитка или непрерывнолитой заготовки и представляющих собой окисленный металл, сопровождающийся скоплениями неметаллических включений сложного состава
раскатанная окалина	дефект поверхности в виде вытянутых вкраплений первичной окалины или конгломерата окалины, образовавшийся в результате деформации имеющейся вдавленной окалины на поверхности непрерывнолитой заготовки
раскатанный пригар	дефект поверхности в виде темного пятна неправильной формы, образовавшегося от раската куска металла, приварившегося к слитку из-за нарушения технологии разливки или из-за неисправности изложницы
раскатанный [раскованный] пузырь	дефект поверхности в виде тонкого прямолинейного продольного углубления различной протяженности и глубины, образовавшегося при раскатке [расковке] наружного или подповерхностного газового пузыря слитка или непрерывнолитой заготовки
раскатанная [раскованная] трещина	дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, образовавшийся при раскатке [расковке] продольной или поперечной трещины слитка или непрерывнолитой заготовки
раскатанные [раскованные] сетчатые трещины	дефекты поверхности в виде тонких разрывов и плен, образовавшихся при деформации слитка или непрерывнолитой заготовки, запороченных сетчатыми трещинами, образующимися из-за нарушения теплоотвода, работы шлакообразующей смеси, конструкции кристаллизатора

Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
слиточная [сталеплавильная] плена	дефект поверхности в виде отслоения языкообразной формы, частично соединенного с основным металлом, образовавшегося от раската окисленных брызг, заплесков и грубых неровностей поверхности слитка или непрерывнолитой заготовки, а также вследствие раската или расковки внутренних и поверхностных дефектов непрерывнолитой заготовки, обусловленных дефектами внутренней поверхности изложницы или кристаллизатора, поперечных и продольных трещин на гранях и ребре слитка, неметаллических включений на поверхности и подповерхностном слое слитка и другими нарушениями сталеплавильного производства
слиточная [сталеплавильная] рванина	дефект поверхности в виде разрыва, образовавшегося в начале прокатки (ковки) по участкам слитка или непрерывнолитой заготовки, пораженным дефектами
вкатанная инородная частица	дефект поверхности в виде остатков подмоточной бумаги, кусочков дерева или гуммировки роликов и других неметаллических материалов на поверхности холоднокатаного листа (рулона), ленты или сортового проката
вкатанная металлическая частица	дефект поверхности в виде приварившихся и частично закатанных кусочков металла
вкатанная окалина	дефект поверхности в виде вкраплений остатков окалины (мазковой, валковой или печной), вдавленной в поверхность металла при деформации, в том числе остатки первичной окалины, не удаленные гидросбивом после нагрева из-за высокой степени сцепления
деформационная рванина	дефект поверхности в виде раскрытого разрыва, расположенного поверх или под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокате или ковке, образовавшейся вследствие пониженной пластичности металла
закат	дефект поверхности, представляющий собой продольный прикатанный выступ уса или кромки подреза, глубоких следов зачистки и рисок
заков	дефект поверхности, представляющий собой придавленный выступ, образовавшийся при ковке в результате неравномерного обжатия
отпечаток	дефект поверхности в виде углублений или выступов, расположенных по всей поверхности или на отдельных ее участках, образовавшихся от выступов и углублений на прокатных валках, роликах или ковочном инструменте
отстающая окалина	дефект поверхности в виде отдельных участков с отслоившейся или рыхлой окалиной, образующихся при нарушении технологии нагрева перед прокаткой или при дальнейшей термической обработке
подрез	дефект поверхности в виде продольного углубления, расположенного по всей длине или на отдельных участках поверхности проката и образовавшегося вследствие неправильной настройки привалковой арматуры или одностороннего перекрытия калибра
прокатная трещина	дефект в виде линейных нарушений сплошности поверхности, образующихся при горячей прокатке вследствие неправильной калибровки, выработки калибров валков, проскальзывания в



Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
–	калибре, перегрева металла
протектор	дефект поверхности в виде шероховатых светлых полос, расположенных в форме елки, образующихся в результате перегрева металла в зоне деформации
пятно загрязнения [эмульсии, масла]	дефект поверхности в виде пятен, полос, натеков, разводов, образующихся вследствие попадания (неполного удаления) жидкости на поверхность металла и дальнейшего неравномерного окисления, термического разложения при повышенных температурах, нагреве и пригорания продуктов разложения к поверхности плоского проката
раковина-вдав	дефект поверхности горячекатаного плоского или сортового проката в виде одиночного углубления, образовавшегося при выпадении или вытравливании вкатанной инородной частицы
раковина от окалины	дефект поверхности в виде отдельных углублений, частично вытянутых вдоль направления прокатки, образующихся при вытравливании и выпадении вкатанной окалины
раскатанный отпечаток	дефект поверхности, образующийся при прокатке подката, имевшего отпечатки, а также раковины-вдавы, вмятины, продиры или следы глубокой зачистки
рванина на кромках	дефект поверхности в виде разрыва металла по кромкам (для плоского проката) или полкам (для фасонного проката), образовавшегося в результате нарушений технологии прокатки, а также при прокатке металла с пониженной пластичностью, обусловленной отклонениями от технологий выплавки, разливки, или транспортировании
прокатная риска	дефект поверхности в виде продольного линейного углубления без выступающих кромок, представляющий собой повреждение поверхности наварями металла или другими выступами изношенной или поврежденной прокатной арматуры
скворечник	дефект поверхности в виде выходящей на поверхность полости со сглаженными и окисленными стенками, образовавшейся при ковке или прокатке в результате раскрытия внутренней трещины, которая возникла под действием напряжений при нагреве холодного металла
трещина напряжения	дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, идущий вглубь под прямым углом к поверхности, образовавшийся вследствие напряжений, связанных со структурными превращениями или неравномерным нагревом и охлаждением
ус	дефект поверхности, представляющий собой продольный выступ с одной или двух диаметрально противоположных сторон прутка, образовавшийся вследствие неправильной подачи металла в калибр, переполнения калибров или неправильной настройки валков и привалковой арматуры
цвета побежалости	дефект поверхности в виде пятнистой, от желтого до синевато-серого цвета окисной пленки, образовавшейся на поверхности металла при нарушениях технологии охлаждения после прокатки или при термической обработке в результате локального нагрева поверхности металла, а также при травлении и зачистке дефектов абразивным инструментом

Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
чешуйчатость	дефект поверхности, представляющий собой отслоения и разрывы в виде сетки, образовавшиеся вследствие перегрева или пониженной пластичности металла периферийной зоны
вмятина	дефект поверхности в виде произвольно расположенных углублений различной формы, образовавшихся вследствие повреждения и ударов поверхности при транспортировании, правке, складировании и других операциях
заплески	дефект поверхности в виде полосок от натеков оплавленного металла, образующихся при нарушении технологии огневой зачистки дефектов
налет шлама	дефект в виде осадка, образовавшегося на поверхности металла при нарушении технологии травления, чистки и промывки изделия
недотрав	дефект поверхности в виде пятен или полос, образующихся при неполном или неравномерном травлении окалины
остатки окалины	дефект поверхности, представляющий собой отдельные участки поверхности, покрытые окалиной, остающиеся после механической обработки
оттенки травления	дефект поверхности в виде чередующихся темных и светлых, матовых и блестящих участков на поверхности, образовавшихся из-за неравномерного травления высоколегированного или неравномерно наклепанного металла
перегрев поверхности	дефект в виде шероховатости поверхности с крупным зерном, рыхлой окалиной и сеткой трещин по границам крупных кристаллов, образующейся при превышении температуры и времени нагрева
перетрав	дефект поверхности в виде язв, образующихся вследствие длительного травления на отдельных участках или всей поверхности металла, а также в результате изменения технологической смазки, применяемой при холодной прокатке металла, и разложения ее на стадии промасливания после травления горячекатаного металла
пятнистое науглероживание	дефект поверхности в виде черных пятен или полос, выявившихся: после травления и образовавшихся при длительном нагреве стальных изделий в науглероживающей среде; после отжига проката в колпаковых печах с защитной атмосферой и образовавшихся вследствие неполной возгонки остатков эмульсии, неудовлетворительного качества защитной атмосферы и/или неудовлетворительного качества прокатной эмульсии
пятно ржавчины	дефект поверхности в виде пятен или полос с рыхлой структурой окисной пленки, образовавшихся в результате попадания влаги и недостаточной промывки металла от травильных растворов
рябизна	дефект поверхности в виде мелких углублений, образующих полосы или сетку, наблюдаемых после удаления вкатанной окалины
торцевая трещина	дефект поверхности в виде разрывов на торцах и/или на боковых кромках плоского проката и других видов проката, образующихся при резке металла тупым или плохо настроенным инструментом, а также в интервале температур синеломкости
травильная трещина	дефект поверхности, представляющий собой разрыв, образовавшийся при травлении металла, имевшего напряжения от структурных превращений или деформации

## Продолжение таблицы 1

Термин	Определение
царапина	дефект поверхности в виде линейного углубления произвольного направления, представляющий собой повреждение поверхности металла наварями или выступами на отделочном оборудовании, а также при складировании и транспортировании металла
шлифовочная трещина	дефект поверхности в виде сетки паутинообразных или отдельных произвольно направленных поверхностных разрывов, образовавшихся при шлифовании и абразивной зачистке металла, обладающего высокой твердостью, хрупкостью и малой теплопроводностью

Анализируя приведенные в таблице 1 описания дефектов приходим к следующим выводам. Причины возникновения дефектов весьма различны. В результате зоны дефектов имеют разнообразные физико-механические и химические свойства. Это делает затруднительным использование методов контроля, основанных на изменении физико-механических и химических свойств материала. Одним из путей решения данной проблемы является применение методов контроля, основанных на системах технического зрения. Для окончательного решения о применении данных методов контроля проведем анализ изображений наиболее характерных наружных дефектов для заготовок деталей типа вал, полученных различными методами.

На рисунках 1 – 23 представлены изображения дефектов.

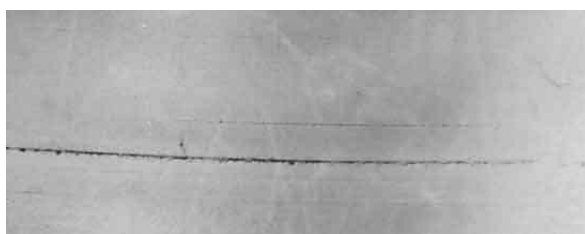


Рисунок 1 – Волосовина

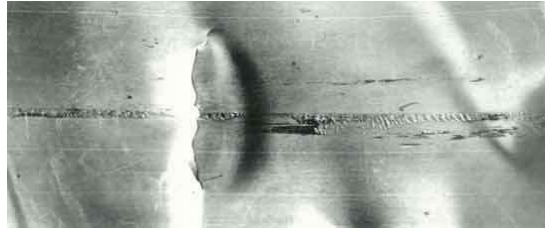


Рисунок 2 – Раскатанный (раскованный) пузырь

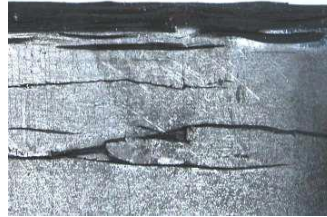


Рисунок 3 – Раскатанная (раскованная) трещина

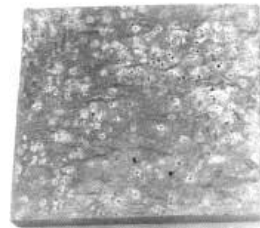


Рисунок 4 – Газовые пузыри



Рисунок 5 – Завороты корки



Рисунок 6 – Наплыв



Рисунок 7 – Поперечные трещины

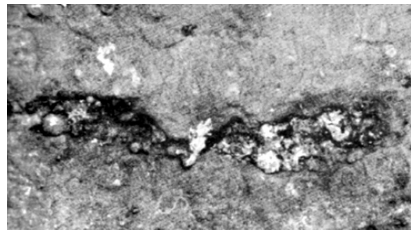


Рисунок 8 – Шлаковые включения



Рисунок 9 – Вкатанные инородные частицы



Рисунок 10 – Вкатанные металлические частицы



Рисунок 11 – Вкатанная окалина



Рисунок 12 – Закат



Рисунок 13 – Отпечатки



Рисунок 14 – Подрез



Рисунок 15 – Пятна загрязнения



Рисунок 16 – Пятна эмульсии, масла



Рисунок 17 – Раковина-вдав



Рисунок 18 – Раковины от окалины



Рисунок 19 – Риска



Рисунок 20 – Трещина напряжения

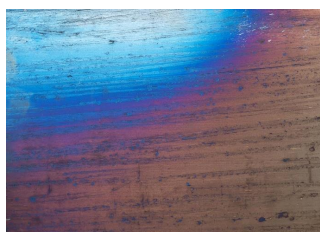


Рисунок 21 – Цвета побежалости





Рисунок 22 – Вмятины



Рисунок 23 – Пятна ржавчины

Из приведенных изображений можно сделать следующие выводы. Все дефекты визуально отличаются от основного материала и имеют четко выраженные границы. Таким образом, приходим к заключению, что возможно использование методов контроля, основанных на системах технического зрения. Такое решение позволит не только определить наличие дефекта на поверхности заготовки, но и определить его геометрические характеристики, что важно с точки зрения решаемой задачи.

В данном разделе проведен анализ дефектов, возникновение которых возможно в процессе получения заготовок деталей типа вал. По результатам данного анализа принято решение использовать при проектировании системы методы контроля, основанные на использовании технического зрения.

## **2 Анализ методов контроля дефектов наружных поверхностей**

Проведем анализ используемых методов и систем контроля дефектов наружных поверхностей деталей типа вал.

Одним из самых применяемых на практике является метод визуально-измерительного контроля. Данный метод контроля состоит из двух составляющих визуального контроля и измерительного. Визуальный контроль представляет собой первичный осмотр контролируемой детали исполнителем, а также более углубленный осмотр при помощи простейших приборов, таких как, микроскопы, лупы, увеличительные стекла и другие оптические приборы с увеличением до 20 раз. Измерительный контроль представляет собой определение геометрических параметров, обнаруженных при визуальном контроле дефектов при помощи измерительных приборов, таких как, штангенциркули, линейки, шаблоны, профилографы и так далее. Визуально-измерительный контроль позволяет провести проверку геометрии и качества поверхности. По результатам данной проверки определяются соосность, точность угла, зазоры, смещения, типы дефектов и их геометрические характеристики, такие как, ширина, глубина, площадь и другие в соответствии с требованиями технической документации.

Преимущества визуально-измерительного метода контроля:

- простота;
- высокая эффективность;
- оперативность;
- информативность;
- низкая стоимость.

Недостатки визуально-измерительного метода контроля:

- низкая производительность;
- невозможность определения внутренних дефектов;
- большое влияние человеческого фактора.

Существует ряд современных приборов для реализации визуально-измерительного метода контроля с использованием приборов фото и видео фиксации, выполненных в виде электронных видеоскопов, бароскопов, фиброскопов и так далее [17]. Данные приборы увеличивают точность и производительность метода контроля, делают возможным обследование труднодоступных поверхностей, исключают человеческий фактор. Но при этом их стоимость существенно увеличивает стоимость контроля, что ограничивает их применение узкоспециализированными задачами, связанными с исследованием внутренних и труднодоступных поверхностей.

Широкое применение для обнаружения дефектов поверхностей находят различные методы неразрушающего контроля. К ним относятся травление и капиллярные методы контроля.

Метод травления основан на способности дефекта или основного материала растворяться, что улучшает видимость дефекта. Применение данного метода может привести к повреждению поверхности детали. Кроме этого данный метод требует значительных временных затрат. Рассмотренный метод не нашел широкого применения для обнаружения поверхностных дефектов ввиду указанных выше недостатков. В связи с этим не будем проводить их подробное рассмотрение.

Рассмотрим наиболее часто встречаемые методы капиллярного контроля: метод проникающих растворов, цветной метод, люминесцентный метод, метод магнитных порошков, комбинированные методы.

Метод проникающих растворов предполагает использование жидкостей с красителями в качестве индикаторов. В ходе проведения контроля деталь погружается в жидкий раствор, затем контролируемые поверхности промываются, с нанесением на них проявителя. В результате на поверхности дефектов проявляются следы раствора.

Преимущества контроля методом проникающих растворов:

- простота;
- надежность;

- возможность использования, как для магнитных, так и для немагнитных материалов;
- низкая стоимость.

Недостатки контроля методом проникающих растворов:

- низкая производительность;
- невозможность определения внутренних дефектов;
- влияние человеческого фактора.

Цветной метод предполагает получение контрастного цветного индикаторного рисунка на фоне контролируемой поверхности в видимом спектре излучения. Метод реализуется следующим образом. Деталь помещается в красящий раствор и выдерживается там некоторое время, чаще всего от 5 минут до 10 минут. Затем производится промывка холодной водой и покрытие водным раствором каомена. Далее производится сушка путем обдува теплым воздухом. В результате сушки получается белый слой, который впитывает красящий раствор, что приводит к появлению яркого узора в местах расположения дефектов.

Преимущества цветного метода контроля:

- надежность;
- возможность использования, как для магнитных, так и для немагнитных материалов.

Недостатки цветного метода контроля:

- низкая производительность;
- невозможность определения внутренних дефектов;
- сложность;
- высокая стоимость.

Люминесцентный метод предполагает использование люминесцирующего эффекта для получения рисунка дефектов в ультрафиолетовом излучении. Метод реализуется следующим образом. Деталь предварительно очищается при помощи пескоструйной обработки и химически активных составов. Деталь помещается в флюоресцирующий

раствор, содержащий нириола. Затем деталь выдерживается некоторое время на воздухе, чаще всего от 10 минут до 15 минут, промывается холодной водой и просушивают. После этого на поверхность детали наносят магниевый порошок, излишки которого удаляются сжатым воздухом после выдержки от 1 до 30 минут. Нанесенный на поверхность детали таким образом состав дает люминесцентное свечение в местах расположения дефектов.

Преимущества люминесцентного метода контроля:

- надежность;
- возможность использования, как для магнитных, так и для немагнитных материалов.

Недостатки люминесцентного метода контроля:

- низкая производительность;
- невозможность определения внутренних дефектов;
- сложность;
- высокая стоимость.

Метод контроля обработкой магнитными порошками основан на свойствах магнитных порошков закрепляться на поверхности границ дефектов. В результате формируется индикаторный рисунок. Метод реализуется следующим образом. Деталь намагничивается постоянным или переменным током в зависимости от характеристик материала и площади поперечного сечения детали. Затем наносится магнитный порошок, представляющий собой суспензию, состоящую из жидкости определенного состава, в которой во взвешенном состоянии находятся частицы из крокуса или железного сурика. Нанесенный таким образом порошок будет концентрироваться по краям дефектов, что происходит в результате искажения магнитного потока в данных областях. Нанесение магнитного порошка возможно, как после намагничивания, так и при наложении магнитного поля. После окончания контроля обязательно производится размагничивание контролируемой детали.

Преимущества метода контроля обработкой магнитными порошками:

- простота;
- надежность;
- оперативность.

Недостатки метода контроля обработкой магнитными порошками:

- невозможность использования для немагнитных материалов;
- невозможность определения внутренних дефектов;
- сложность;
- высокая стоимость.

Рассмотрим наиболее распространенные комбинированные методы капиллярного контроля.

Капиллярно-электростатический метод использует физический эффект накопления электрических заряженных частиц у границ дефекта неэлектропроводящего объекта предварительно заполненного индикаторной жидкостью.

Капиллярно-электроиндуктивный метод использует физический эффект электроиндуктивного обнаружения границ дефекта неэлектропроводящего объекта предварительно заполненного индикаторной жидкостью.

Жидкостный капиллярно-радиационный метод использует физический эффект возникновения ионизирующего излучения от дефекта предварительно заполненного индикаторной жидкостью.

Капиллярно-радиационный метод поглощения использует физический эффект поглощения ионизирующего излучения от дефекта предварительно заполненного индикаторной жидкостью.

В результате применения комбинированных методов контроля образуется рисунок, четко отделяющий дефект от основного материала.

Преимущества и недостатки комбинированных методов схожи с теми, которые имеют методы, комбинациями которых они являются. В дополнение к недостаткам комбинированных методов контроля следует отнести их

большую сложность и стоимость по сравнению с базовыми методами контроля.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы. Применяемые на данный момент методы для решения поставленной задачи имеют ряд недостатков. Общим недостатком всех методов контроля является низкая производительность процесса. Также отметим такие существенные недостатки, присущие многим из рассмотренных методов, как влияние человеческого фактора, сложность процесса контроля и высокая стоимость.

По результатам анализа возможных дефектов было высказано предложение – использовать для решения поставленной задачи методы контроля, основанные на системах технического зрения. Исходя из анализа используемых методов, проведенного выше можно сформулировать основные требования к проектируемой системе. Во-первых, система должна иметь производительность гораздо выше, чем используемые в промышленности системы. Во-вторых, система должна исключать или сводить к минимуму влияние человеческого фактора на процесс контроля. В-третьих, система должна быть построена на стандартной элементной базе, что в конечном итоге позволит не только упростить процесс контроля, но и снизить его стоимость.

В данном разделе проведен анализ применяемых методов контроля поверхностей заготовок деталей типа вал. По результатам данного анализа определены преимущества и недостатки применяемых методов контроля, а также выработаны требования к проектируемой системе контроля.

### **3 Разработка математических моделей автоматизированной системы контроля**

#### **3.1 Подготовка изображения**

Метод контроля, основанный на использовании технического зрения, требует использования в качестве входной информации цифрового изображения объекта контроля. Основной проблемой при использовании цифрового изображения является наличие в нем искажений. Это усложняет дальнейшую обработку изображения и может привести к получению недостоверных результатов контроля. Причины возникновения искажений связаны как с техническими особенностями камер, используемых для получения изображений, так и воздействия внешних факторов производственных условий. Наиболее часто встречаемые причины искажений связаны с максимально допустимым разрешением, расфокусировкой, сдвигами контролируемого объекта относительно камеры. Как результат воздействия на изображение одной или нескольких причин происходит снижение четкости изображения, то есть появление шумов. Это приводит к снижению достоверности и информативности последующей его обработки.

В связи с этим проблема подготовки изображения с целью снижения шумов перед его обработкой является одной из ключевых в системах технического зрения. Традиционно решение проблемы снижения шумов на входных изображениях решается следующим образом. На первом этапе определяется, какие шумы являются преобладающими. Затем используется один из известных алгоритмов восстановления [12], [20], [28]. Проблема использования данного подхода применительно к решаемой задаче заключается в том, что получаемые изображения не имеют четких однородных характеристик, а имеют набор областей с определенными характеристиками, расположенные случайным образом, то есть являются



текстурными.

Применение традиционного подхода к улучшению качества текстурных изображений по данным работы [1] приведет к тому, что вместе с шумами в большинстве случаев удалятся части текстур и информационных признаков, которые в дальнейшем могли бы быть использованы для определения наличия искомого дефекта на изображении и определения его характеристик. «Решение данной проблемы возможно с применением методики «скользящего окна»» [14]. «Данная методика отличается универсальностью и позволяет улучшить качество входного изображения без потери текстуры и информационных признаков изображения» [4], [30].

«Графическое представление методики «скользящего окна» представлено на рисунке 24» [7].

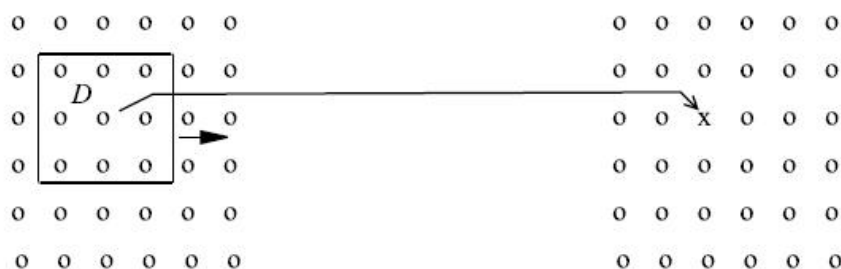


Рисунок 24 – Графическое представление методики «скользящего окна»

Из рисунка следует, что по изображению перемещается некоторая область, которая обеспечивает вычисление по всему изображению значений выходного изображения.

«Математически данная обработка описывается при помощи выражения:

$$g(n_1, n_2) = G[\{f(n_1 - m_1, n_2 - m_2)\}, (n_1, n_2) \in D], \quad (1)$$

где  $g(n_1, n_2)$ ,  $f(n_1, n_2)$  – двумерные последовательности отсчетов

входного и выходного изображения соответственно;

$G$  – оператор преобразования;

$D$  – конечное множество отсчетов, заданное относительно начала координат и определяющее форму и размеры окна обработки» [7].

«Эффективная реализация описанного выше преобразования возможна на основе применения конечной импульсной характеристики» [11]. Данное преобразование получило название преобразование КИХ-фильтром. Рассмотрим данный подход подробнее.

Значение выходного сигнала фильтра в окне производится суммированием входных отсчетов, то есть путем цифровой свертки с импульсной характеристики фильтра с входным сигналом. Таким образом, необходимо произвести вычисления всех ненулевых отсчетов импульсной характеристики. Объем данных вычислений значительный, что делает возможным данный подход для окон незначительных размеров, то есть для короткой импульсной характеристики.

«В рассматриваемом случае объем вычислений будет значительным, так как требуется большой размер окна. С целью снижения объемов вычислений применяются алгоритмы быстрой свертки» [2]. «Преимущество данного подхода заключается в простоте его реализации, но как следует из исследований [13] объем вычислений сократится недостаточно для решения поставленной задачи. Другой путь решения проблемы сокращения вычислений основан на параллельной рекурсивной обработке» [16], [29]. «Преимущество данного подхода заключается в резком повышении эффективности вычислений, но при этом они сложнее. Результатами работы алгоритмов параллельной рекурсивной обработки являются различные преобразования изображений, такие как гистограммы, средняя яркость, дисперсия, фильтрация и другие. Суть данного подхода заключается в использовании для вычислений отсчетов текущего шага и предыдущего шага» [5].

«Существенным недостатком фильтров, основанных на линейной рекурсивной фильтрации, то есть, с бесконечной импульсной характеристикой, является их плохая устойчивость. Устранение данного недостатка возможно преобразованием в конечно импульсные фильтры» [38].

Решение данной проблемы возможно разнообразными путями, но наиболее эффективным и при этом простым является разделение импульсной характеристики по координатам [34]. Для этого проводят рекурсивную обработку столбцов изображения, а затем построчную обработку полученных результатов. Такая обработка получила название обработки одномерным рекурсивным КИХ-фильтром [34]. Объем вычислений в данном случае будет зависеть только от рекурсий, так как в расчете не участвуют ненулевые отсчеты. Следовательно, вычисления определяются размером окна  $D$  [10]. При этом форма окна не может быть произвольной, так как в этом случае фильтрацию произвести невозможно, поэтому она задается заранее. Наиболее рационально использование прямоугольного окна [7].

«Прямоугольные области описываются выражением:

$$D: -M_1^- \leq m_1 \leq M_1^+; \quad -M_2^- \leq m_2 \leq M_2^+, \quad (2)$$

где  $M_1^-, M_1^+, M_2^-, M_2^+$  – параметры, задающие границы окна по координатам ( $M_1^- + M_1^+ \geq 0, M_2^-, M_2^+ \geq 0$ )» [7].

Наиболее рационально использовать окна прямоугольной формы с центральной симметрией. «Данные окна описываются выражением:

$$D: -M_1 \leq m_1 \leq M_1; \quad -M_2 \leq m_2 \leq M_2. \quad (3)» [7]$$

«В данном случае необходимо определить рациональные параметры окна, определить  $K$  функции из базисных функций и фильтр коэффициента» [8]. Размер окна можно с достаточной для решаемой задачи точностью

можно определить эвристическими методами, описанными в литературе [18].

Определение  $K$  функций и коэффициента в данном случае эффективно выполнить по методу численного расчета перебором [22].

«С целью определения наиболее эффективной обработки  $K$  базисных функций необходимо подобрать такое подмножество, которое имеет максимальное значение показателя качества  $R$  для всех сочетаний по  $K$  базисных функций. Такой подход на практике труднореализуем, так как требует значительного объема вычислений» [24].

Решение этой проблемы заключается в использовании первых  $K$  функций и упорядоченных базисных функций из базиса Фурье с возрастанием частного индекса. Составленное таким образом подмножество не отвечает критерию оптимальности, так как порядок следования функций может быть изменен [23].

Выбор оптимальных базисных функций предлагается выполнить на основе субоптимального метода последовательного присоединения [32]. «Суть данного метода заключается в следующем. Для формирования набора  $K$  функций сначала определяется функция отвечающая критерию максимального показателя качества. После этого к ней присоединяется следующая функция и определяется их максимальный показатель качества. Процедура полного перебора требует большого объема вычислений, поэтому с целью их сокращения применяется базис Фурье. Таким образом, на каждом шаге сразу добавляется группа функций с одинаковыми индексами» [25]. «Следует заметить, некоторое количество оптимальности подмножества базисных функций будет потеряно, но при этом существенно сократится объем требуемых вычислений» [25].

«Определение показателя качества обработки сигналов подмножества базисных функций, а также коэффициентов разложения импульсной характеристики фильтра в ряд окончательного подмножества производится следующим образом» [14].

«Искомые коэффициенты представляются в виде вектор-столбца  $A =$

$\{a_k\}_{k=0}^{K-1}$ , который представляется в виде матрицы:

$$A = B^{-1}C, \quad (4)$$

где  $B = \{b_{lk}\}_{l,k=0}^{K-1}$  – невырожденная симметрическая матрица,

$C = \{c_k\}_{k=0}^{K-1}$  – вектор-столбец» [14].

«В процессе выбора базисных функций используется показатель качества, определяемый соотношением:

$$R = A^T C = C^T B^{-1} C, \quad (5)$$

где  $-1$  – индекс, обозначающий обращение матрицы,

$T$  – индекс, обозначающий транспонированные вектора» [14].

«Преобразование входного стационарного случайного процесса в выходной процесс с заданным энергетическим спектром должен выполнить фильтр. Если он имеет параллельную структуру, то способ вычисления матрицы  $B$  и вектора  $C$  изменится» [39].

«Связь между входным сигналом фильтра и выходным сигналом описывается выражением:

$$\Phi_g(e^{i\omega}) = \Phi_f(e^{i\omega})|\bar{H}(e^{i\omega})|, \quad (6)$$

где  $\Phi_f(e^{i\omega})$  – энергетический спектр входного сигнала фильтра,

$\Phi_g(e^{i\omega})$  – энергетический спектр выходного сигнала,

$\bar{H}(e^{i\omega})$  – частотная характеристика фильтра» [14].

«Из данного выражения следует:

$$\bar{H}(e^{i\omega}) = \sqrt{\frac{\Phi_g(e^{i\omega})}{\Phi_f(e^{i\omega})}}. \quad (7) \gg [14]$$

Следовательно, для определения параллельного фильтра необходимо аппроксимировать частотную характеристику с весовой функцией.

«Тогда общие расчетные соотношения представляют собой следующие выражения:

$$b_{lk} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi_f(e^{i\omega}) H_l(e^{i\omega}) H_k(e^{i\omega}) d\omega, \quad (8) \gg [14]$$

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sqrt{\Phi_f(e^{i\omega}) \Phi_g(e^{i\omega})} H_k(e^{-i\omega}) d\omega, \quad (9) \gg [14]$$

$$b_{lk} = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-M^-}^{M^+} \sum_{n=-M^-}^{M^+} h_l(m) h_k(n) B_f(m-n), \quad (10)$$

где  $B_f(m)$  – автокорреляционная функция входного процесса» [14].

$$c_k = \sum_{m=-M^-}^{M^+} \bar{h}(m) h_k(m), \quad (11)$$

где  $\bar{h}(m)$  – последовательность, вычисляемая через обратное преобразование Фурье» [14].

«Обратное преобразование Фурье вычисляется из выражения:

$$\bar{h}(m) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sqrt{\Phi_f(e^{i\omega}) \Phi_g(e^{i\omega})} e^{i\omega m} d\omega. \quad (12) \gg [14]$$

«Значение минимальной ошибки при расчете коэффициента данного фильтра рассчитывается:

$$\varepsilon_{min}^2 = D_g - R, \quad (13)$$

где  $D_g$  – дисперсия выходного случайного процесса» [14].

Оценка качества операции фильтрации производится произведением

расстояния Махаланобиса между классами объекта и фона на дисперсию от сложности проведенных вычислений. «Математически данное выражение описывается формулой:

$$U = U_+ + \eta U, \quad (14)$$

где  $\eta$  – коэффициент относительной сложности умножения» [14].

«Произведем оценку эффективности параллельно-рекурсивных КИХ-фильтров на примере изображения, приведенного на рисунке 25, которое искажено аддитивным белым шумом» [31].

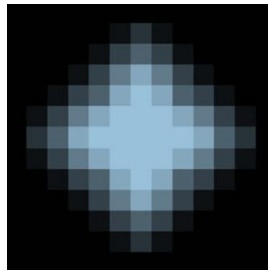
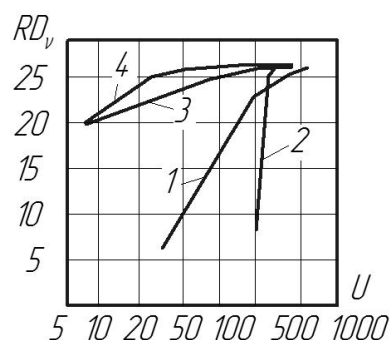


Рисунок 25 – Искаженное изображение

Результаты сравнительной оценки эффективности применения рекурсивных полиномиальных базисов при коэффициенте относительной сложности операции умножения 3 приведены на рисунке 26. Из представленных результатов видно, что наибольшее расстояние Махаланобиса имеет фильтр на основе четного полиномиального базиса. Следовательно, он имеет наибольшую эффективность [31].

«Оценка эффективности параллельно-рекурсивных фильтров выполнялась путем перебора подмножества базисных функций из множества с индексами:

$$0 \leq k \leq K, 0 \leq l \leq K. \quad (15)» [31]$$



«1 – обычный КИХ-фильтр в форме прямой свертки; 2 – быстрая свертка по схеме Кули–Тьюки с основанием «2» и процедурой оптимального секционирования входного сигнала; 3 – параллельно-рекурсивный фильтр на основе полиномиального базиса с минимальной вычислительной сложностью; 4 – параллельно-рекурсивный фильтр на основе четного полиномиального базиса» [31]

Рисунок 26 – Оценка эффективности применения рекурсивных полиномиальных базисов

«Автоматическая обработка изображения будет эффективна только в том случае, если алгоритм будет каким-либо образом подстраиваться под свойства изображения. Процедура обработки выглядит следующим образом. На первом этапе необходимо определить класс алгоритма. На втором этапе необходимо произвести анализ изображения, то есть определить его характеристики, например, структурные и статистические. На третьем этапе необходимо определить параметры алгоритма для обработки» [19].

Реализация данного подхода предусматривает выполнение оптимизации для заранее известного класса объектов. Таким образом, необходимо заранее произвести описание класс обрабатываемых алгоритмов. Но тогда будет нарушен предлагаемый алгоритм, то есть он будет не оптимальным.

Кроме этого, при обработке изображений возникают трудности с подбором критериев качества ее проведения. Это связано с особенностями формирования цифрового изображения и задач его обработки, которые трудно формализовать. Решение данной проблемы возможно путем разработки процедур обработки основанных на эвристических правилах.



Недостаток такого подхода заключается в низкой эффективности и нестабильном качестве обработки, что объясняется их узкой направленностью на решение какой-то конкретной задачи. Следовательно, приходится усложнять алгоритмы обработки и применять более сложные технические средства.

Анализ имеющихся подходов к решению указанной проблемы показал, что наиболее эффективным является применение подхода, при котором системе заранее задается конечный результат обработки [19]. Таким образом, обработка изображения будет происходить на основе синтезированного системой алгоритма, который определит заданный результат из данных входного изображения.

«Обработка в соответствии с описанным выше подходом производится следующим образом. Задача обработки сводится к тому, чтобы получить преобразование  $G$  для входного изображения  $F$ . При этом искомое преобразование должно как можно больше совпадать с преобразованием идеального изображения  $G_0$ » [35].

«В качестве обучающей выборки используются согласованные пары  $(F, G_0)$ . Это позволит создать классификатор, который будет по входному изображению  $F$  определять вектор признаков, которому должно соответствовать выходное изображение  $G$ . Исходя из разницы  $G$  и  $G_0$ , то есть оценки качества изображения, могут быть изменены набор признаков и вид классификатора» [35].

«На рисунке 27 представлен описанный выше алгоритм обучения классификатора. Заметим, что обученный по данному алгоритму классификатор будет выдавать корректные результаты исключительно при работе с изображениями того же класса» [35].

«Алгоритм обработки с применением обученного таким образом классификатора представлен на рисунке 28» [35].

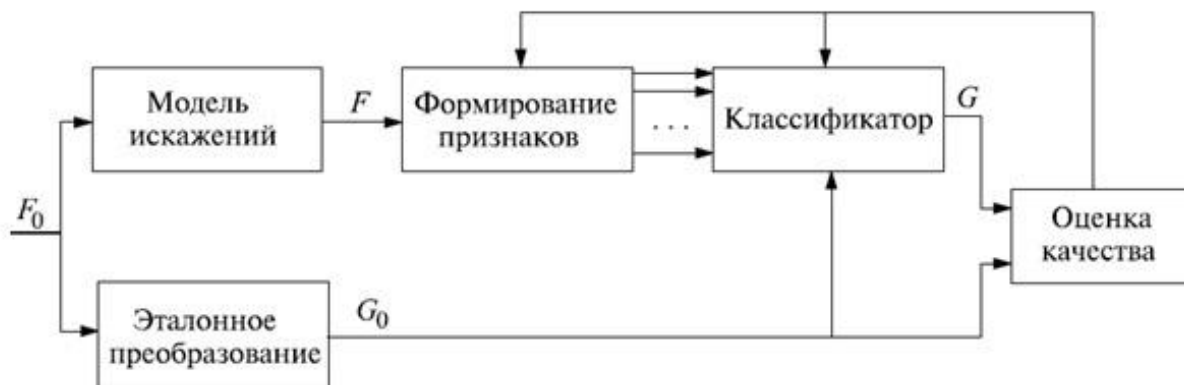


Рисунок 27 – Алгоритм обучения классификатора

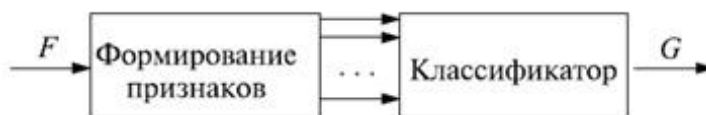


Рисунок 28 – Алгоритм обработки с применением классификатора

«Обработка реальных изображений по приведенным выше алгоритмам на практике потребует большого количества вычислений, что объясняется наличием множества классов выходного изображения и вектора признаков большой размерности» [4]. «В связи с этим возникает задача упрощения данной процедуры. Один из самых эффективных путей ее решения заключается в обработке скользящим окном» [37]. «Для этого с целью снижения количества локальных признаков используется небольшое по размерам окно, в котором для каждого выходного отсчета формируется  $K$ -мерный вектор признаков» [37]. «Это приведет к снижению количества классов, так как для каждого положения окна оно будет своим» [37]. При таком подходе формирование обучающей выборки производится на основе всех отсчетов окна. В ряде случаев для увеличения обучающей выборки искусственно вносят дополнительные шумы и искусственные преобразования. Рассмотрим пример работы описанного подхода на реальном изображении дефекта «отпечаток», приведенного на рисунке 29.



Рисунок 29 – Дефект «отпечаток» без искажения

Изображение дефекта с искажением «смаз» приведено на рисунке 30.



Рисунок 30 – Дефект с искажением «смаз»

Изображение дефекта с искажением «расфокусировка» приведено на рисунке 31.



Рисунок 31 – Дефект с искажением «расфокусировка»

Результаты восстановления изображения дефекта «отпечаток», имевшего искажение «смаз» приведены на рисунке 32.

Результаты восстановления изображения дефекта «отпечаток», имевшего искажение «расфокусировка» приведены на рисунке 33.



Рисунок 32 – Восстановленное изображение дефекта «отпечаток» с искажением «смаз»



Рисунок 33 – Восстановленное изображение дефекта «отпечаток» с искажением «расфокусировка»

Из приведенного примера можно сделать следующие выводы. Предлагаемый подход дает хорошие результаты восстановления изображения, так как сохраняет все его основные информационные признаки. Следовательно, восстановленные таким образом изображения пригодны для их дальнейшей обработки, то есть получения информации о наличии на них дефектов и определения их геометрических характеристик.

Заметим, что рассмотренный подход не является идеальным, так как по данным работы [7] на восстановленном изображении возможно возникновение краевых эффектов, которые проявляются в виде осциллирующих помех в виде полос или ряби. Это объясняется тем, что происходит потеря информации по границам исходного изображения, так как изображение имеет определенный размер. Наиболее часто возникновение такого эффекта наблюдается при устранении смаза изображения.

Решение проблемы появления краевых эффектов традиционным методом при помощи уравнения Винера-Хопфа не дает необходимого

эффекта, поэтому единственным путем решения данной проблемы является применение эвристических алгоритмов [4], [7]. Выбор конкретного алгоритма зависит от специфики решаемой задачи и более подробно рассмотрен в работах [7], [14], [33].

### **3.2 Бинаризация изображения**

Задача обнаружения дефекта и вычисления его геометрических параметров предполагает обнаружение некой области характеристики которой отличаются от основного изображения. Реальное изображение не является однородным и состоит из ряда областей с одинаковыми характеристиками, что объясняется физическими особенностями получения цифрового изображения. Нахождение дефекта в таком случае проще всего реализовать если все изображение разбить на характеристики двух классов. Один класс будет фоном изображения, а второй искомыми дефектами. Данный процесс принято называть бинарной сегментацией или бинаризацией [7], [9]. Суть этого процесса заключается в отнесении участков входного изображения, обладающих однородными характеристиками к области одного из двух типов. Визуально эти области формируют карту из белых и черных участков. Такой подход существенно сократит количество признаков, характеризующих области изображения, что упростит алгоритмы обработки информации и сократит объем информации, подлежащей обработке.

«Процесс бинаризации основан на разделении входного изображения на участки разного типа в соответствии с определенными признаками, такими как средняя яркость, дисперсия флюктуации, корреляционные свойства» [9]. При решении практических задач удобнее всего использовать различие участков по средней яркости. Реальные изображения часто могут формироваться участками с одинаковыми средними яркостями или имеющие резкие различия в колебаниях яркости. В таких случаях анализ средней яркости не даст необходимого результата, и часть областей может быть

классифицирована неверно. При решении рассматриваемой задачи контроля дефектов это может привести к снижению точности контроля и его достоверности. «Также встречаются изображения, области которых представлены как разграниченные участки, но имеющие одинаковые характеристики. В этом случае применяется анализ по нескольким характеристикам» [14]. «Для цветных изображений в качестве анализируемой характеристики может быть использован цвет» [15].

Практическая реализация описанных подходов к бинаризации изображения основана на использовании разнообразных методов [7]. Все методы бинаризации можно разделить на два класса. Первый класс методы пороговой обработки, второй методов фильтрации [16]. Такое разнообразие методов бинаризации изображений объясняется отсутствием универсального подхода ввиду значительных отличий в условиях получения и характеристиках различных изображений.

Применительно к решаемой задаче мы имеем дело с получением изображения с контролируемого объекта находящегося в статичном положении при фиксированном положении относительно него цифровой камеры. При этом основной материал контролируемого объекта однородный по своим оптическим свойствам, то есть имеет заранее известные оптические характеристики. В таком случае рационально применить один из самых простых и эффективных методов бинаризации, который заключается в анализе средней яркости участков изображения на основе пороговой обработки [14]. Недостатком данного метода является принятие решения о принадлежности анализируемой точки к области при отсутствии информации о соседних точках. Однако, в виду особенностей условий решаемой задачи данный недостаток влияния на результат бинаризации не окажет.

Методика бинаризации изображения на основе пороговой обработки работает следующим образом [7].

«Для проведения преобразования в точки выходного изображения

$y(i, j)$  точек входного изображения  $x(i, j)$  используется выражение:

$$y(i, j) = \begin{cases} y_0, & \text{при } x(i, j) \leq x_0 \\ y_1, & \text{при } x(i, j) > x_0 \end{cases}, \quad (16)$$

где  $x_0$  – порог обработки;

$y_0, y_1$  – уровни выходной яркости» [7].

«В большинстве случаев для удобства восприятия и обработки результатов бинаризации при разбиении в качестве классов используются значения уровней черного и белого, а в качестве меток используются уровни выходной яркости» [7].

Наиболее сложной проблемой при бинаризации изображения методом пороговой обработки является определение порога разбиения на зоны. Особенно данный вопрос актуален в случае необходимости выполнения данной процедуры в автоматическом режиме. Проанализировав данные исследований [36] применительно к решаемой задаче приходим к выводу, что наиболее эффективным будет метод определения порога по гистограмме изображения.

Суть данного метода определения порога обработки проиллюстрирована на рисунке 34. Гистограмма описывается функцией  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq 255$ . В данной функции 0 соответствует уровню черного цвета, 255 соответствует уровню белого цвета. Каждый класс изображения на гистограмме определяется своей модой, так как его распределение имеет единственный максимум. При этом количество точек на границе распределения класса незначительно. В результате на гистограмме образуются впадины, которые могут быть приняты в качестве порога бинаризации.

Рассмотренный подход к реализации пороговой обработки представляет собой идеальный случай.

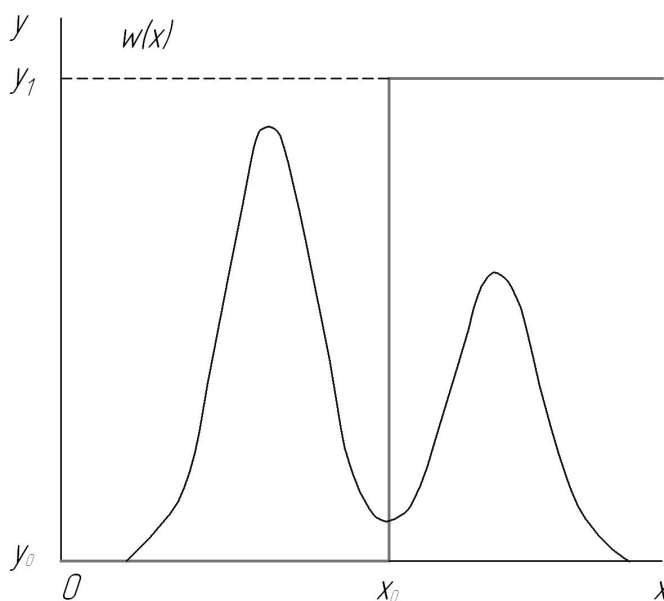


Рисунок 34 – Определение порога обработки по гистограмме

При обработке реальных изображений возникает ряд проблем. На гистограмме реального изображения присутствует множество впадин. Это затрудняет определение минимума. В ряде случаев между различными участками на гистограмме ярко выраженные впадины могут отсутствовать. Это объясняется тем, что границы участков могут быть сильно размыты. В результате произойдет увеличение количества граничных точек.

Наиболее эффективно при обработке реальных изображений использование порога на основе дискриминантного критерия [7]. Суть данного подхода состоит в том, что в качестве оптимального порога  $x_0$  при разбиении распределения  $(x)$ ,  $0 \leq x \leq 255$  принимается дискриминантная  $\eta(x_0^*)$ ,  $0 \leq x_0^* \leq 255$ . В данной функции  $x_0^*$  является пробным порогом, который принимается, если при данном значении дискриминантная функция достигает своего максимума.

«Дискриминантная функция формируется из предположения, что для обрабатываемого распределения  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq 255$ , возможным порогом разбиения является значение  $x_0^*$ » [14]. В ходе сортировки точек изображения по классам граничные точки, значение яркости которых составляет  $x_0^*$ , могут



быть отнесены к одному из классов. Данное допущение возможно, так как количество этих точек мало и на общую картину бинаризации изображения они влияния не оказывают.

«Вероятность принадлежности точки к классу  $A$  определяется из выражения:

$$p_A = \sum_{x=0}^{x_0^*} w(x) = p(x_0^*). \quad (17) \gg [7]$$

«Вероятность принадлежности точки к классу  $B$  определяется из выражения:

$$p_B = \sum_{x=x_0^*+1}^{255} w(x). \quad (18) \gg [7]$$

«Исходя из нормировки распределения вероятностей:

$$p_A + p_B = 1. \quad (19) \gg [7]$$

Предположим, что распределение вида  $w(x)$ ,  $0 \leq x \leq x_0^*$ , описывает классу  $A$ , а распределение вида  $w(x)$ ,  $x_0^* + 1 \leq x \leq 255$  описывает класс  $B$ . «Исходя из этих соображений выводим выражения распределений  $w_A(x)$  и  $w_B(x)$  для классов  $A$  (20) и  $B$  (21):

$$w_A(x) = \frac{w(x)}{p_A}, \quad 0 \leq x \leq x_0^*, \quad (20)$$

$$w_B(x) = \frac{w(x)}{p_B}, \quad x_0^* + 1 \leq x \leq 255. \quad (21) \gg [7]$$

«Математические ожидания для представленных распределений вероятностей определяются по формулам:

$$\mu_A = \sum_{x=0}^{x_0^*} xw_A(x) = \sum_{x=0}^{x_0^*} x \frac{w(x)}{p_A}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mu_B &= \sum_{x=x_0^*+1}^{255} xw_B(x) = \sum_{x=x_0^*+1}^{255} x \frac{w(x)}{p_B} = \frac{\sum_{x=0}^{255} xw(x) - \sum_{x=0}^{x_0^*} xw(x)}{x_B} = \\ &= \frac{\mu(255) - \mu(x_0^*)}{x_B} = \frac{\mu(255) - \mu(x_0^*)}{1 - p(x_0^*)}, \end{aligned} \quad (23)$$

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

$\mu(x_0^*) = \sum_{x=0}^{x_0^*} xw(x)$  – математическое ожидание для класса  $A$ » [7].

«Дисперсия кадра определяется выражением:

$$\sigma_T^2 = \sum_{x=0}^{255} [x - \mu(255)]^2 w(x). \quad (24)» [7]$$

«Построение дискриминантной функции возможно на основе межклассовой дисперсии определяемой выражением:

$$\sigma_M^2 = p_A(\mu_A - \mu(255))^2 + p_B(\mu_B - \mu(255))^2. \quad (25)» [7]$$

«Дискриминантная функция получается из соотношения:

$$\eta(x_0^*) = \frac{\sigma_M^2(x_0^*)}{\sigma_T^2}. \quad (26)» [7]$$

«Оптимальный порог будет соответствовать выражению:

$$x_0 = \arg \max_{x_0^*} \eta(x_0^*). \quad (27)» [7]$$

Анализируя полученное выражение для определения дискриминантной функции, приходим к выводу, что его максимум зависит от представленной в

числителе межклассовой дисперсии, так как представленная в знаменателе дисперсия кадра не зависит от значения пробного порога. Для того чтобы все изображение было отнесено полностью к одному из классов необходимо, чтобы вероятность принадлежности к другому классу стремилась к одному из крайних положений. «Так, если порог обработки будет стремиться к нулю, то вероятность принадлежности к классу  $A$  также будет стремиться к нулю» [7]. Следовательно, все изображение относится к классу  $B$ . Тогда математическое ожидание для распределения вероятностей класса  $B$  будет стремиться к значению 255, следовательно, дискриминантная функция будет равна нулю. Аналогичные рассуждения можно провести и для другого крайнего значения порога обработки равного 255. Таким образом, порог обработки будет оптимальным при максимальном значении области определения, определяемой нулевыми значениями дискриминантной функции при положительных значениях межклассовой дисперсии и порога обработки.

В случае наличия существенной разницы между площадями классов будет несколько максимумов дискриминантной функции. «Решением этой проблемы будет поиск наибольшего из этих значений по следующему алгоритму:

- определяется математическое ожидание  $\mu(255)$ ;
- дисперсия кадра изображения;
- для каждого пробного порога определяются вероятность принадлежности точки к классу  $A$ , вероятность принадлежности точки к классу  $B$  и математические ожидания принадлежности к соответствующим классам;
- производится поиск значения дискриминантной функции» [7].

«С целью сокращения количества расчетов предлагается выполнить преобразование выражение, описывающее межклассовую дисперсию с учетом выражений, описывающих вероятность принадлежности точки к классу  $A$ , вероятность принадлежности точки к классу  $B$  и математические

ожидания принадлежности к соответствующим классам» [7]. «Получаем следующее выражение для математических ожиданий:

$$p_A \mu_A + p_B \mu_B = \mu(255). \quad (28) \gg [7]$$

«Используя полученный результат, раскрываем квадраты разностей в выражении (25):

$$\sigma_M^2 = p_A p_B (\mu_B - \mu_A)^2. \quad (29) \gg [7]$$

«Из выражения (28) выводим выражения для определения  $\mu_B$ . Полученный результат подставляем в (29), получаем:

$$\sigma_M^2(x_0^*) = \frac{[\mu(255)p(x_0^*) - \mu(x_0^*)]^2}{p(x_0^*)[1-p(x_0^*)]}. \quad (30) \gg [7]$$

Полученное выражение содержит всего две варьируемые величины  $\mu(x_0^*)$   $p(x_0^*)$ . Это снизит количество вычислений при определении оптимального порога.

Проведем бинаризацию изображения дефекта раковина-вдав, приведенного на рисунке 17, с использованием рассмотренного алгоритма.

На рисунке 35 представлена гистограмма изображения рассматриваемого дефекта, по которой проводится пороговая обработка.

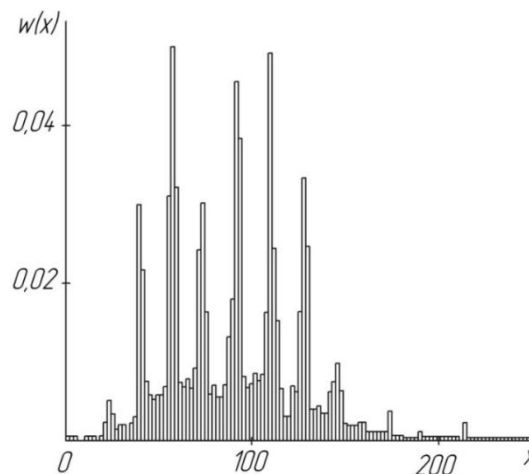


Рисунок 35 – Гистограмма изображения

Представленная гистограмма содержит большое количество перепадов, что делает невозможным определение по ней единственного порога, соответствующего минимуму гистограммы. Таким образом, в данном случае провести пороговую бинаризацию изображения по его гистограмме невозможно.

В соответствии с принятым алгоритмом обработки изображения формируем дискриминантную функцию для представленной гистограммы  $S$ . Визуализация результатов построения данной функции представлена на рисунке 36.

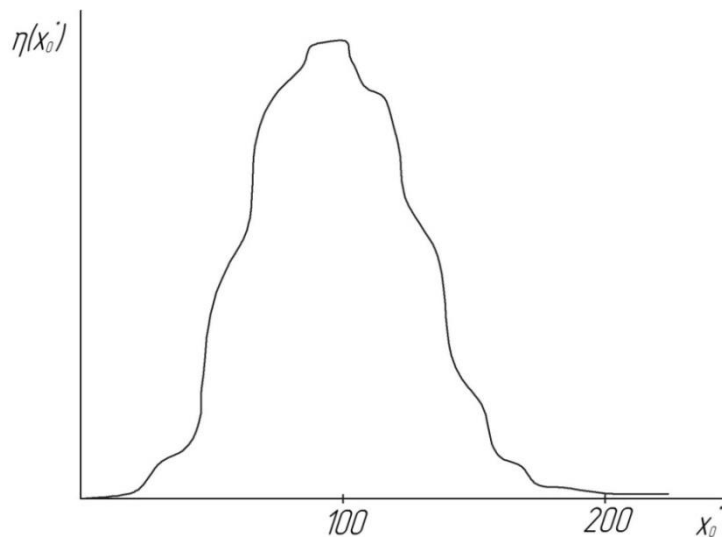


Рисунок 36 – График дискриминантной функции

Приведенный график дискриминантной функции имеет один экстремум, который и будет соответствовать значению порога обработки. В данном случае искомый оптимальный порог обработки  $x_0$  будет равен 100.

Подставляя полученное значение порога в формулу (16) проводим бинарную пороговую обработку исходного изображения дефекта раковина-вад. Визуализация результатов данной обработки представлена на рисунке



Рисунок 37 – Визуализация результатов бинаризации дефекта «раковина-вдав»

Полученные результаты бинаризации можно признать соответствующими решаемой задаче. Как видно из рисунка 37 дефект выявлен полностью, визуально без потери информационных признаков, имеет четкие границы. Это позволит в дальнейшем четко определить его наличие на поверхности контролируемой детали и определить его геометрические характеристики без применения алгоритмов выделения границ, что снизит объем проведения необходимых вычислений и увеличит скорость обработки.

### **3.3 Оценка геометрических характеристик дефектов**

Обработка изображений применяемо к решаемой задаче имеет цель получить его характеристики, такие как обнаружение дефектов, определение их места положения и числа, а также оценка его геометрических характеристик.

Рассмотрим решение задачи оценки геометрических характеристик объекта (площади, центры тяжести, размеры и так далее) подробнее. Наиболее важными геометрическими характеристиками в нашем случае являются размеры и площадь дефекта.

Оцениваемое изображение предварительно подвергнуто бинарной

сегментации в соответствии с алгоритмами, приведенными в пункте 3.2 данной работы. В соответствии с проведенной ранее процедурой область дефектов имеет черный цвет, которому соответствует значение единица, область фона имеет белый цвет и значение ноль.

Исходя из того, что для определения разных геометрических характеристик используются одни и те же признаки изображения, в нашем случае бинарного, рассмотрим алгоритм их определения на примере определения площади дефекта [14].

Площадь дефекта определяется количеством отсчетов, представляющих собой квадрат со сторонами равными единице (рисунок 38) и критерием четырехсвязанности.

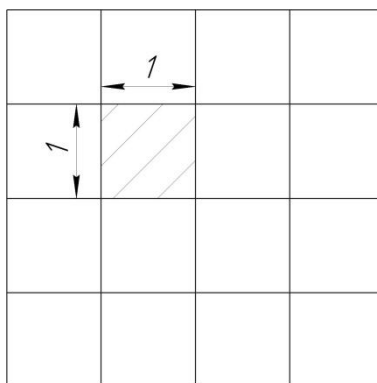


Рисунок 38 – Квадрат единичной площади

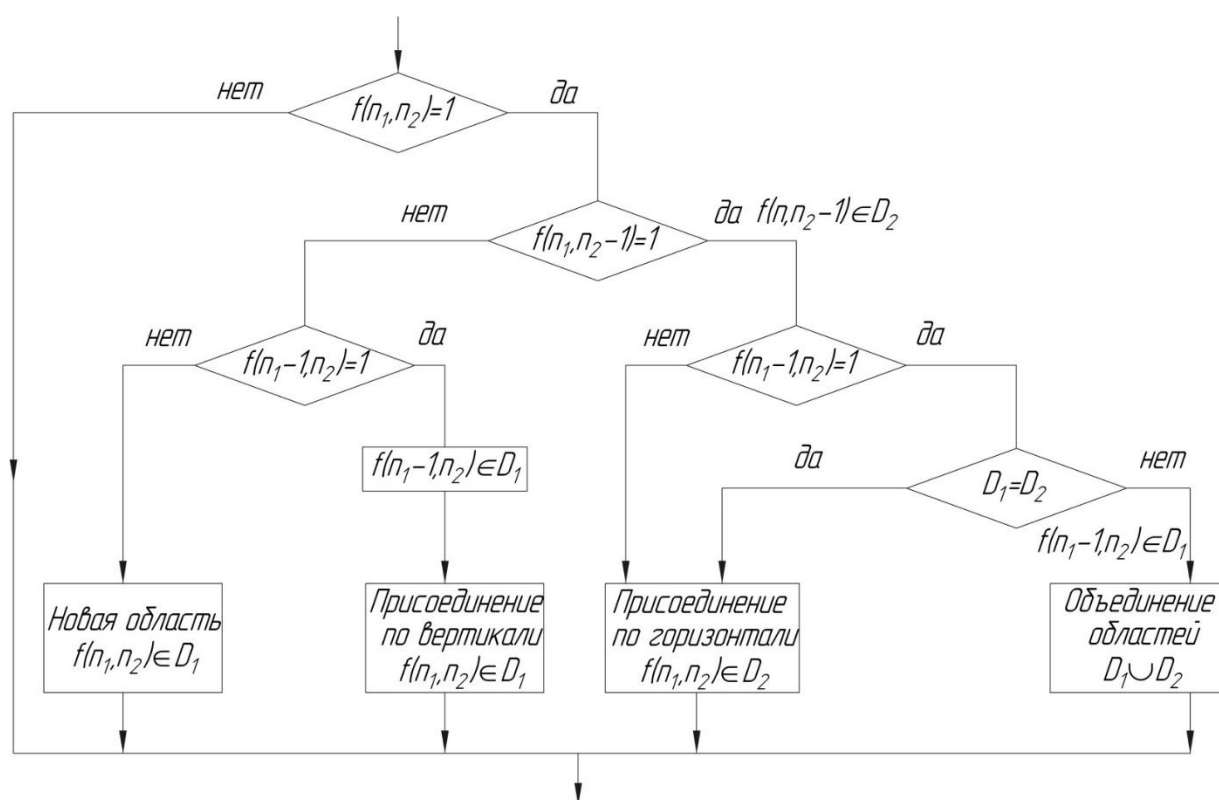
«Сначала рассмотрим обработку внутренних отсчетов  $f(n_1, n_2)$ , то есть не принадлежащих первой строке и левому столбцу, так как обработка проводится с верхнего левого угла изображения вниз вправо» [14].

«Если отсчет равен нулю, то он является фоном изображения. Если отсчет равен единице, то он относится к изображению и его следует отнести к объектам на изображении» [14].

«Данная процедура предусматривает рассмотрение соседних отсчетов  $f(n_1 - 1, n_2)$  и  $f(n_1, n_2 - 1)$ . При выполнении условия  $f(n_1 - 1, n_2) =$

$f(n_1, n_2 - 1) = 0$  оцениваемый отсчет будет являться началом новой области, то есть это новый объект и в таблице характеристик областей вносятся соответствующие значения. При выполнении условия  $f(n_1 - 1, n_2) = 0$  и  $f(n_1, n_2 - 1) = 1$ , оцениваемый отсчет включается в область отсчета ( $f(n_1, n_2 - 1)$ ), а ее площадь увеличивается на одну единицу. Аналогично при выполнении условия  $f(n_1 - 1, n_2) = 1$  и  $f(n_1, n_2 - 1) = 0$ , текущий отсчет включается в область ( $f(n_1 - 1, n_2)$ ) и выполняются соответствующие вычисления площади. При выполнении условия  $f(n_1 - 1, n_2) = f(n_1, n_2 - 1) = 1$  необходимо произвести анализ областей данных отсчетов. Если соседние отсчеты относятся к одной области, то текущий отсчет также присоединяется к ней. Если соседние отсчеты относятся к разным областям, то текущий отсчет, а также сами области объединяются в одну, а их площадь пересчитывается» [14].

Схема алгоритма, реализующего данные соображения, представлена на рисунке 39.





### Рисунок 39 – Алгоритм определения геометрических характеристик

Теперь рассмотрим алгоритм обработки граничных отсчетов на примере фрагмента изображения, состоящего из пяти отсчетов в обоих направлениях (рисунок 40).

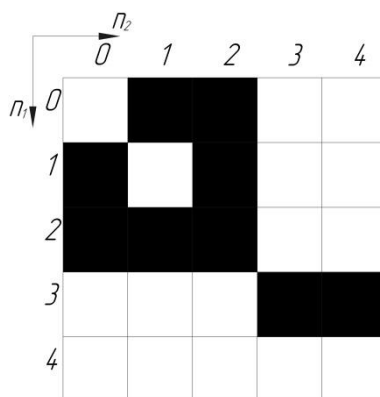


Рисунок 40 – Фрагмент изображения

Для простоты восприятия работы алгоритма результаты оформим в виде таблицы 2.

Таблица 2 – Результаты работы алгоритма определения площади

Текущий отсчет	Характеристика (площадь) области		
	область 1	область 2	область 3
$f(0,1)$	1	-	-
$f(0,2)$	1+1=2	-	-
$f(1,0)$	2	1	-
$f(1,2)$	2+1=3	1	-
$f(2,0)$	3	1+1=2	-
$f(2,1)$	3	2+1=3	-
$f(2,2)$	3+3+1=7	объединена с областью 1	-
$f(3,3)$	7	-	1
$f(3,4)$	7	-	1+1=2

Как видно из таблицы, в рассматриваемом примере алгоритм

определяет три области, имеющие значение отсчетов равных единице. Заметим, что области имеющие значения отсчетов равные нулю в таблицу не включены, так как они не несут информации об объекте и по сути формируют фон объекта, площадь которого определяется. Визуализация приведенной в таблице 2 информации представлена на рисунке 41 в виде разметки областей алгоритма.

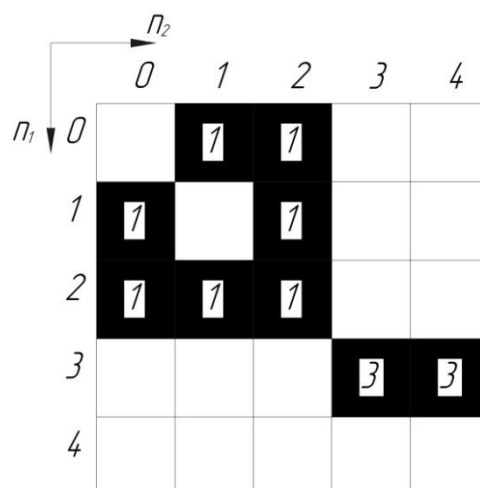


Рисунок 41 – Разметка областей

Как видно из рисунка 41 количество областей две, при этом в таблице их три. Это объясняется тем, что на отсчете  $f(2,2)$  произошло объединение областей под номерами 1 и 2. В результате данного объединения сформировалась одна область с семью отсчетами, и вторая с двумя отсчетами.

Решения других задач связанных с вычислением геометрических характеристик объекта, таких как координаты краев, определение центра, определение габаритных размеров, построено на аналогичных алгоритмах. Определение данных характеристик предполагает построение математического правила их вычисления:

$$\langle F(D_1 \cup D_2) = \Phi[F(D_1), F(D_2)] \quad (D_1 \cap D_2 = \emptyset - \text{не пересекаются}), (31)$$

где  $F(D)$  – характеристика, определенная по множеству  $D$ » [14].

«Характеристики, удовлетворяющие данному ограничению, имеют следующий вид. Для аддитивных характеристик:

$$F(D) = \sum_{(n_1, n_2) \in D} (\Phi(n_1, n_2)), \quad (32)$$

где  $\Phi(n_1, n_2)$  – произвольная функция координаты  $n_1, n_2$ » [14].

«Для экстремальных характеристик:

$$F(D) = \underset{(n_1, n_2) \in D}{\text{ext}} (\Psi(n_1, n_2)), \quad (33)$$

где  $\Psi(n_1, n_2)$  – произвольная функция координаты  $n_1, n_2$ » [14].

Опишем математически правила определения геометрических характеристик на примере фигуры приведенной на рисунке 42.

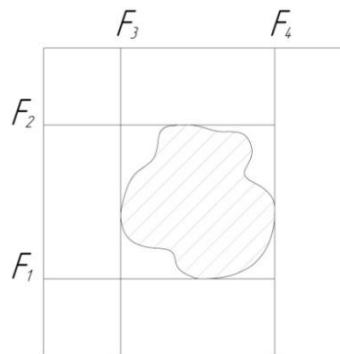


Рисунок 42 – Определение геометрических характеристик фигуры

«Площадь данной фигуры определяется:

$$F(D) = \sum_{(n_1, n_2) \in D} 1. \quad (34)» [14]$$

«Аддитивная характеристика в данном случае принимает вид

$\Phi(n_1, n_2) \equiv 1$  [14].

«Координаты края изображения по вертикали и горизонтали определяются выражениями:

$$F_1(D) = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}; \quad (35)$$

$$F_2(D) = \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}; \quad (36)$$

$$F_3(D) = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}; \quad (37)$$

$$F_4(D) = \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}. \quad (38)» [14]$$

«Экстремальные характеристики в данном случае принимают вид  $\Psi(n_1, n_2) = n_1$  и  $\Psi(n_1, n_2) = n_2$  [14].

Графическое отображение к определению центра области рассматриваемого объекта приведено на рисунке 43.

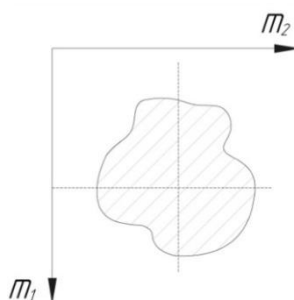


Рисунок 43 – Определение центра области объекта

«Расчет центра области объекта в случае непрерывных аргументов производится по выражению:

$$\theta_1 = \frac{\int_D \int x_1 dx_1 dx_2}{\iint_D dx_1 dx_2}; \theta_2 = \frac{\int_D \int x_2 dx_1 dx_2}{\iint_D dx_1 dx_2}. \quad (39) \gg [14]$$

«Выражения для изображений в цифровой форме примут вид:

$$m_1 = \frac{\sum_{(n_1, n_2) \in D} n_1}{\sum_{(n_1, n_2) \in D} 1}; m_2 = \frac{\sum_{(n_1, n_2) \in D} n_2}{\sum_{(n_1, n_2) \in D} 1}. \quad (40) \gg [14]$$

«Полученное выражение можно записать в виде:

$$m_1 = \frac{\alpha_{10}}{\alpha_{00}}; m_2 = \frac{\alpha_{01}}{\alpha_{00}}. \quad (41) \gg [14]$$

«В данном выражении аддитивные первичные характеристики определяются:

$$\begin{cases} \alpha_{00} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} 1 \\ \alpha_{10} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} n_1. \\ \alpha_{01} = \sum_{(n_1, n_2) \in D} n_2 \end{cases} \quad (42) \gg [14]$$

Графическое отображение к определению габаритных размеров рассматриваемого объекта приведенных на рисунке 35.

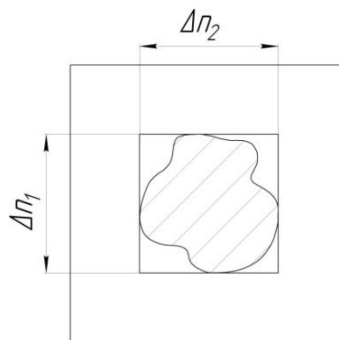


Рисунок 44 – Определение габаритных размеров объекта

«Размеры по вертикали и горизонтали определяются выражениями:

$$\Delta n_1 = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\} - \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_1\}, \Delta n_2 = \max_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\} - \min_{(n_1, n_2) \in D} \{n_2\}. \quad (43) \gg [14]$$

При выполнении расчетов центра области объекта и его размеров по вертикали и горизонтали, характеристики определяются исходя из определенных ранее координат края изображения по вертикали и горизонтали.

Таким образом, нами получен алгоритм и математическое описание для определения наиболее важных геометрических характеристик обнаруженного дефекта. С точки зрения решаемой задачи этой информации достаточно для того, чтобы охарактеризовать обнаруженный дефект и принять решение о годности или не годности контролируемой заготовки вала.

В результате выполнения данного раздела были решены ключевые с точки зрения обработки цифрового изображения вопросы построения математического описания основных этапов обработки. Предложена модель предварительного улучшения качества изображения и проведена оценка его эффективности, которая показала хорошие результаты при применении для решаемой задачи. Рассмотрены вопросы предварительной бинарной сегментации изображения с целью сокращения объемов обработки и ее упрощения. Подобран оптимальный метод бинаризации на основе пороговой обработки. Разработан алгоритм и математический аппарат, позволяющие выполнить оценку геометрических характеристик обнаруженных дефектов и принять решение о соответствии контролируемого объекта нормативным значениям.

## **4 Разработка алгоритмов работы и структуры системы контроля**

### **4.1 Разработка алгоритмов работы системы контроля**

Применение цифрового изображения контролируемого объекта в качестве исходной информации для проведения контроля наиболее эффективно в случае автоматизации всех процедур обработки изображения. Такого рода автоматизация подразумевает разработку алгоритмов работы различных подсистем, обеспечивающих соответствующие этапы цифровой обработки исходного изображения.

В нашем случае основными процедурами являются улучшение качества изображения, обнаружение и определение характеристик дефекта. Разработаем алгоритмы выполнения данных процедур.

Сначала разработаем алгоритм процедуры улучшения качества изображения. Результатом работы данного алгоритма является улучшение качества входного изображения в случае обнаружения на нем искомого дефекта. Качество обработанного изображения должно отвечать определенным критериям, в соответствии с которыми возможно проведение дальнейшей обработки.

Алгоритм имеет следующий вид (рисунок 45). Входное изображение формируется цифровой камерой и соответственно имеет цифровой вид. Далее необходимо провести оценку характеристик полученного первичного изображения, то есть подвергнуть его первичной обработке. Это важный этап работы алгоритма, от результатов которого зависит вся дальнейшая обработка. В ходе первичной обработки необходимо устранить дефекты изображения, возникающие вследствие процесса получения изображения. Так как ведется обработка цифрового изображения, то основные причины возникновения дефектов связаны с условиями получения изображения, особенностями формирования изображения, используемыми техническими средствами обеспечивающими передачу и отображение изображения.

Устранение дефектов изображения возможно с использованием с применением дополнительных технических средств или путем применения дополнительных алгоритмов обработки. Технические средства позволяют улучшить условия для получения исходного изображения. Например, освещенность. В большинстве случаев этого не достаточно и поэтому применяются дополнительные алгоритмы обработки, построенные на базе известных методик и математических моделей [27].

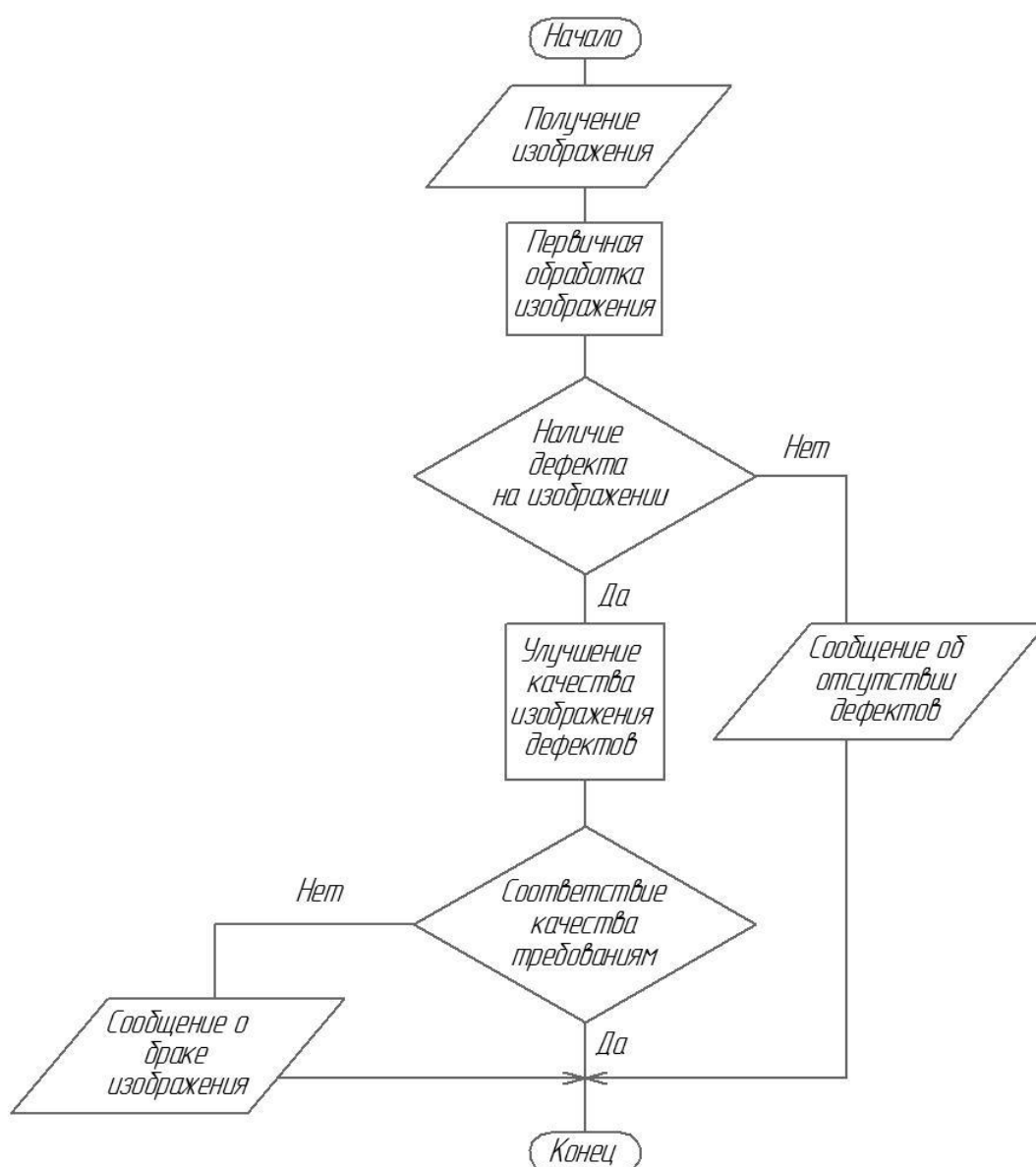


Рисунок 45 – Алгоритм процедуры улучшения качества изображения



Подвергнутое первичной обработке изображение подвергается дальнейшему анализу с целью выявления на нем возможных дефектов. Если дефект отсутствует пользователю необходимо выдать соответствующее сообщение. Если дефект присутствует необходимо перейти к выполнению следующего этапа алгоритма. Выявление дефектов предлагается производить с использованием известных методик и математических моделей [10].

Реализация этапа улучшения качества входного изображения подробно рассмотрена в пункте 3.1 данной работы. Следует заметить, что выполнение данного этапа проводится на основе первичной оценки качества изображения. В результате выполнения данного этапа получается изображение, которое проверяется на соответствие его качества требуемым показателям. Если по результатам проверки делается заключение о несоответствии качества изображения, то его дальнейшая обработка не выполняется. Выдается соответствующее оператору, и он принимает решение о повторной обработке или отбраковке изображения. Если по результатам проверки делается заключение о соответствии качества изображения, то оно подвергается дальнейшей обработке и анализу.

Разработаем алгоритм осуществления процедуры обнаружения и определения характеристик дефекта (рисунок 46).

Исходным для данного алгоритма является изображение, предварительно обработанное по алгоритму процедуры улучшения качества изображения.

Затем данное изображение необходимо привести в бинарный вид в соответствии с методикой, описанной в пункте 3.2 данной работы.

Следующий этап обработки предполагает поиск координат области, где находится дефект на бинарном изображении. Это осуществляется при помощи достаточно широкого класса соответствующих алгоритмов. Подробное описание данных алгоритмов, а также области применения каждого можно найти в рекомендациях [10], [21].

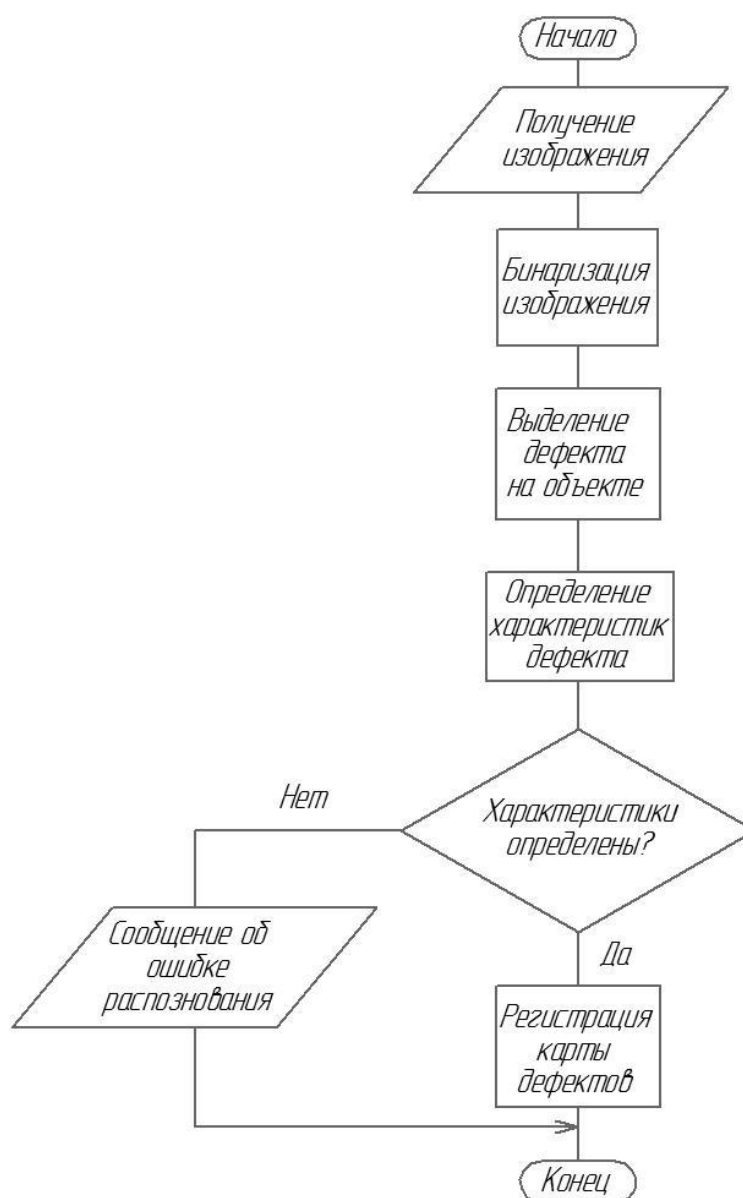


Рисунок 46 – Алгоритм процедуры обнаружения и определения характеристик дефекта

Далее необходимо определить геометрические характеристики дефекта. Решение этой задачи основано на использовании математического аппарата приведенного в пункте 3.3 данной работы. Если алгоритм отработал штатно и определил все необходимые параметры, то результаты выводятся на экран контролера и заносятся в систему контроля качества. Возможно формирование другой документации в соответствии с требованиями конкретных производственных условий. В случае если по результатам работы алгоритма характеристики дефекта не определены, контролер

принимает решение о повторной обработке или отбраковке данного изображения.

Функциональная схема системы контроля приведена на рисунке 47.

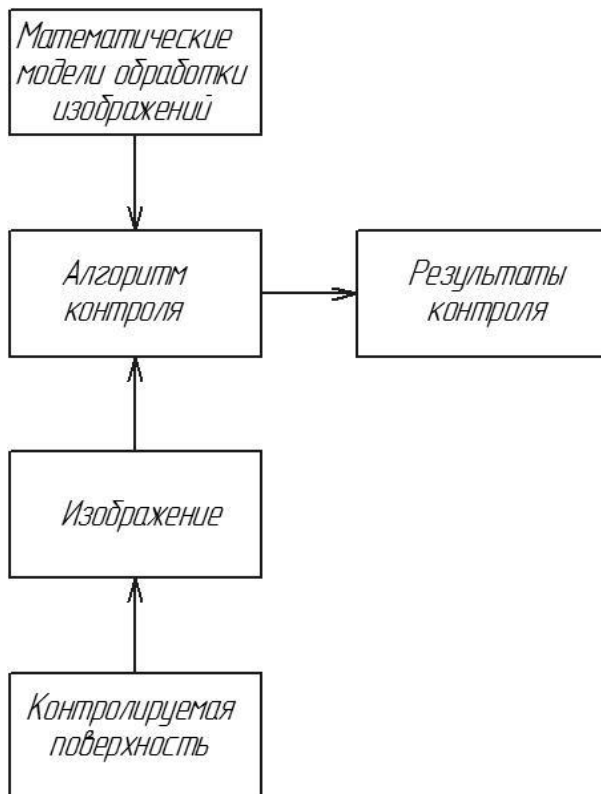


Рисунок 47 – Функциональная схема системы контроля

Обязательным условием для функционирования алгоритмов системы контроля являются изображение, полученное с контролируемой поверхности и математические модели обработки данного изображения. В результате работы алгоритмов контроля выдается информация о наличии дефектов и их геометрических характеристиках.

Разработаем алгоритм, отражающий полную последовательность проведения контроля с использованием цифрового изображения контролируемой поверхности (рисунок 48).

Первый этап алгоритма выполняется при помощи цифровой камеры. Данный метод получения изображения имеет ряд преимуществ. Во-первых,

отсутствует необходимость перевода сигнала из аналогового вида, что ускоряет процесс получения изображения и исключает наличие ошибок связанных с данной процедурой. Во-вторых, цифровые устройства достаточно компактные и имеют хорошие технические характеристики.



Рисунок 48 – Алгоритм цифровой обработки изображения

Второй этап алгоритма связан с улучшением качества изображения. Необходимость проведения данного этапа обусловлена особенностями получения цифрового изображения, которые могут внести в сигнал шумы, искажающие изображение. Кроме того, следует учитывать влияние внешних производственных факторов. В результате чего во входном изображении могут возникнуть дополнительные шумы. Наиболее вероятные из которых это смаз и расфокусировка. Возникновение данных шумов связано с воздействием вибрации, под влиянием которой происходит смещение цифровой камеры в различных плоскостях. Следовательно, для получения корректных результатов контроля необходимо использовать алгоритмы улучшения качества изображения, которые были разработаны ранее в пункте

### 3.1 работы.

Третий этап алгоритма подразумевает проведение бинарной сегментации изображения. Проведение данной процедуры позволит максимально упростить изображения без потери его информационных признаков. Такой подход позволит сократить объем вычислений, что скажется на быстродействии системы в целом. Методика и алгоритмы проведения данного этапа были разработаны ранее в пункте 3.2 работы.

Четвертый этап алгоритма предполагает определение геометрических характеристик дефекта, которые подлежат нормированию. В данном случае это расположение дефекта, его площадь, габаритные размеры и центр. Методика и алгоритмы проведения данного этапа были разработаны ранее в пункте 3.3 работы.

На заключительном этапе работы алгоритма фиксируются результаты его работы. Данные результаты могут содержать информацию о количестве, геометрических характеристиках дефектов их расположении на объекте контроля. Оформление данных результатов может быть в виде карты контроля и различных цифровых массивах информации, которые в дальнейшем могут быть использованы в системе контроля качества.

## **4.2 Разработка структуры системы контроля**

Сформулируем основные требования, предъявляемые к системе, на основе которых затем разработаем ее структуру.

Первое требование заключается в использовании цифрового изображения. Такой вид изображения позволяет получить с него максимальное количество информационных признаков, а также существенно сократить объем предварительной обработки входного изображения. Выполнение данного требования обеспечивается путем применения в системе цифровой камеры в качестве устройства получения первичного изображения.

Второе требование к системе заключается в необходимости обработки цифрового изображения в соответствии с разработанными ранее методиками и математическими моделями. Для реализации данного требования в состав системы необходимо ввести персональный компьютер. Основные требования к компьютеру в данном случае являются наличие оперативной памяти и видео карты больших объемов. Это объясняется тем, что система работает с графическим изображением.

Третье требование заключается в создании наиболее благоприятных условий получения изображения. На формирование изображение большое влияние оказывает освещенность контролируемого объекта. Желательно, чтобы объект был освещен равномерным светом без бликов. Это обеспечит получение равномерной яркости основного фона изображения, а также снизит уровень шумов от мерцания источника освещения, что очень важно в случае применения для бинарной сегментации изображения пороговой обработки. Наиболее подходящим в данном случае является применение устройства освещения обеспечивающего монохромный свет.

Четвертое требование заключается в возможности установки контролируемого объекта и его ориентирования относительно измерительной системы. В данном случае не требуется высокой точности установки и базирования, что объясняется особенностями применяемых алгоритмов и методик обработки изображения. Реализация данного требования возможна путем применения стандартных базирующих и ориентирующих устройств. В случае контроля деталей типа вал наиболее удобным, простым и дешевым решением является применение для установки призм.

Описанных выше требования и технические системы их реализующие обеспечат нормальную работу системы контроля и выполнение ей своего функционального назначения.

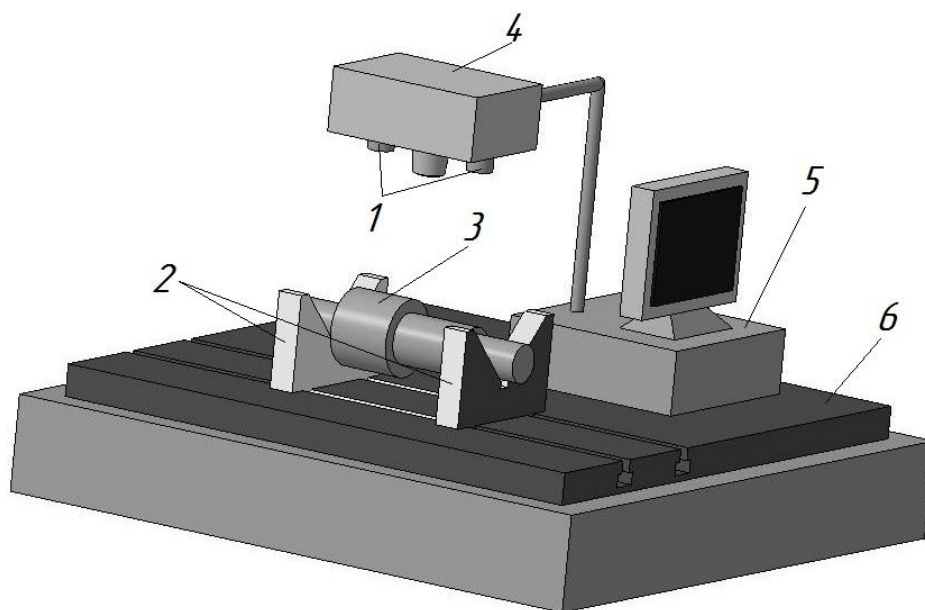
В состав системы контроля также должны быть включены технические средства, обеспечивающие ее связь с периферийными устройствами, обеспечивающими вывод информации о результатах контроля, а также

возможность ее подключения к локальной сети предприятия. Это позволит интегрировать установку в систему контроля качества предприятия, что повысит эффективность ее использования, так как результаты контроля сразу будут попадать в базу данных и могут быть использованы различными специалистами производства [26].

В случае необходимости в состав проектируемой системы можно ввести устройство автоматизации поворота контролируемой заготовки вала. Такое устройство позволит снять с оператора обязанность выполнять поворот заготовки для контроля следующей области. Технически такое устройство можно реализовать на базе делительного механизма. Однако, применение такого устройства приведет к усложнению и удорожанию конструкции. Поэтому его применение имеет смысл только при полной автоматизации процесса контроля. В таком случае потребуется усложнение алгоритмов, обеспечивающих обработку изображения. Это в свою очередь приведет к увеличению объема вычислений и усложнению конструкции. В связи с этим принимаем решение не автоматизировать поворот контролируемой заготовки вала.

В соответствии с описанными выше требованиями спроектирована схема установки контроля наружных дефектов поверхностей деталей типа вал (рисунок 49).

Базовой деталью установки является плита 6 на которую монтируются все основные элементы установки. В плите имеются два Т-образных паза в которые устанавливаются призмы 2, обеспечивающие установку и позиционирование контролируемого вала 3. На плиту также монтируется стойка в которой устанавливаются цифровая камера 4 и источник монохромного света 1. Для удобства работы контролера на плите предусмотрено место под размещение элементов персонального компьютера или ноутбука 5. Камера и системный блок персонального компьютера соединены между собой проводом, позволяющим передавать полученное изображение для его обработки.



1 – источник монохромного света; 2 – призмы; 3 – контролируемый вал; 4 – цифровая камера; 5 – персональный компьютер; 6 – плита

Рисунок 49 – Схема установки контроля наружных дефектов поверхностей деталей типа вал

С целью снижения стоимости установки контроля при ее реализации предполагается использование стандартных технических средств. Из нестандартного оборудования в системе предполагается применение плиты, на которой размещаются основные элементы установки и стойки, на которой размещается цифровая камера и источники света. Данное решение позволит обеспечить требуемые показатели контроля при сохранении невысокой стоимости установки контроля.

Важными элементами в данной системе являются камера и источник света, так как именно они обеспечивают формирование исходного изображения.

Выбор камеры влияет на многие технические показатели системы. В нашем случае определяющим является разрешающая способность камеры. С одной стороны она должна быть максимально возможной, с другой избыточная разрешающая способность приведет к необоснованному удорожанию системы контроля в целом. Проведя анализ имеющихся



рекомендаций по выбору камер для систем технического зрения [27], приходим к выводу, что исходя из особенностей решаемой задачи, оптимальным решением будет использование камеры с разрешением 5 мегапикселей.

Вопрос выбора источника света достаточно сложный, так как от его решения зависит качество исходного изображения. Основное требование к источнику света заключается в том, чтобы не возникало дополнительных шумов, вызванных мерцанием источника, и контролируемая поверхность была освещена равномерно. Проведя анализ известных решений [27] приходим к выводу, что для решения поставленной задачи наиболее подходит источник монохромного света.

Контроль производится следующим образом. Контролируемый вал устанавливается на призмы. Включается источник монохромного света и производится снятие изображения. Далее происходит обработка полученного исходного изображения в соответствии с алгоритмами, приведенными в пункте 3 работы, разработанными на основе математического аппарата приведенного в пункте 4 работы. Затем деталь поворачивается в призмах на 45 градусов и процесс повторяется.

Важную роль в проектируемой установке играет программное обеспечение, реализующее непосредственно обработку изображения, а также обеспечивающее взаимодействие между техническими устройствами системы, внешними устройствами и вычислительной системой предприятия. Разработаем структурную схему организации программного обеспечения, которая обеспечит информационное взаимодействие всех элементов системы (рисунок 50).

Представленная структурная схема организации программного обеспечения построена с соблюдением всех основных принципов.

В первую очередь структура системы позволяет вносить в нее необходимые изменения и подключать дополнительные периферийные устройства, то есть архитектура системы является открытой.

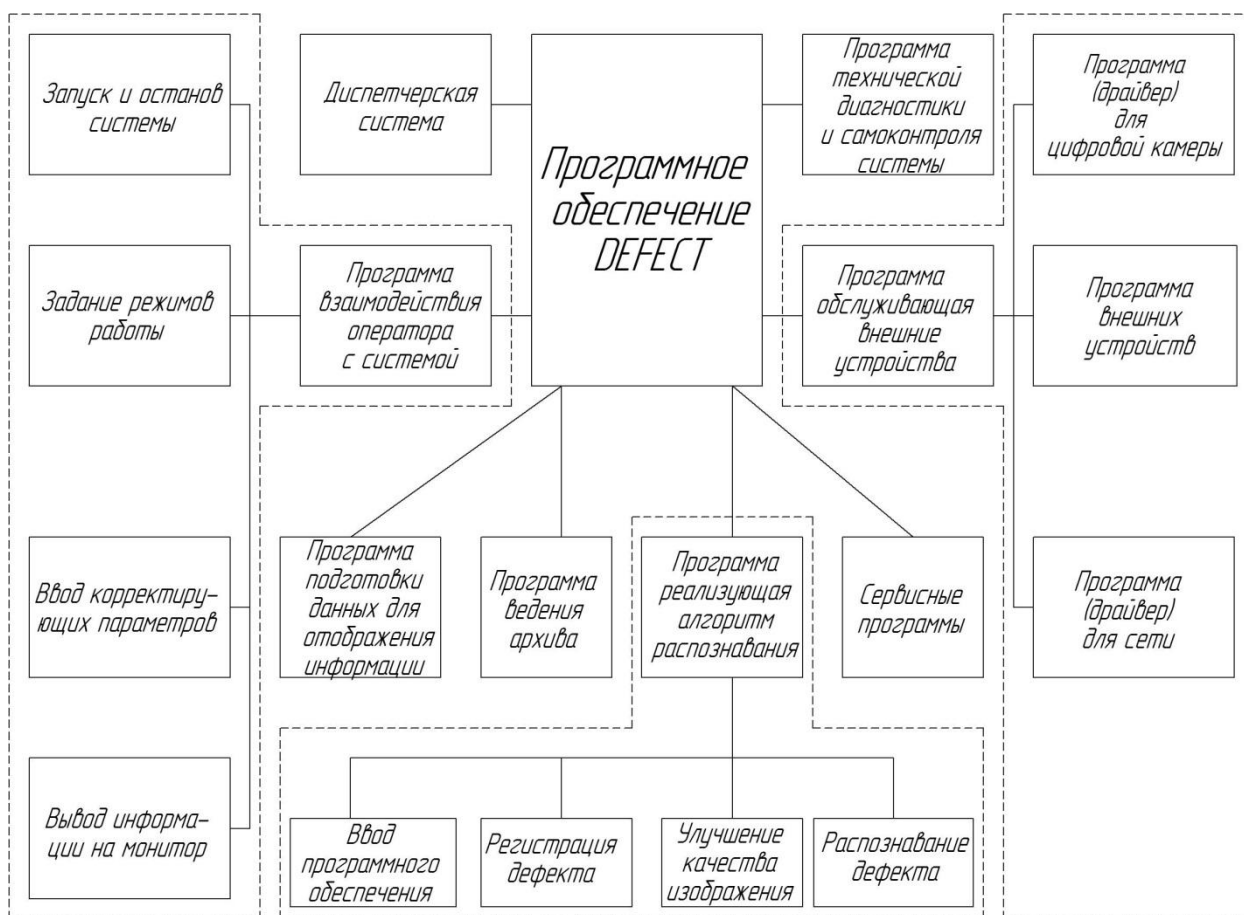


Рисунок 50 – Структурная схема организации программного обеспечения

Весь комплекс программного обеспечения разбит на две группы. Первая группа прикладных программ выполняет решение задач обработки изображения и получения результатов контроля. Вторая группа общесистемных программ выполняет решение задач общесистемного характера, направленных на функционирование системы в целом и ее взаимодействие с другими устройствами.

Данный блочно-иерархический подход в структуре организации программного обеспечения имеет ряд преимуществ. Во-первых, каждый блок можно разрабатывать и отрабатывать отдельно, с привлечением различных специалистов, что ускорит процесс разработки. Во-вторых, отработка всего программного комплекса в целом займет меньше времени.

«Реализация разработанной структурной схемы выполняется поэтапно [27]. «Сначала отрабатывается каждый блок представленной схемы в

отдельности. Затем обрабатывается весь программный комплекс» [27]. В ходе выполнения данных мероприятий необходимо проверить и в случае обнаружения проблем провести корректировку взаимодействия между соответствующими блоками программ и подпрограмм [27].

Преимуществами такой структуры программного обеспечения являются:

- высокое быстродействие,
- надежность,
- минимальный объем вычислений,
- возможность использования внешних устройств,
- минимальная задержка в обмене данными.

Проведем количественную оценку работы спроектированной системы.

Точность контроля с применением спроектированной системы оценивалась в сравнении с традиционным визуально-инструментальным способом. По результатам 60 измерений отклонения в показаниях составили от 0,5% до 1,1%.

Стабильность работы системы оценена путем проведения замеров на одном и том же образце. Проведено 60 измерений без переустановки контролируемого вала и 60 с переустановкой. Результаты контроля отличались в первом случае на 0,5%, во втором на 0,8%.

Устойчивость к помехам оценена путем добавления шума к эталонному изображению. В результате возникновение ложных сигналов появилось при отношении уровней сигнал-шум 12%.

В результате выполнения данного раздела были решены задачи разработки алгоритмов работы и структуры системы контроля. Разработаны алгоритм процедуры улучшения качества изображения, алгоритм процедуры обнаружения и определения характеристик дефекта, функциональная схема системы контроля, алгоритм цифровой обработки изображения, схема установки контроля, структурная схема организации программного обеспечения.

## Заключение

Выполнение данной работы позволило решить следующие задачи.

На первом этапе проведен анализ применяемых методов контроля поверхностей заготовок деталей типа вал. По результатам данного анализа определены преимущества и недостатки применяемых методов контроля, а также выработаны требования к проектируемой системе контроля.

Далее были решены ключевые с точки зрения обработки цифрового изображения вопросы построения математического описания основных этапов обработки. Предложена модель предварительного улучшения качества изображения и проведена оценка его эффективности, которая показала хорошие результаты при применении для решаемой задачи. Рассмотрены вопросы предварительной бинарной сегментации изображения с целью сокращения объемов обработки и ее упрощения. Подобран оптимальный метод бинаризации на основе пороговой обработки. Разработан алгоритм и математический аппарат, позволяющий выполнить оценку геометрических характеристик обнаруженных дефектов и принять решение о соответствии контролируемого объекта нормативным значениям.

На заключительном этапе были решены задачи разработки алгоритмов работы и структуры системы контроля. Разработаны алгоритм процедуры улучшения качества изображения, алгоритм процедуры обнаружения и определения характеристик дефекта, функциональная схема системы контроля, алгоритм цифровой обработки изображения, схема установки контроля, структурная схема организации программного обеспечения. Проведена оценка спроектированной системы на точность проведения контроля, стабильность работы и устойчивость к помехам.

Следовательно, цель данной работы, которая заключается в проектировании системы контроля, позволяющей обнаружить и определить геометрические параметры дефектов поверхностей деталей и не требующей непосредственного участия контролера в процессе контроля, достигнута.

## Список используемых источников

1. Альзаки Х.М.Х. Текстульная 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. 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.

3. Богучарский С. И. Обработка изображений на основе комбинированного векторного квантования с использованием полуконтролируемого обучения // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. « Математическое моделирование в технике и технологиях». Харьков : НТУ «ХПИ». 2014. № 6 (1049). С. 20–29.

4. 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.

5. Горячкин Б.С., Китов М.А. КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ // E-Scio. 2020. №9 (48). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompyuternoe-zrenie-1> (дата обращения: 24.03.2024).

6. ГОСТ 21014-2022. Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения. – Введ. 2022–09–01. – М. : Российский институт стандартизации, 2022. – 98 с.

7. 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.

8. Демин А.В., Сечак Е.Н., Присяжнюк С.П. Определение состава

объекта по его гиперспектральному изображению // КО. 2021. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-sostava-obekta-po-ego-giperspektralnomu-izobrazheniyu> (дата обращения: 11.05.2024).

9. Джо К.О., Гергет О. М. Методы и алгоритмы сегментации изображений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. №2 (8). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-algoritmy-segmentatsii-izobrazheniy> (дата обращения: 28.04.2024).

10. 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.

11. Золотовский Д.В., Костюк А.И. Параллельная обработка и идентификация изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. 1999. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parallelnaya-obrabotka-i-identifikatsiya-izobrazheniy> (дата обращения: 17.04.2024).

12. Куликова Ю.Д. Предварительная обработка изображений с недостаточной освещенностью // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. №13. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/predvaritelnaya-obrabotka-izobrazheniy-s-nedostatocnoy-osveschennostyu> (дата обращения: 23.04.2024).

13. Методы искусственного интеллекта в обработке данных и изображений : монография / А. Ю. Дёмин, А. К. Стоянов, В. Б. Немировский, В. А. Дорофеев. – Томск : ТПУ, 2016. – 130 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/106257> (дата обращения: 09.04.2024).

14. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Сойфера В. А.-2-е изд., испр.-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.– 784 с.

15. Мин И. В. Сегментация изображений на основе выделения текстурных и цветовых признаков // Современные техника и технологии : материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. Томск : Томск. политех. ун-т, 2012. С. 290–292.

16. Нгуен Т.Х. Математические методы моделирования и классификации объектов на основе технического зрения и машинного обучения : диссертация ... кандидата технических наук : защищена 05.13.18 / Нгуен Тху Хыонг. – Иркутск, 2019. – 133 с.

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

18. Применение переключающихся медианных фильтров для восстановления зашумленных изображений / С.С. Бухтояров, А.Л. Приоров, И.В. Апальков, В.В. Хрящев // Вопросы радиоэлектроники: Серия общетехническая. – 2006. – Т. 4, № 2. – С. 137–147.

19. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: в 2-х кн. / У. Прэтт, Д.С. Лебедев. – М.: Мир, 1982. – Кн. 1. – 310 с.; кн. 2. – 790 с.

20. Селянкин В. В. Компьютерное зрение. Анализ и обработка изображений : учебное пособие / В. В. Селянкин. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 152 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/113938> (дата обращения: 25.04.2024).

21. Славин О.А., Федотов Г.О. Вопросы распознавания текста, оцифрованного с помощью видеокамер. Управление информационными потоками. / О.А Славин., Г.О. Федотов – М.: Сборник трудов Института системного анализа Российской академии наук. Под ред. д. т. н., проф. В. Л. Арлазарова, д. т. н., проф. Н. Е. Емельянова. – 2002. – 124 с.

22. Сурин В.А. Об обработке зашумленных контрастных изображений // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-obrabotke-zashumlennyh-kontrastnyh-izobrazheniy> (дата обращения: 22.04.2024).

23. Тырсин А.Н. Робастное построение регрессионных зависимостей на основе обобщенного метода наименьших модулей / А.Н. Тырсин // Записки научных семинаров ПОМИ РАН. – 2005. – Т. 328. – С. 236–250.

24. Федотов А. А. Введение в цифровую обработку биомедицинских

изображений : учебное пособие / А. А. Федотов. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 108 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/112697> (дата обращения: 26.04.2024).

25. Цифровое преобразование изображений: Учеб. Пособие для вузов / под ред. Быкова Р.Е. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 228с.

26. Черепанов Н.В., Буслаев С.П. Применение и развитие системы электронного архива конструкторской, технологической и технической документации для хранения и использования электронных документов машиностроительного предприятия и его правовое обеспечение // Инновации и инвестиции. 2021. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-i-razvitiye-sistemy-elektronnogo-arhiva-konstruktorskoj-tehnologicheskoy-i-tehnicheskoy-dokumentatsii-dlya-hraneniya-i> (дата обращения: 20.04.2024).

27. 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.

28. Arai, Kohei. Advances in Computer Vision: Proceedings of the 2019 Computer Vision Conference (CVC), Volume 2. Springer, 2019.

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. Laiho M., Poikonen J., Paasio A. Object segmentation and tracking with asynchronous grayscale and binary wave operations on the mipa4k / M. Laiho, J. Poikonen, A. Paasio // 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications, CNNA – 2010. – P. 5430302.

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. Scherer, Rafał. Computer vision methods for fast image classification and retrieval. Springer International Publishing, 2020.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.