

*На правах рукописи*

СТАРОСТИН Дмитрий Александрович

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ОСНОВЕ ГИББСОВСКИХ  
СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2003

Работа выполнена в Институте менеджмента и информационных технологий (филиале)  
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в г. Череповце.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Малыгин Леонид Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Хименко Виталий Иванович  
доктор технических наук, профессор  
Изранцев Виталий Васильевич

Ведущее предприятие - ОАО «Северсталь» (г. Череповец).

Защита состоится 25 июня 2003 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.10 при  
Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29, 9-ый учебный корпус, ауд. 535.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГПУ.

Автореферат разослан 23 мая 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
доктор технических наук

Малыхина Г. Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Возрастающий спрос на стальную полосу высокого качества, выпускаемую на скоростных станах холодной и горячей прокатки, требует обеспечения эффективного контроля ее поверхности, который осуществляется в настоящее время, как правило, визуально работниками ОТК. Однако, из-за присущего субъективизма, непостоянной природы человеческого зрения конечная визуальная проверка поверхности проката не дает удовлетворительных результатов. Как следствие необнаруженные дефекты проявляются на следующих переделах, ведут к сбоям технологии и зачастую переходят на конечный продукт, отгружаемый потребителю. Вот почему сегодня во всем мире ведутся активные работы в области создания автоматических оптико-электронных систем контроля качества поверхности стальной полосы.

К числу основных задач при разработке таких систем следует отнести настройку основных параметров оптико-электронных систем контроля качества поверхности металлопроката (ОЭСККПМ) и, прежде всего, параметров оптической схемы, алгоритмов обнаружения дефектов и т.п. Зачастую эта задача решается экспериментальным путем, методом «проб и ошибок». Использование эффективной модели изображения поверхности позволило бы существенно снизить время и материальные издержки на этапе проектирования подобных систем.

Отдельные публикации в зарубежной печати, касающиеся вопросов построения таких моделей, носят, в основном, рекламный характер и не раскрывают сути предложенных решений. Отечественные методики моделирования изображения поверхности стальной полосы, использующие либо модель Бугера, либо «классическую» модель Гиббса, не позволяют решать эффективно задачи проектирования. Представления изображений, используемые в компьютерной графике и позволяющие синтезировать текстуры, например, на основе теории вейвлет-преобразований или теории фракталов, используются, в основном, для сжатия изображений. В задачах оптико-электронного контроля качества поверхности металлопроката эти представления могут применяться, но лишь на этапах предварительной обработки и хранения изображений поверхности или на этапе классификации дефектов. Как правило, такое ограничение обусловливается сложностью построения имитационной модели изображения поверхности стальной полосы.

Таким образом, проблема построения моделей изображения поверхности стальной полосы, позволяющей настраивать параметры оптической схемы и параметры алгоритмов сегментации оптико-электронных систем контроля качества поверхности стальной полосы на сегодняшний день мало изучена и представляется весьма актуальной.

**Цель работы.** Построение математической и имитационной моделей изображения поверхности стальной полосы, которые не только адекватно описывают изображение, но и позволяют настраивать основные параметры оптической схемы, а также характеристики алгоритмов сегментации ОЭСККПМ.

В соответствии с этой целью в работе решаются следующие **основные задачи**:

- Анализ современного состояния проблемы моделирования изображения поверхности стальной полосы в задачах проектирования ОЭСККПМ.
- Математическое и имитационное моделирование изображения поверхности стальной полосы на основе теории гиббсовских случайных полей.
- Оптимизация процесса поиска основных параметров оптико-электронных систем контроля качества поверхности металлопроката на основе имитационного моделирования.
- Экспериментальные исследования разработанных моделей изображения поверхности стальной полосы.

**Объект исследования:** изображение поверхности стальной полосы.

**Методы исследований.** Для решения поставленных в работе задач использован аппарат теории вероятностей и математической статистики, теории случайных полей, теории распознавания образов, обработки и анализа растровых полутоновых изображений, теории методов статистического моделирования на ЭВМ.

**Научная новизна** результатов работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель изображения поверхности стальной полосы на основе гиббсовских случайных полей, использующая новый способ представления индикаторных функций, а также методику оценки параметров предложенной модели на основе аппарата генетических алгоритмов.
2. Разработана имитационная модель изображения поверхности стальной полосы, осуществляющая синтез изображений поверхности стальной полосы и обеспечивающая возможности оптимизации параметров оптической схемы, тестирования и настройки алгоритмов сегментации.
3. Предложен новый способ оптимизации оптико-электронных систем контроля качества поверхности стальной полосы, включающий в себя методику, критерии и алгоритм оптимизации параметров оптической схемы.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

1. Разработано программное обеспечение процедуры имитационного моделирования изображения, позволяющее синтезировать изображения поверхности металлопроката с различными типами дефектных областей.
2. Разработано программное обеспечение для расчета параметров гиббсовского распределения уровней яркости бездефектных и дефектных областей на изображении поверхности стальной холоднокатаной

- полосы. Рассчитаны параметры распределения уровней яркости для изображений наиболее часто встречающихся поверхностных дефектов и бездефектной поверхности.
3. Разработано программное обеспечение для проверки адекватности предложенных моделей и поиска их оптимальных параметров, при помощи которого обоснована адекватность применения гиббсовского подхода для моделирования изображений поверхности металлопроката.
  4. Даны практические рекомендации по выбору оптимальных параметров оптической схемы при проектировании оптико-электронных систем контроля качества поверхности горячекатаного и холоднокатаного металлопроката.
  5. Предложен критерий оценки эффективности алгоритмов сегментации изображений поверхности металлопроката. Создано программное обеспечение для проверки эффективности таких алгоритмов.
  6. Полученные результаты использованы при проектировании автоматизированной оптико-электронной системы контроля качества поверхности стальной холоднокатаной полосы, разрабатываемой Институтом менеджмента и информационных технологий (филиалом) СПбГПУ по заказу ООО «Малленом».
  7. Результаты исследований используются в учебном процессе в Институте менеджмента и информационных технологий (филиале) СПбГПУ в г. Череповце в курсе «Обработка и анализ изображений» для специальности 220400-«Программное обеспечение ВТ и АС».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XIV, XV Межвузовских военно-научных конференциях (Череповец, 2000 г., 2002 г.), Межвузовской электронной научно-технической конференции «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии» (Вологда, 2001 г.), Межвузовской научно-методической конференции «Образование. Наука. Бизнес. Особенности регионального развития и интеграции» (Череповец, 2002 г.), Межвузовской научно-технической конференции «Интеллектуальные САПР – 2002» (Геленджик, 2002 г.), а также на заседаниях кафедры программного обеспечения ВТ и АС, научных семинарах Института менеджмента и информационных технологий СПбГПУ и Череповецкого научно-координационного центра РАН.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 7 печатных работ.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель изображения поверхности стальной полосы на основе математического аппарата теории случайных полей.
2. Имитационная модель изображения поверхности стальной полосы.
3. Способ оптимизации параметров оптической схемы в задачах проектирования оптико-электронных систем контроля качества поверхности стальной полосы.
4. Экспериментальная установка для исследования моделей изображения поверхности стальной полосы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения. Содержит 136 страниц основного текста, 32 рисунка, 13 таблиц, список использованной литературы из 87 наименований, 10 приложений на 22 страницах.

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ

Отмечено, что основной продукцией металлургического производства является горячекатаная и холоднокатаная стальная полоса. Выявлен один из наиболее перспективных путей решения проблемы контроля качества поверхности стальной полосы с использованием оптико-электронных систем контроля. Дана общая характеристика, указаны критерии эффективности и требования, предъявляемые к таким системам. Приведены классификация и описание поверхностных дефектов холоднокатаного и горячекатаного металлопроката.

Показано, что эффективность ОЭСККПМ зависит от настройки основных параметров оптической схемы и параметров алгоритмов сегментации. Альтернативой настройки параметров экспертным методом является построение модели изображения поверхности стальной полосы и ее экспериментальные исследования.

Дано описание объекта исследования, которым является изображение поверхности стальной полосы в ОЭСККПМ.

Проведен анализ современного состояния проблемы моделирования изображения поверхности стальной полосы. Рассмотрены известные методы, средства и модели, используемые при разработке оптико-электронных систем контроля качества поверхности металлопроката. Выявлены их основные достоинства и недостатки. Отмечено, что имеющие место на настоящий момент публикации в области моделирования изображения поверхности металлопроката, как правило, либо носят рекламный характер и не раскрывают сути предложенных решений, либо не позволяют эффективно решать задачи проектирования ОЭСККПМ.

Выявлен наиболее перспективный подход к моделированию изображения поверхности стальной полосы на основе математического аппарата теории гиббсовских случайных полей. Показано, что известные модели, использующие этот подход, позволяют адекватно описать изображение поверхности, но не учитывают параметры оптической схемы и не обеспечивают возможность настройки параметров алгоритмов обнаружения дефектов.

Указанные выводы определили круг основных решаемых в диссертационной работе проблем:

1. Математическое и имитационное моделирование изображения поверхности стальной полосы на основе гиббсовской теории случайных полей.
2. Оптимизация процесса поиска основных параметров оптико-электронных систем контроля качества поверхности металлопроката на основе имитационного моделирования.
3. Экспериментальные исследования разработанных моделей изображения поверхности стальной полосы.

Указаны пути совершенствования известных моделей изображения поверхности стальной полосы на основе гиббсовских случайных полей: реализация нового метода оценки параметров математической модели и построение на ее основе имитационной модели, позволяющей настраивать основные параметры систем контроля качества поверхности металлопроката, такие как параметры оптической схемы и параметры алгоритмов обнаружения дефектов ОЭСККПМ.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ НА ОСНОВЕ ГИББСОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ

Для моделирования изображения поверхности металлопроката в работе предложено использовать аппарат теории случайных полей. Изображение при этом рассматривается в виде случайной комбинации меток, приписанных регулярным узлам его решетки  $L = \{(i, j) | 1 \leq i \leq N_1, 1 \leq j \leq N_2\}$ , где  $N_1$  и  $N_2$  - определяют размер изображения.

В случае полутонового растрового изображения стальной полосы, метки принимают дискретные значения из множества меток:  $M = \{m_1, \dots, m_N\}$ . На верхнем уровне описания изображения в виде комбинаций дефектных и бездефектных областей предлагается использовать нумерующее множество  $M = \{1, 2, \dots, N\}$ . На нижнем уровне при описании текстуры изображения бездефектных и дефектных областей множество меток представляет собой множество соответствующих уровней яркости.

Узлы в  $L$  рассматриваются в отношении друг к другу, образуя системы окрестностей, которые определяются как  $\eta = \{\eta_i | \forall i \in L\}$ , где  $\eta_i$  - множество узлов, связанных с узлом  $i$  некоторым порядком соседства. Принцип формирования систем окрестностей различных порядков произвольного узла  $x$  показан на рис. 1.

Пара  $(L, \eta)$  образует граф, где  $L$  содержит узлы и  $\eta$  определяет связи между узлами согласно отношениям соседства. Взаимность  $c$  для  $(L, \eta)$  определяется как подмножество узлов в  $L$ . Тип взаимности для регулярной решетки определен ее размером, формой и направлением. Набор всех взаимностей для  $(L, \eta)$  определен как  $C = C_1 \cup C_2 \cup C_3 \dots$ , где "..." - возможные наборы взаимностей для окрестностей больших порядков. Всевозможные типы взаимностей для систем окрестностей второго порядка на решетке изображения показаны на рис. 2.

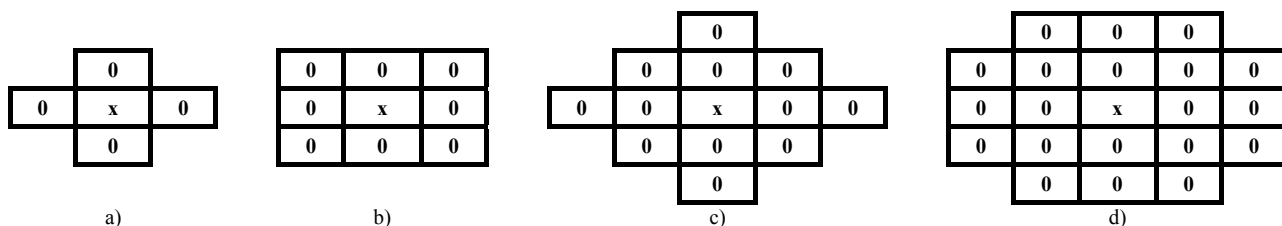


Рис. 1 Системы окрестностей узла x: 1,2,3,4 порядков  
 а) окрестность первого порядка; б) окрестность второго порядка;  
 с) окрестность третьего порядка; д) окрестность четвертого порядка.

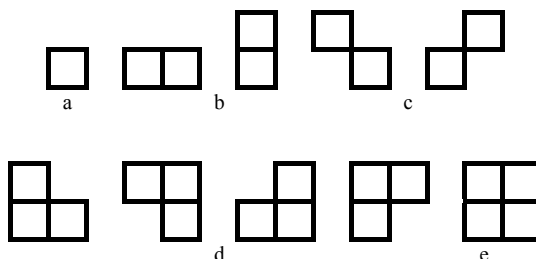


Рис. 2 Взаимности для системы окрестностей второго порядка.

Классическим подходом к описанию дискретных случайных полей является теория марковских случайных полей, на основе которой взаимосвязь между значениями меток соседних узлов может быть

описана через условные вероятности. Однако непосредственное использование этого математического аппарата приводит к ряду практических, в основном вычислительных трудностей. Поэтому для описания текстуры поверхности металлопроката предложено использовать совместные вероятности комбинаций значения меток. Это становится возможным благодаря переходу от марковских случайных полей к гиббсовскому описанию случайных полей.

Таким образом, в работе изображение поверхности металлопроката и его отдельные области описаны как гиббсовское случайное поле  $F$ , состоящее из дискретных случайных величин  $\{F_{i,j}\}$ , принимающих  $N$  значений из множества меток  $M = \{m_1, \dots, m_N\}$ .

В работе показано, что при описании изображения поверхности металлопроката гиббсовское случайное поле может считаться однородным. В этом случае энергия распределения Гиббса может быть представлена как сумма нескольких слагаемых, каждое из которых определяется взаимностями конкретного порядка:

$$U(f) = \sum_{\{i\} \in c_1} V_1(f_i) + \sum_{\{i,i'\} \in c_2} V_2(f_i, f_{i'}) + \sum_{\{i,i',i''\} \in c_3} V_3(f_i, f_{i'}, f_{i''}) + \dots$$

где  $f_i, f_{i'}, f_{i''} \in M, V_c(\cdot)$  - потенциалы взаимностей.

Каждому типу взаимности, входящему в  $U(f)$ , поставлен в соответствие некоторый параметр, согласно схеме, представленной на рис.3.

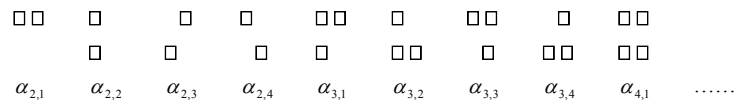


Рис. 3 Параметры для взаимностей систем окрестностей.

Эти параметры являются мультипликативными коэффициентами при вычислении потенциалов взаимностей и являются основными параметрами гиббсовского распределения.

В общем случае имеется  $N-1$  типов дефектов поверхности стальной полосы, каждый из которых имеет свою собственную текстуру на изображении. Изображение бездефектных областей также определяется своим типом текстуры. Множество всех текстур изображений, как бездефектной поверхности, так и дефектных, обозначается через  $\{T^n\} n = 1, 2, \dots, N$ . Каждая из текстур представлена дискретным гиббсовским случайным полем, определенным на решетке  $L$  и принимающем значения яркости из  $G_n = \{g_{ni}\}_{i=1}^{r_n}$ .  $r_n$  определяет число уровней яркости в текстуре  $T^n$ .  $\{g_{ni}\}_{i=1}^{r_n}$  являются фактическими уровнями яркости в  $T^n$ . В этом случае  $Q_{ij}(\cdot) = T_{ij}^n(\cdot)$ , если  $Y_{ij}(\cdot) = n$  для  $n = 1, \dots, N$  для каждого узла  $(i, j) \in L$ , где  $(\cdot)$  обозначает простую пространственную зависимость.

Задача оценки параметров гиббсовского распределения случайного поля  $(\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{1,M}, \alpha_{2,1}, \dots, \alpha_{3,1}, \dots)$  заключается в выборе оптимального способа оценки параметров из нескольких вариантов, предложенных в работе.

Первый способ заключается в построении гистограммы и стандартной линейной оценки методом наименьших квадратов. Рассматривается узел  $(i, j)$  и его окрестность  $\eta_{ij}$ .  $s$  представляет  $y_{ij}$ , а  $t = [u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4, \dots]^T$  - вектор значений соседей  $y_{ij}$ . Местоположение  $u_i$  и  $v_i$  относительно  $s$  показано на рис.4.

Вместо «классических жестких» индикаторных функций, применяемых для расчета потенциальных функций, в работе предлагается использовать интервальные индикаторные функции, выявленные экспериментальным путем, вида:

$$I(z_1, \dots, z_k) = \begin{cases} -1, & \text{если } z_1 = z_2 = \dots = z_k \\ \left( \frac{\sqrt{\sum \frac{(z_i - \bar{z})^2}{k}}}{\frac{k}{2}} \right) \bullet 2 - 1, & \text{иначе} \end{cases}; J_n(s) = \exp\left(-\frac{(s - s_n)^2}{2 \cdot \hat{\sigma}^2}\right)$$

где  $\bar{z} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i$ ,  $\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{D}_s}$ ,  $\hat{D}_s$  - рассчитывается по выборке изображений.

...	...	...	...	...
...	$v_1$	$u_2$	$v_2$	...
$w_1$	$u_1$	$s$	$u_3$	...
...	$v_4$	$u_4$	$v_3$	...
...	...	...	...	...

Рис. 4 Окрестность  $\eta_{ij}$  узла  $s$ .

В этом случае сумма потенциалов всех взаимностей  $V(s, t, \theta)$ , содержащих узел  $(i, j)$  запишется в виде:  $V(s, t, \theta) = \phi^T(s, t)\theta$ ,

где  $\theta$  - искомый вектор параметров.

$$\phi(s, t) = \begin{bmatrix} J_1(s), J_2(s), \dots, J_N, \\ I(s, u_1) + I(s, u_3), \\ I(s, u_2) + I(s, u_4), \\ I(s, v_2) + I(s, v_4), \\ I(s, v_1) + I(s, v_3), \\ I(s, u_2, v_2) + I(s, u_4, u_3) + I(s, u_1, v_4), \\ I(s, u_4, v_3) + I(s, u_2, u_3) + I(s, u_1, v_1), \\ I(s, u_2, v_1) + I(s, u_1, u_4) + I(s, u_3, v_3), \\ I(s, u_1, u_2) + I(s, u_4, v_4) + I(s, u_3, v_2), \\ I(s, u_1, v_1, u_2) + I(s, u_2, v_2, u_3) + I(s, u_3, v_3, u_4) + I(s, u_4, v_4, u_1) \\ \vdots \\ \sum_{\substack{z_1=s \\ z_2, \dots, z_k \in c}} I(z_1, z_2, \dots, z_k) \end{bmatrix}$$

$$\theta = [\alpha_{1,1}, \alpha_{1,2}, \dots, \alpha_{1,M}, \alpha_{2,1}, \dots, \alpha_{3,1}, \dots]^T$$

Определение параметров вектора  $\theta$  производится через решение системы уравнений:

$$(\phi(k, t) - \phi(k', t))^T \theta = \ln \left( \frac{P(k', t)}{P(k, t)} \right) \quad (1)$$

где  $P(s, t)$  является совместным распределением случайных значений меток в апертуре  $n_1 \times n_1$  с центром в  $(i, j)$ ,  $k, k' \in M$ .

Для каждой отличной пары  $(k, k')$  и всех возможных значений вектора  $t$ , вычисляются линейные уравнения. Нахождение решения вектора параметров  $\theta$  производится по методу наименьших квадратов. Оценка  $P(s, t)$  производится на основании гистограммных методов.

Второй способ оценки параметров модели Гиббса, предлагаемый в работе основан на применении генетических алгоритмов (ГА).

Результатом работы ГА является набор уравнений, образующих систему уравнений:  $(\phi(k, t) - \phi(k', t))^T \theta = \ln \left( \frac{P(k', t)}{P(k, t)} \right)$ , решение которой дает оценку параметров  $\theta$ , наиболее

точную с точки зрения ГА. Схема оценки вектора параметров  $\theta$  заключается в следующем:

- Шаг 1. Инициализация начальной популяции.

Ввести точку отсчета эпох  $t = 0$ . Инициализировать случайным образом  $M$  генотипов особей из системы уравнений (1) для одной реализации ГСП и сформировать из них начальную популяцию  $B(0) = (A_1(0), \dots, A_M(0))$ . Вычислить приспособленность особей популяции

$v(0) = (\mu_1(0), \dots, \mu_M(0))$  как  $\mu_n(0) = \left| \ln \left( \frac{P(k_n', t_n)}{P(k_n, t_n)} \right) - (\phi(k_n, t_n) - \phi(k_n', t_n))^T \theta \right|$ , а затем - среднюю приспособленность по популяции  $\hat{\mu}(0) = \frac{\sum_{h=1}^M \mu_h(0)}{M}$ .

- Шаг 2. Выбор родителей для скрещивания.

Увеличить номер эпохи на единицу  $t = t + 1$ . Определить случайную переменную  $Rand_t$  на множестве  $E_M = \{1, \dots, M\}$ , назначив вероятность выпадения любого  $h \in E_M$  пропорциональной  $\frac{\mu_h(t)}{\hat{\mu}(t)}$ .

Сделать одно испытание  $Rand_t$  и вычислить результат  $i(t)$ , который определит номер первого родителя  $A_{i(t)}(t)$ . Повторным испытанием определить номер второго родителя  $i'(t)$ .

- Шаг 3. Формирование генотипа потомка.

С вероятностью  $P_c$  произвести над генотипами выбранных родителей кроссовер. Выбрать с вероятностью 0,5 одного из результатов и сохранить его как  $A'(t)$ . Последовательно применить к  $A'(t)$  оператор инверсии (с вероятностью  $P_i$ ), а затем оператор мутации (с вероятностью  $P_m$ ). Полученный генотип потомка сохранить как  $A''(t)$ .

- Шаг 4. Отбор особи на элиминирование и замена ее потомком.

Определить номер  $j(t)$  особи с минимальной приспособленностью в популяции, которую заместит потомок. Обновить текущую популяцию  $B(t)$  путем замены  $A_{i(t)}(t)$  на  $A''(t)$ .

- Шаг 5. Определение приспособленности потомка.

Вычислить приспособленность потомка  $\mu_E(A''(t))$ . Обновить значение средней приспособленности  $\hat{\mu}(t)$  и вектор приспособленности  $v(t)$ .

- Шаг 6. Перейти к шагу 2.

▪ Шаг 7. Пополнение популяции родителей для следующей реализации ГСП. Проверка на останов. Переход к шагу 1.

Априорно величины стратегических параметров – кроссовера, мутации и инверсии рекомендовано выбирать на уровне  $P_c=0,9$ ;  $P_i=0,01$ ;  $P_m=0,1$ .

Для формирования набора статистики для нахождения параметров гиббсовского распределения предлагается использовать нейросеть, которая решает задачу аппроксимации распределения комбинаций  $(s, t)$  и оценивает  $P(s, t)$  – вероятности появления таких комбинаций, которые вычисляются как отношение  $N(s, t)$  к  $K$ . В итоге, определяется приближение функции многих переменных для частично заданных табличных значений с помощью перцептрона, параметры которого в диссертационной работе подбираются экспериментальным путем. Для обучения сети применяется обучение с учителем на основе использования алгоритма обратного распространения ошибки. Количество скрытых слоев равно одному. Константа, определяющая скорость обучения, была выбрана равной 0,1. Количество входов зависит от порядка системы окрестностей, используемой для формирования ГСП.

На основе двух указанных способов предложены следующие варианты оценки параметров:

1. Решение полной системы по МНК для всех  $N(s, t) \neq 0$ .
2. Решение поднабора уравнений по МНК для всех  $N(s, t) > P$ .
3. Решение полной системы по МНК для аппроксимированных  $N(s, t) \neq 0$  и  $K \neq 0$ .
4. Решение поднабора уравнений по МНК для аппроксимированных  $N(s, t) \neq 0$  и  $K \neq 0$ , при  $N(s, t) > P$ .
5. Решение на основе ГА без предварительной аппроксимации для  $N(s, t) > P$ .
6. Решение на основе ГА без предварительной аппроксимации для всех  $N(s, t) \neq 0$ .
7. Решение на основе ГА с предварительной аппроксимацией для  $N(s, t) > P$ .
8. Решение на основе ГА с предварительной аппроксимацией для всех  $N(s, t) \neq 0$ .

Предлагаемая в работе методика проверки адекватности предложенной модели и выбора оптимального способа оценки параметров модели заключается в следующем.



Формируется тестовая выборка из  $N$  изображений поверхности (например, бездефектной). Каждое изображение разбивается на четыре равные части, для которых происходит вычисление вектора параметров  $\theta(i)$ , где  $i = \overline{1,4}$ . Для каждой части изображения рассчитывается среднее значение вектора  $\theta(i)$  по формуле:

$$\theta_{avg}(i) = \sum_j \theta_j(i), \text{ где } j - \text{ номер изображения в выборке.}$$

Для восьми вариантов оценки параметров аналитической модели, рассчитываются значения эталонных векторов параметров  $\theta_{\text{э}1}, \dots, \theta_{\text{э}8}$ , как средние значения по всем изображениям в выборке, и после чего строится имитационная модель, на основе использования алгоритма «образец Гиббса». С помощью имитационной модели осуществляется синтез изображений поверхности полосы металлопроката. Далее происходит накопление статистики синтезированных изображений, для которых оцениваются значения эталонных векторов параметров гиббсовского распределения  $\theta_{\text{и}1}, \dots, \theta_{\text{и}8}$ , как средние значения по всем изображениям в выборке.

Правило выбора наилучшего способа оценки параметров модели Гиббса состоит в том, чтобы из возможных вариантов оценки параметров выбирать тот, для которого показатель эффективности имеет наименьшее значение. В качестве показателя эффективности  $M_s$  предлагается использовать меру степени соответствия или сходства  $R_E$  векторов  $\theta_{\text{э}1}, \dots, \theta_{\text{э}8}$  и  $\theta_{\text{и}1}, \dots, \theta_{\text{и}8} \Rightarrow M_s : \text{MIN}(R_E)$ , к примеру, по евклидовой метрике.

В работе описана методика поиска оптимальных параметров модели при исследовании систем окрестностей различных порядков и различных градаций яркости. Результатом поиска оптимальных параметров модели при исследовании влияния окрестностей различных порядков и различных градаций яркости на формирование вектора параметров ГСП является правило выбора порядка системы окрестности, количества градаций яркости и значений вектора  $\theta$ , при которых показатель эффективности  $M_s$ , принимает минимальное значение.

Обоснована целесообразность применения предложенной модели при проектировании автоматизированных систем контроля качества поверхности металлопроката.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОИСКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО–ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОПРОКАТА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для синтеза текстуры областей изображения полосы металлопроката на основе параметров гиббсовского распределения, предлагается использование алгоритма, называемого «образец Гиббса». Пошаговая схема алгоритма приведена ниже.

Шаг 1. Выбирается пиксел изображения случайным или детерминированным способом.

Шаг 2. Значение пиксела изменяется в соответствии с локальными характеристиками, т.е. условным распределением соседей пиксела по формуле:

$$P(s | t) = \frac{e^{-V(s,t,\theta)}}{W(t,\theta)},$$

где  $W(t,\theta) = \sum_{s \in M} e^{-V(s,t,\theta)}$ .

Рассчитываются значения вероятностей  $P(s | t)$  такие как  $P(0 | t), P(1 | t), \dots, P(N | t)$  где  $N$  - количество градаций яркости;  $P(s | t)$  - вероятность того, что центральный пиксел примет значение яркости  $s$  при наборе соседей  $t$ .

Для набора вероятностей  $P(s | t)$  выполняется условие  $\sum_s P(s | t) = 1$ , исходя из которого на отрезок, длиной  $[0,1]$  наносятся отрезки, длины которых пропорциональны значениям рассчитанных вероятностей  $P(s | t)$ . При помощи датчика случайных чисел проводится испытание по выпадению точки на отрезок  $[0,1]$ . Результат попадания опытной точки в тот или иной интервал позволяет сделать вывод о том, какую яркость приобретает центральный пиксел.

На основе значений параметров гиббсовского распределения для текстур бездефектных областей и областей с определенным типом дефекта, моделируются изображения поверхности стальной полосы. Механизм обхода пикселей может быть случайным или детерминированным, наподобие телевизионной развертки. Количество обходов каждого пиксела должно стремиться к бесконечности, т.е. алгоритм обработки должен иметь бесконечное число итераций. Априорные исследования показали, что количество обходов каждого пиксела, приводящее к удовлетворительному результату синтеза равняется десяти.

Основу формирования текстуры областей дефектов составляют маски, общий вид которых представлен на рис.5. Формирование области начинается с элементарной маски, представленной на рис.5(a). Элементы изображения, которые она покрывает, получают новые значения яркостей, выбираемых по нормальному закону  $N(m_i, \sigma_i)$ , где  $m_i$  и  $\sigma_i$  - математическое ожидание и СКО моделируемого типа дефектной области  $i$ . На следующем этапе происходит рост области дефекта. Новая конфигурация образуется путем захвата пикселей, под маской, показанной на рис.5(b), центр которой должен быть помещен в граничную точку.

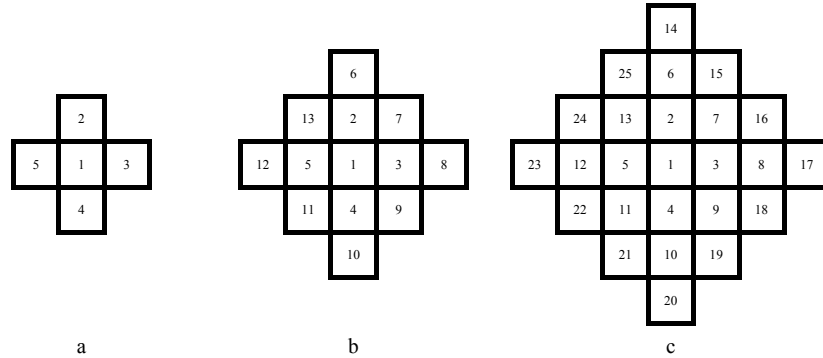


Рис. 5 Маски, используемые для наложения текстуры. Цифры показывают принцип обхода пикселей области. а) первая итерация; б) вторая итерация; в) третья итерация.

Значение яркости пикселей, которые находятся в вершинах областей, определяется на основе медианы яркостей пикселей, которые находятся с ними в отношении соседства и принадлежат области моделируемого дефекта. Для новой области формируется текстура по принципу, рассмотренному для бездефектных областей. Единственным отличием в этом случае будет механизм обхода пикселей дефектной области, который должен начинаться в центральной области, а затем продолжается рекурсивно по направлению к ее границе по часовой стрелке. Рост области в том или ином направлении продолжается до тех пор, пока не будет достигнута соответствующая граница. При этом рост по другим направлениям продолжается.

Наложение текстуры должно происходить на изображении с числом уровней яркости, равным числу уровней яркости, которое используется для оценки параметров гиббсовского распределения моделируемого типа области.

В работе для демонстрации функциональных возможностей имитационной модели предлагается использовать алгоритм обнаружения дефектов, основанный на использовании метода преобразования гистограммы на базе статистик второго порядка. Схема алгоритма следующая:

- 1) Определение динамического диапазона изображения  $L$ .
- 2) Вычисление матрицы  $P$  размером  $L \times L$  совместного появления уровней яркости соседних элементов изображения:

$$P_{1,0}(i, j) = \frac{1}{2 \cdot M \cdot (N-1)} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^{M-1} Q_{1,0}(x, y, i, j);$$

$$P_{1,0}(i, j) = \frac{1}{2 \cdot (M-1) \cdot (N-1)} \sum_{x=2}^N \sum_{y=1}^{M-1} Q_{1,45}(x, y, i, j);$$

$$P_{1,0}(i, j) = \frac{1}{2 \cdot (M-1) \cdot N} \sum_{x=2}^N \sum_{y=1}^M Q_{1,90}(x, y, i, j); \quad P_{1,0}(i, j) = \frac{1}{2 \cdot (M-1) \cdot (N-1)} \sum_{x=2}^N \sum_{y=2}^{M-1} Q_{1,135}(x, y, i, j);$$

где  $M$  и  $N$  определяют размеры изображения;  $Q$  - логические выражения, принимающие значения из множества  $\{0,1\}$ .

- 3) Получение усредненной матрицы:

$$P = \frac{1}{4} (P_{1,0} + P_{1,45} + P_{1,90} + P_{1,135})$$

- 4) Выбор диагоналей матрицы:  $V_0(i), V_1(i), V_2(i), V_3(i), V_4(i)$ .

- 5) Получение преобразованной гистограммы  $V_{1,3} = V_1 + V_2 + V_3$ .

- 6) Выбор порога по гистограмме.
- 7) Сегментация изображения по выбранному порогу.
- 8) Локализация дефектных областей.

Для оценки алгоритма обнаружения дефектов в работе предложен критерий:  $\max P_{не}, P_{лт} \leq P_{лт доп}$ ,  $t \leq t_{доп}$

где  $P_{не}$  - вероятность правильного выявления дефектов;  $P_{лт}$  - вероятность ложной тревоги;  $t$  - время работы алгоритма.

К числу достоинств алгоритма необходимо отнести: выделение областей поверхностных дефектов на неоднородном фоне металлопроката; выделение дефектов на поверхности стальной полосы, которые имеют значение средней яркости, как выше среднего значения фона, так и ниже. Результаты локализации дефектных областей представлены на рис.6.

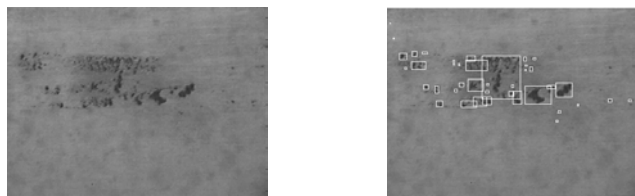


Рис.6 а) изображение дефекта б) описание областей.

При создании ОЭСККПМ наибольшее значение имеет правильный выбор параметров оптической схемы, то есть взаимного расположения источника света, приемника оптического излучения и контролируемой поверхности. Известные модели не позволяют учитывать параметры оптической схемы, поэтому в диссертационной работе была исследована взаимосвязь параметров оптической схемы и параметров предложенной модели.

В качестве основных параметров оптической схемы определены:

- $\rho$  - угол наклона видеодатчика по отношению к нормали к поверхности полосы металлопроката;
- $\tau$  - угол наклона осветителя по отношению к нормали к поверхности полосы металлопроката;
- $E$  - освещенность поверхности полосы металлопроката в поле зрения видеодатчика;

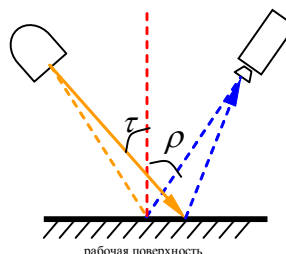


Рис.7 Метод «темного поля».

Схема используемого метода освещения, размещения видеодатчика и осветителя представлена на рис.7. Для исследования влияния параметров оптической схемы на параметры модели Гиббса рассчитываются параметры Гиббсовского распределения  $\theta$  (например, для бездефектной поверхности) на основе ГА, при варьировании значений параметров оптической схемы:  $\tau$ ,  $\rho$ ,  $E$ . Такой расчет обеспечивает получение экспериментальной зависимости  $\theta(\tau, \rho, E)$ . Пошаговая схема эксперимента определяется следующим образом:

Шаг 1. Установка ограничений для параметров оптической схемы:  $\rho_{\min}, \rho_{\max}; \tau_{\min}, \tau_{\max}; E_{\min}, E_{\max}$  и смещений  $\Delta\rho, \Delta\tau$ .

Шаг 2. Установка начальных значений  $\rho_0, \tau_0$ . Измерение  $E$ . Расчет  $\theta$ .

Шаг 3. Фиксация  $\rho$ .

Шаг 4. Изменение  $\tau$  на  $\Delta\tau$ .

Шаг 5. Расчет  $\theta(\tau, \rho, E)$ . Проверка условий: 1)  $\tau = \tau_{\max}$ , 2)  $\rho = \rho_{\max}$ . При выполнении условия 1 перейти на Шаг 7. При выполнении условия 2 перейти на Шаг 8.

Шаг 6. Вернуться к Шагу 4.

Шаг 7. Изменение  $\rho$  на  $\Delta\rho$ . Присвоить  $\tau = \tau_0$ . Перейти на Шаг 3.

Шаг 8. Вывод результатов расчета.

Расчёт освещенности поверхности полосы металлопроката в поле зрения видеодатчика - E выполняется методом коэффициента использования светового потока, по формуле:

$$\Phi = \frac{E_n SK_3 Z}{Nn\eta}$$

где  $\Phi$  – световой поток лампы, лм (определяется из технического паспорта);  $E_n$  – нормированная освещённость, лк;  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий запыление светильников и износ источников света в процессе эксплуатации;  $S$  – площадь поверхности полосы металлопроката в поле зрения видеодатчика, м<sup>2</sup>;  $Z$  – поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность освещения;  $N$  – количество светильников;  $n$  – количество ламп в светильнике;  $\eta$  – коэффициент использования.

В результате эксперимента возникает табличная зависимость вектора параметров модели Гиббса  $\theta$  от параметров оптической схемы  $\rho, \tau, E: \theta(\tau, \rho, E)$ . Получение аналитической функциональной зависимости классическими методами аппроксимации представляет значительные трудности. Один из выходов – применение теории нейросетей. Для решения задачи аппроксимации зависимости  $\theta(\tau, \rho, E)$  предложено использовать нейронную сеть прямого распространения. Входы нейросети – значения переменных – параметры оптической схемы:  $\rho, \tau, E$ . Выходы – значения составляющих вектора параметров модели Гиббса  $\theta$ . В качестве алгоритма обучения используется метод обратного распространения ошибки. Архитектура нейронной сети выбрана экспериментальным путем. Для получения обратной зависимости  $\rho, \tau, E$  от  $\theta$  также предложено использовать нейронную сеть прямого распространения, с архитектурой, подобранной экспериментальным путем.

На основе полученной экспериментальной зависимости в диссертационной работе предложено правило выбора параметров оптической схемы, для которых показатель эффективности, оценивающий качество алгоритмов сегментации, принимает наибольшее значение:  $M_s: MAX\{R(P_o, P_l, t)\}$ . Предложена следующая процедура поиска оптимальных параметров оптической схемы  $\rho_{optim}, \tau_{optim}, E_{optim}$ :

Шаг 1. С помощью экспериментальной установки провести натурный эксперимент при различных «разумных» параметрах оптической схемы, в результате которого получить  $j$  выборки по  $i$  изображений в каждой для поверхности металлопроката с различными типами дефектов.

Шаг 2. Экспертно провести сегментацию изображений на дефектные и бездефектные области.

Шаг 3. Определить эталонные значения параметров модели  $\theta_{эpb}$  и  $\theta_{эрд}$  для бездефектных и дефектных областей по  $j$  выборкам. Сформировать списки векторов для бездефектной поверхности и по типам дефектов.

Шаг 4. Способом имитационного моделирования на основе значений  $\theta_{эpb}$  и  $\theta_{эрд}$  синтезировать изображения поверхности металлопроката, количеством  $i \times i$ .

Шаг 5. К синтезированным изображениям применить алгоритм сегментации. Для сегментированных областей рассчитать эталонные значения параметров модели  $\theta_{эиб}$  и  $\theta_{эид}$ . Сформировать списки векторов для бездефектной поверхности и по типам дефектов. Получить значения показателя эффективности – вектора  $R$  для каждой синтезированной выборки. На основе критерия эффективности выбрать оптимальное значение – вектор  $R_{optim}$ .

Шаг 6. Обратной итерацией восстановить по  $R_{optim}$  значения  $\theta_{эpb}$  и  $\theta_{эрд}$ .

Шаг 7. Изменяя значения составляющих векторов  $\theta_{эpb}$  и  $\theta_{эрд}$  на  $(\pm \Delta\varpi, \pm 2 \cdot \Delta\varpi, \dots, \pm n' \cdot \Delta\varpi)$  ( $n' \cdot \Delta\varpi$  подбираются экспериментально) сформировать новый список векторов  $\theta^k_{эpb}$  и  $\theta^k_{эрд}$ .

Шаг 8. Прodelать шаги 4,5 и 6 еще раз и перейти на шаг 9.

Шаг 9. На основе полученных значений параметров векторов  $\theta_{эpb}$  и  $\theta_{эрд}$  используя нейронные сети, определяющие зависимости между:  $\tau, \rho, E$  и  $\theta_{эpb}$  и  $\tau, \rho, E$  и  $\theta_{эрд}$  восстановить значения параметров оптической схемы  $\tau, \rho, E$ .

Шаг 10. Завершить процедуру поиска. Выбрать найденные значения:  $\rho_{optim}, \tau_{optim}, E_{optim}$ .

Предложенная схема позволяет значительно снизить временные затраты на проведение эксперимента по поиску оптимальных параметров оптической схемы оптико-электронных систем контроля качества поверхности металлопроката, и позволяет подбирать значения параметров:  $\tau, \rho, E$ , при которых результаты работы алгоритмов обнаружения и классификации дефектов считаются удовлетворительными.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ

Для проверки предложенных в работе методик была создана экспериментальная установка, в состав которой вошли видеокамера, ПК на базе процессора Celeron-1700, плата видео-ввода, источник освещения, автотрансформатор, штатив. Разработанный комплекс позволяет получать изображения размером 384x288 256-ти градаций серого и производить его дальнейшую обработку. Оптическая схема для проведения исследований была выбрана, согласно методике, предложенной в работе.

Программное обеспечение, выполненное в среде разработки приложений Delphi 7.0, под управлением операционной системы Windows 2000 и предназначено для решения следующих задач: ввод изображений поверхности металлопроката; расчет параметров гиббсовского распределения для изображений бездефектной и дефектной поверхности; синтез изображений поверхности металлопроката, как без присутствия дефектов, так и с их присутствием; выбор оптимального способа оценки параметров гиббсовского распределения и оптимальных параметров моделей; проверка адекватности моделей; выбор оптимальных параметров оптической схемы; тестирование алгоритмов обнаружения дефектов поверхности стальной полосы. При проведении эксперимента использовалась выборка из 500 изображений бездефектной и дефектной поверхности металлопроката.

С помощью программного продукта обоснована адекватность предложенных моделей, путем сравнения параметров гиббсовского распределения, вычисленных на синтезированных изображениях, с соответствующими параметрами для реальных изображений. Проведен сравнительный анализ методик оценки параметров гиббсовского распределения. Выявлен оптимальный способ оценки параметров модели на основе ГА, при помощи которого найдены параметры распределения для основных типов дефектных и бездефектных областей. Результаты исследований представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Расстояния между векторами параметров реальных и синтезированных изображений								
Расстояние между векторами	$\theta^{1}_{avg}$	$\theta^{2}_{avg}$	$\theta^{3}_{avg}$	$\theta^{4}_{avg}$	$\theta^{5}_{avg}$	$\theta^{6}_{avg}$	$\theta^{7}_{avg}$	$\theta^{8}_{avg}$
	$\theta_c^{1}_{avg}$	$\theta_c^{2}_{avg}$	$\theta_c^{3}_{avg}$	$\theta_c^{4}_{avg}$	$\theta_c^{5}_{avg}$	$\theta_c^{6}_{avg}$	$\theta_c^{7}_{avg}$	$\theta_c^{8}_{avg}$
$R_E$	0,068	0,072	0,052	0,056	0,059	0,047	0,055	0,027

Таблица 2

Параметры Гиббсовского распределения для изображений бездефектных и дефектных областей

	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha_{2,1}$	0,007	0,064	0,095	0,027	0,083	0,081	0,152
$\alpha_{2,2}$	0,053	0,071	0,009	0,018	0,075	0,043	0,117
$\alpha_{2,3}$	0,213	0,092	0,062	0,053	0,078	0,158	0,175
$\alpha_{2,4}$	0,218	0,056	0,055	0,048	0,127	0,005	0,093
$\alpha_{3,1}$	-0,008	0,023	-0,027	0,037	0,054	-0,018	0,023
$\alpha_{3,2}$	-0,105	0,031	0,051	0,022	0,021	0,075	0,017
$\alpha_{3,3}$	0,104	0,034	-0,041	0,034	0,044	-0,019	0,048
$\alpha_{3,4}$	-0,049	0,029	0,047	0,067	0,013	0,073	0,058
$\alpha_{4,1}$	-0,035	0,003	0,018	0,008	0,007	0,065	0,019

1 - бездефектная область; 2 - неметаллические включения; 3 – плена; 4 – дыры; 5 – окалина; 6 – царапины; 7 – надавы;

Проведенные исследования позволяют сделать вывод об обоснованности предложенного в работе подхода к построению моделей изображения поверхности стальной полосы. Рассмотрены пути дальнейшего совершенствования и перспективы развития подобного подхода при проектировании ОЭСККПМ.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель изображения поверхности стальной полосы на основе гиббсовских случайных полей, использующая новый способ представления индикаторных функций, а также методику оценки параметров предложенной модели на основе аппарата генетических алгоритмов.
2. Разработана имитационная модель изображения поверхности стальной полосы, осуществляющая синтез изображений поверхности стальной полосы и обеспечивающая возможности оптимизации параметров оптической схемы, тестирования и настройки алгоритмов сегментации.
3. Предложен новый способ оптимизации оптико-электронных систем контроля качества поверхности стальной полосы, включающий в себя методику, критерии и алгоритм оптимизации параметров оптической схемы.

4. Разработано программное обеспечение процедуры имитационного моделирования изображения, позволяющее синтезировать изображения поверхности металлопроката с различными типами дефектных областей.
5. Разработано программное обеспечение для расчета параметров гиббсовского распределения уровней яркости бездефектных и дефектных областей на изображении поверхности стальной холоднокатаной полосы. Рассчитаны параметры распределения уровней яркости для изображений наиболее часто встречающихся поверхностных дефектов и бездефектной поверхности.
6. Разработано программное обеспечение для проверки адекватности предложенных моделей и поиска их оптимальных параметров, при помощи которого обоснована адекватность применения гиббсовского подхода для моделирования изображений поверхности металлопроката.
7. Даны практические рекомендации по выбору оптимальных параметров оптической схемы при проектировании оптико-электронных систем контроля качества поверхности горячекатаного и холоднокатаного металлопроката.
8. Предложен критерий оценки эффективности алгоритмов сегментации изображений поверхности металлопроката. Создано программное обеспечение для проверки эффективности таких алгоритмов.
9. Полученные результаты использованы при проектировании автоматизированной оптико-электронной системы контроля качества поверхности стальной холоднокатаной полосы, разрабатываемой Институтом менеджмента и информационных технологий (филиалом) СПбГПУ по заказу ООО «Малленом».
10. Результаты исследований используются в учебном процессе в Институте менеджмента и информационных технологий (филиале) СПбГПУ в г. Череповце в курсе «Обработка и анализ изображений» для специальности 220400-«Программное обеспечение ВТ и АС».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ожгибесов А.А., Старостин Д.А., Царев В.А. Программное средство синтеза алгоритмов обработки изображения. // Тезисы докладов и сообщения XIV Межвузовской военно-научной конференции. – Череповец: ЧВИИРЭ. – 2000. – С. 73.
2. Малыгин Л.Л., Царев В.А., Старостин Д.А. О возможности применения нейросетевых классификаторов в оптико-электронных системах контроля качества промышленных изделий. // Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: материалы межвузовской электронной научно-технической конференции. – Вологда: ВГТУ. – 2001. – С. 73.
3. Малыгин Л.Л., Царев В.А., Старостин Д. А. Иерархическая Гиббсовская модель изображения стальной полосы // Тезисы докладов XV межвузовской военно-научной конференции. Череповец: ЧВИИРЭ. – 2002. – С. 120-122.
4. Старостин Д.А. Алгоритм сегментации изображения поверхности горячекатаного металла на основе применения пороговых методов. // Образование. Наука. Бизнес. Особенности регионального развития и интеграции: Сборник трудов межвузовской научно-методической конференции. – Череповец: ИМИТ СПбГТУ. – 2002. – С.75-80.
5. Малыгин Л.Л., Старостин Д.А., Царев В.А. О формировании основ автоматизированного проектирования оптико-электронных систем контроля качества поверхности листовых и ленточных материалов. // Интеллектуальные САПР – 2002: сборник тезисов межвузовской научно-технической конференции. – Геленджик. – 2002. – С. 127-131.
6. Малыгин Л.Л., Старостин Д.А. О способе расчета разрешающей способности и угла наклона оптической оси видеодатчика СТЗ. // Образование. Наука. Бизнес. Особенности регионального развития и интеграции: сборник трудов межвузовской научно-методической конференции. – Череповец: ИМИТ СПбГТУ. – 2002. – С. 67-72.
7. Старостин Д. А., Царев В.А. Общие принципы проектирования оптико-электронных систем контроля качества поверхности листовых и ленточных материалов. // Образование. Наука. Бизнес. Особенности регионального развития и интеграции: сборник трудов межвузовской научно-методической конференции. – Череповец: ИМИТ СПбГТУ. – 2002. – С. 72-75.