

На правах рукописи

Тур Александр Игоревич

**ИЕРАРХИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ  
В ПОДСИСТЕМАХ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ АСУТП  
СОРТИРОВКИ И УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

05.13.06 – Автоматизация и управление  
технологическими процессами и производствами (в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и телемеханика» в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный руководитель:** **Южаков Александр Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой автоматике и  
телемеханики ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный исследовательский  
политехнический университет»

**Официальные оппоненты:** **Путов Виктор Владимирович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры систем автоматического  
управления ФГАОУ ВО «Санкт-  
Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.  
В. И. Ульянова (Ленина)»

**Куликов Геннадий Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры автоматизированных  
систем управления ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный авиационный технический  
университет»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева» (г. Казань)

Защита состоится «18» декабря 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.04 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд.345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «21» октября 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного  
совета Д ПНИПУ.05.04  
доктор технических наук, доцент

/ В.И. Фрейман /

### **Актуальность проблемы и степень разработанности темы.**

Подсистемы технического зрения в АСУТП позволяют выполнять задачи без вреда и опасности для здоровья человека. Такие задачи в большом количестве присутствуют на вредных и тяжёлых производствах. Одно из таких – утилизация бытовых отходов. Первым этапом данного производства является сортировка. На этом этапе входная фракция очищается от предметов, не попадающих под обрабатываемый тип. Наиболее производительными методами сортировки являются те, которые используют промышленные линии, состоящие из транспортной ленты, устройство анализа объекта и сортирующего механизма. На рынке сортировки и утилизации бытовых отходов широко представлены автоматы таких компаний как «Хэнань Хунцзи», «Европлан Системс», «АРК» «ВторТех». Лидеры рынка этих машин применяют в качестве устройства анализа – спектрометры. Однако такие линии являются дорогими в покупке и обслуживании. Более экономичным вариантом является использование в качестве устройства анализа оптической системы сортировки, применяющей машинное зрение для распознавания объектов.

Значительный вклад в создание алгоритмов распознавания внесли такие зарубежные учёные, как Альфред Хаар, Герберт Фриман, Крис Харрис, Майк Стефенс, Навнит Далал, Билл Триггс, Ян Лекун, Яньцинг Цзя, а также отечественные – Ю.Б. Зубарев, В.П. Дворкович, А.В. Дворкович.

Известные методы, алгоритмы и инструменты распознавания, базируются на полном (или близком к нему) переборе пикселей всего изображения. Ярким примером такого подхода являются современные свёрточные нейронные сети (LeNet, AlexNet и др.), используемые для распознавания. Анализ больших изображений указанным подходом занимает достаточно много времени. Кроме того, чем мощнее метод распознавания тем, больше ему требуется вычислительных ресурсов. Для свёрточных нейронных сетей это означает увеличение количества памяти выделяемой для распознавания объекта и времени обработки промежуточных результатов. Поэтому в настоящее время актуальна задача ресурсоёмкости процесса распознавания.

Стационарные исследовательские системы обладают достаточной вычислительной мощностью и временем для распознавания объекта с требуемой точностью, а производственные и мобильные комплексы (направленные на автоматизацию технологических процессов) испытывают серьезные ресурсные ограничения. Это заставляет внимательно относиться к выбору алгоритма распознавания, иногда жертвуя качеством распознавания объектов.

Самые простые методы распознавания изображения базируются на определении контура и ключевых точек объекта на изображении (например, основанные на цепном коде Фримена, детекторе Хариса). Их преимуществом является малое время выполнения распознавания и небольшой объём требуемых вычислительных ресурсов. Недостатком является высокие требования к входным данным и невозможность распознать объект при малейшем изменении его вида.

Более продвинутые методы распознавания (например, основанные на HOG, SURF, SIFT) ощутимо медленнее, однако позволяют распознавать объекты имеющие отличие во внешнем виде от оригинала (поворот относительно плоскости изображения и даже незначительное изменение формы). Кроме того, для корректной работы данные методы требуют больше вычислительных ресурсов. Ещё больше вычислительных ресурсов требует применение методов, основанных на использовании свёрточных нейронных сетей. Однако при этом они показывают наилучшие результаты распознавания объектов (имеют большую устойчивость к помехам мешающим проводить распознавание), а время выполнения процесса незначительно больше, чем у описанных выше.

В диссертационной работе исследуется задача распознавания объектов, заданных многоканальными изображениями, в условиях ограничения требований к вычислительным ресурсам. Для её реализации предлагается использовать поэтапное уточнение местоположения распознаваемого объекта на изображении – иерархический метод распознавания объекта на изображении. Такой подход позволит анализировать изображение не целиком, а по частям, что снижает время распознавания и количество требуемых вычислительных ресурсов. Это означает, что возможно применение методов распознавания, основанных на использовании свёрточных нейронных сетей, при более низких требованиях к вычислительной платформе без снижения качества распознавания.

**Объект исследования:** системы машинного зрения, применяемые в АСУТП для обеспечения обработки данных, представленных в графическом виде.

**Предмет исследования:** методы обработки больших данных, представленных в графическом виде в составе автоматизированной системы с ограниченными вычислительными ресурсами.

**Цель работы:** реализация эффективных по вычислительной сложности и качеству распознавания процессов обработки данных, представленных в графическом виде в АСУТП в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

**Задачи работы.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих систем распознавания информации, представленной в графическом виде, с целью выявления возможности повышения эффективности использования вычислительных ресурсов;
2. Разработать оригинальный иерархический метод обработки данных, представленных в графическом виде, с целью снижения ресурсозатратности и повышения скорости работы систем при сохранении требуемой достоверности распознавания;
3. Построить аналитическую и имитационную модели иерархической системы распознавания информации, представленной в графическом виде в условиях ограниченных вычислительных ресурсов;
4. Провести апробацию и внедрение разрабатываемой иерархической системы распознавания.

**Методы исследований** основаны на теории СМО, теории нейронных сетей, теории телетрафика, системном и статистическом анализе, на аналитическом и имитационном моделировании, теории планирования и обработки результатов эксперимента.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Оригинальный иерархический метод обработки информации, представленной в графическом виде, в АСУТП сортировки и утилизации бытовых отходов на основе иерархического подхода, позволяющий снижать требования к аппаратурной базе системы без уменьшения достоверности результатов распознавания (*п. 8. Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизация модульных структур систем сбора и обработки данных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.*);

2. Аналитическая и имитационная модели иерархической системы распознавания информации, представленной в графическом виде, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, обеспечивающие возможность оценки эффективности подсистемы распознавания АСУТП (*п. 15. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)*).

3. Программно-аппаратурная реализация системы иерархического метода распознавания информации, представленной в графическом виде в условиях ограниченных вычислительных ресурсов в АСУТП сортировки и утилизации бытовых отходов.

**Научная новизна:**

1. Предложен и разработан оригинальный иерархический метод обработки информации, представленной в графическом виде, в автоматизированной системе управления на основе иерархического подхода, отличающийся тем, что реализует поэтапное уточнение области поиска объекта на изображении при сохранении уровня достоверности результатов распознавания, что обеспечивает снижение требований к ресурсоемкости системы;

2. Разработаны специализированные (для описанной задачи) аналитическая и имитационная модели иерархической системы распознавания информации, представленной в графическом виде, особенностью которых является учет перераспределения ограниченных вычислительных ресурсов, что позволяет исследовать применимость иерархического метода распознавания к конкретной системе, абстрагируясь от сложных нелинейных расчётов и трудоёмких натурных экспериментов.

**Теоретическая значимость** заключается в:

— создание иерархического метода распознавания, основанного на поэтапном уточнении местоположения распознаваемого объекта на изображении;

— разработке моделей иерархической системы распознавания объекта на изображении, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, учитывающей возможность перераспределения освободившихся вычислительных ресурсов.

**Практическая значимость** заключается в разработке и программной реализации метода иерархического распознавания объекта на изображении, применимого для большинства алгоритмов распознавания, позволяющего:

— уменьшить общее время распознавания объекта на изображении в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, при сохранении уровня достоверности получаемых результатов;

— снизить количество требуемых вычислительных ресурсов для распознавания объекта на отдельно взятом изображении, при сохранении уровня достоверности получаемых результатов.

Это позволяет использовать в системах с ресурсными ограничениями (например, производственные и мобильные комплексы АСУТП) ресурсоёмкие алгоритмы распознавания объектов без потери качества распознавания.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Общие тенденции, полученные в результате исследования, не противоречат результатам, представленными в литературе другими исследователями, а также подтверждаются сопоставлением результатов аналитического и имитационного моделирования с экспериментальными данными, полученными на физической вычислительной платформе, и результатами внедрения.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на IX международной Интернет-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» InnoTech 2017 (Россия, г. Пермь, 2017 г.), XIV всероссийской школе-конференции молодых ученых «Управление большими системами» УБС'2017 (Россия, г. Пермь, 2017 г.), 12 международной научно-технической конференции ПСТИ-2017 (Россия, г. Суздаль, 2017 г.), XXI международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (Россия, г. Санкт-Петербург, 2018 г.), 2018 и 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (Россия, г. Санкт-Петербург, 2018 г. и 2019 г.), First international geographical conference of north asian countries "China-Mongolia-Russia economic corridor: geographical and environmental factors and territorial development opportunities" (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science) (Россия, г. Иркутск, 2019 г.), 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM-2019 (Болгария, г. Албена, 2019), IV всероссийской научно-практической конференции «Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века» (Россия, г. Пермь, 2019 г.).

Работы по теме диссертационного исследования выполнялись в рамках научного проекта № С-26/174.6 международной исследовательской группы учёных (МИГ-30).

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в шестнадцати статьях, шесть из которых — в журналах ВАК, в том числе один патент на полезную модель и одно свидетельство на программу для ЭВМ, шесть – в

изданиях, входящих в международные базы цитирования (Scopus и Web of Science), остальные – в тезисах докладов, материалах конференций и прочих источниках.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, списка литературы из 129 наименований и 7 приложений. Полный объем диссертации составляет 126 страниц, из которых 81 страница занимает основной текст диссертации, включающий 31 рисунка и 5 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено описание современного состояния дел в области распознавания информации, представленной в графическом виде (в том числе распознавания объектов). Описаны основные проблемы производственных и мобильных комплексов (направленных на автоматизацию технологических процессов), возникающие при реализации системы распознавания объектов. Представлено обоснование актуальности данной работы, поставлена цель и сформулированы задачи. Определены объект и предмет исследования, выделены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** анализируется ключевая информация о машинном зрении на примере подсистем технического зрения АСУТП, занимающихся сортировкой и утилизацией бытовых отходов. Рассмотрены основные технические требования, выдвигаемые для таких подсистем, и типовые подходы к их реализации. Анализ показал, что современные системы, реализуемые с помощью спектрометров дорогие и сложные в обслуживании и ремонте, а системы основанные на оптических датчиках имеют ограничения по производительности (из-за нехватки вычислительных возможностей системы сортировки и долгого времени обработки изображений). Поэтому была выдвинута задача эффективного использования ресурса системы (1):

$$F_{\text{иерархические распознавание}}(V, O, q) < F_{\text{обычное распознавание}}(V, O, q)$$

при условии (1)

$$q = \text{const},$$

где  $V$  – размер изображения,  $O$  – вычислительная сложность алгоритма распознавания,  $q$  – качество распознавания (характеризуемое наличием ошибок первого и второго рода).

Иными словами, в формальном виде задача эффективного процесса распознавания объекта заключается в определении условий распознавания, позволяющих, не ухудшая качества сортировки, повысить производительность заданной системы. Для их определения был рассмотрен ряд известных методов и алгоритмов используемых для распознавания информации на изображении. Показано, что наиболее подходящей группой алгоритмов для решения поставленных задач являются свёрточные нейронные сети. Они демонстрируют высокое качество в решении задачи распознавания, но главным препятствием их

применения в указанных системах является высокие требования к ресурсам, которых нет в мобильных и производственных системах.

Для повышения производительности таких систем предложено использовать иерархический метод, основанный на подходе «Coarse-to-Fine». Поиск объекта будет производиться последовательно и итерационно, постепенно уточняя интервал поиска. Это позволяет снизить нагрузку на систему в каждый из моментов активного поиска, что положительно скажется на общей производительности.

Для повышения эффективности использования вычислительных ресурсов были рассмотрены способы использования иерархической архитектуры для минимизации задержек при передаче информации. А обеспечить надлежащую пропускную способность позволяет иерархический метод, уменьшающий количество вычислительных операций микроконтроллера.

Во **второй главе** рассмотрены особенности иерархического подхода и разрабатывается оригинальный метод иерархического распознавания объекта на изображении. Основной идеей метода является последовательное повышение разрешения качества изображения, ограничивая распознаваемое изображение границами области интереса (ROI).

Метод заключается в последовательном выполнении следующих действий:

- 1) Создаются дубликаты исходного изображения в более низком качестве (меньшее разрешение, меньшее число пикселей);
- 2) Изображения дробятся на фрагменты и сохраняются в специальной файловой системе, помечаемые необходимой поисковой информацией;
- 3) Производится распознавание дубликата изображения (полученного после 1 действия) – грубый поиск. Алгоритм, применяемый на этом шаге, должен быть равен или иметь более низкий показатель вычислительной сложности по сравнению с основным алгоритмом применяемом на следующем шаге, но позволяющий уверенно отличать объект распознавания от фона. На изображении отмечаются ROI которые удовлетворяют критериям грубого поиска. По координатам ROI определяются фрагменты изображения большего разрешения, которые необходимо проанализировать. Данный этап повторяется до тех пор, пока следующими фрагментами не являются фрагменты исходного изображения;
- 4) Происходит распознавание фрагментов исходного изображения – точный поиск. Для выполнения точного поиска применяется алгоритм с наилучшим качеством распознавания (удовлетворяющий по количеству ошибок первого и второго рода).

Для всех этапов метода рекомендуется применять фон контрастный к объекту.

Как показал анализ, алгоритмы сжатия и дробления изображения на фрагменты не оказывают сильного влияния на распознавание описанном в 3 шаге, т.к. алгоритм поиска, в данном случае, используется для обнаружения местоположения объекта на изображении. Количество выполнений 3 шага



напрямую связано с доступными вычислительными ресурсами системы, и может быть представлено как одна итерация, так и несколько.

Вычислительная сложность алгоритма зависит от применяемых в нём методов обработки информации. Для алгоритмов использующих операцию свёртки в общем случае вычислительную сложность можно определить как (2):

$$F_{\text{расп}} = V * (\alpha + \beta + \gamma), \quad (2)$$

где  $V$  – размер изображения,  $\alpha$  – количество тактов процессора, требуемое для выполнения сложения и вычитания при расчёте одного «скользящего окна»,  $\beta$  – количество тактов процессора, требуемое для выполнения умножения и деления при расчёте одного «скользящего окна»,  $\gamma$  – количество тактов процессора, требуемое для выполнения вычисления экспоненты при расчёте одного «скользящего окна».

Другими словами вычислительная сложность алгоритма можно оценить как линейную функцию, т.к. алгоритму требуется перебрать все  $V$  пикселей изображения.

Свёрточные алгоритмы чаще всего применяются в нейронных сетях, где сложность уже нелинейная и зависит от количества слоёв и нейронов в них. Однако суть задачи остаётся прежней – сокращение числа информации на входе в систему. Иерархический метод даст положительные результаты тогда и только тогда, когда будет выполняться условие (3):

$$(V_1 + V_2) < V_3 \quad (3)$$

где  $V_1$  – размер дубликата изображения, распознаваемого на 3 шаге метода,  $V_2$  – суммарный размер ROI, выбранных для распознавания на 4 шаге метода,  $V_3$  – размер исходного изображения.

На рис. 1 представлен график расчётного времени, необходимого для обработки одного кадра (определённого разрешения) нейронными сетями MobileNet и LeNet. При неизменной вычислительной сложности (время распознавания полного изображения получено экспериментально) с уменьшением объёма распознаваемой информации (ROI) наблюдается общая тенденция – время необходимое для распознавания одного кадра сокращается. При увеличении пропускной способности системы данная тенденция сохраняется.

Эти расчёты применимы, когда сервер не оказывается перегруженным. Основываясь на законах теории производительности вычислительных систем, время обработки изображения можно приближённо рассчитывать как линейную функцию только пока коэффициент использования (загруженности системы) меньше 70%. При перегрузе сервера и образовании очереди из изображений, время распознавания изменяется нелинейно и стремится к бесконечности.

Таким образом, иерархический метод позволяет решить обе основные проблемы систем распознавания объектов на изображении, сокращая объём обрабатываемой информации – уменьшается количество требуемых вычислительных ресурсов и общее время, необходимое алгоритму для обработки изображения.

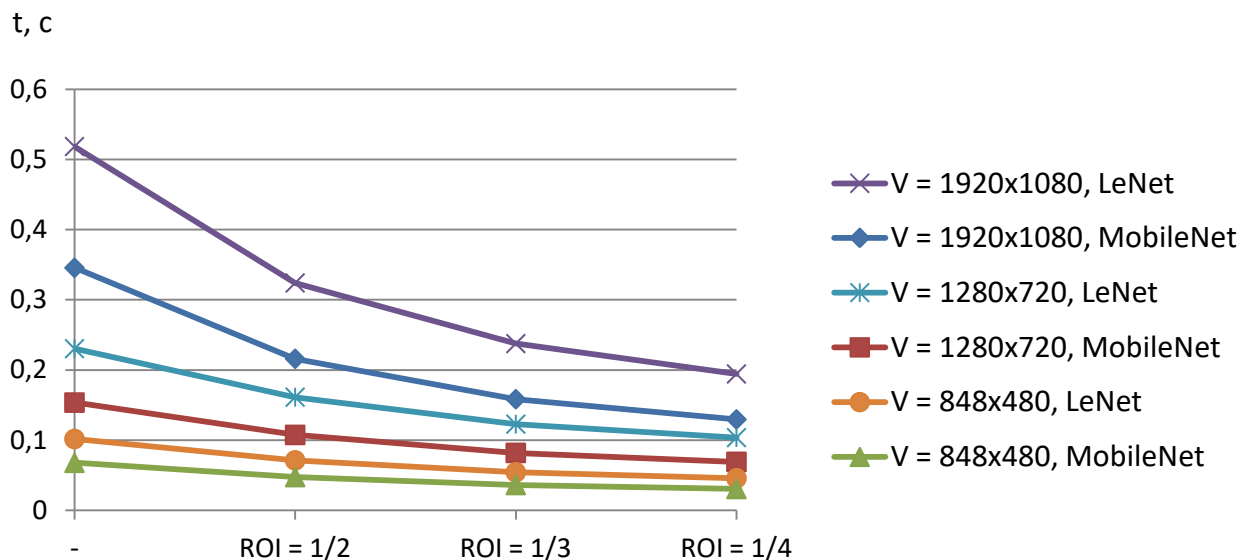


Рис. 1. График расчётного времени для распознавания одного кадра

Подразумеваем, что вычисления, представленные выше, проводятся на одинаковом оборудовании с использованием одинаковых алгоритмов распознавания. Соответственно, при распознавании используются одинаковые низкоуровневые операции, что позволяет использовать универсальную формулу расчёта времени. Эта формула может быть применена в подобных случаях для любой вычислительной платформы, занимающейся визуальным распознаванием, и для любого по сложности алгоритма распознавания объекта на изображении.

В **третьей главе** произведено моделирование процесса иерархического распознавания объекта с целью определения настроек системы распознавания недопускающих перегрузки сервера при распознавании объекта. Для этого было проведено аналитическое и имитационное моделирование заданной системы с помощью программных продуктов Mathcad 15 и AnyLogic 8 соответственно и построены специализированные модели.

Систему иерархического распознавания можно представить как n-канальную систему массового обслуживания (СМО) с отказами. Граф состояний СМО представлен на рис. 2.

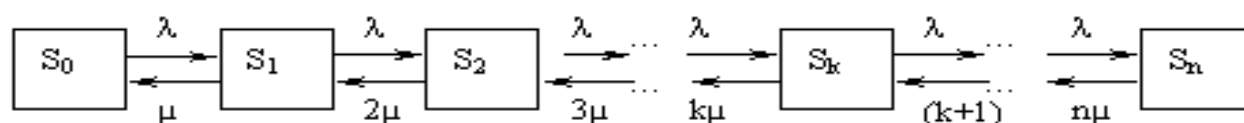


Рис. 2 Граф состояний n-канальной СМО с отказами.

Заявка, в данном случае, – изображение, поступающее на вход системы. Отказы – изображения, на которые система не успела среагировать из-за того, что вычислительные возможности были заняты распознаванием другого объекта.

Имитационная модель рассчитывалась с помощью программного продукта AnyLogic 8 (рис. 3). Она имеет идентичные аналитической модели параметры на входе, но позволяет задавать более сложные правила формирования новых заявок – случайное появление группами, одновременная генерация заявок нескольких типов с разными характеристиками и т.д.

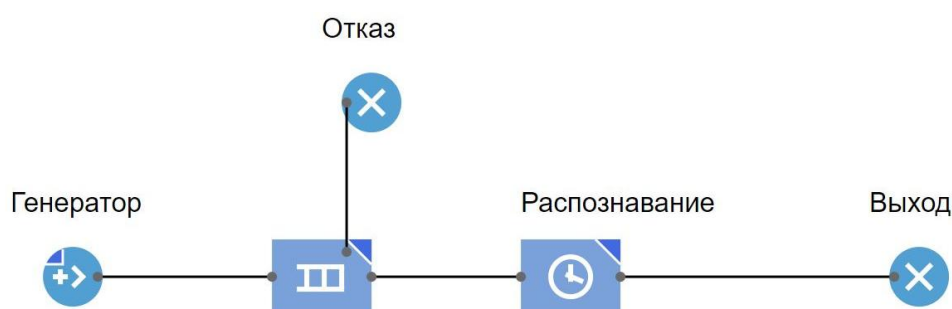


Рис. 3. Графическое представление имитационной модели в AnyLogic 8

Основным параметром для оценки функции была выбрана относительная пропускная способность – средняя доля поступивших заявок, обслуживаемых системой в единицу времени (4):

$$Q = 1 - P_{отк} , \quad (4)$$

где  $P_{отк}$  – вероятность отказа в обслуживании заявки.

Особенностью моделей является то, что они учитывают не только изменение интенсивности поступления заявок, но и изменение объема работ, которые необходимо провести для их обслуживания. Он рассчитывается исходя из количества пикселей обрабатываемых на стадии грубого и точного поиска. В табл. 1 приведены усреднённые результаты моделирования. Первая строка в таблице описывает систему, работающую с применением стандартных методов, а в следующих строчках система, применяет иерархический метод с разным числом ROI. Столбцы соответствуют интенсивности потока заявок, зависящей от частоты смены кадров, обрабатываемых системой. Изображения система получает последовательным извлечением из видеопотока каждого n-ого кадра за условную единицу времени.

Результаты (рис. 4) демонстрируют, что использование иерархического метода при любой частоте смены (fps) кадров даёт прирост в производительности (увеличивается относительная пропускная способность системы).

Наибольший прирост производительности наблюдается при fps равно 11 при переходе от стандартного метода к иерархическому с ROI равной 1/2 площади оригинального изображения (на 24,7%). Однако относительная пропускная способность равная 98,7% означает, что система распознавания всё ещё иногда

будет испытывать перегрузку. В эти моменты времени распознавания будет происходить дольше, чем обычно.

Таблица 1. Результаты расчёта относительной пропускной способности системы распознавания объекта (аналитическое моделирование)

Параметры системы	Частота смены кадров – fps (1/c)					
	1	2	4	6	8	11
Без иерархического метода.	96,7%	93,5%	87,9%	82,8%	78,3%	74,3%
ROI = 1/2	99,9%	99,9%	99,7%	99,5%	99,1%	98,7%
ROI = 1/3	~100%	~100%	99,9%	99,9%	99,8%	99,8%
ROI = 1/4	~100%	~100%	~100%	~100%	~100%	~100%

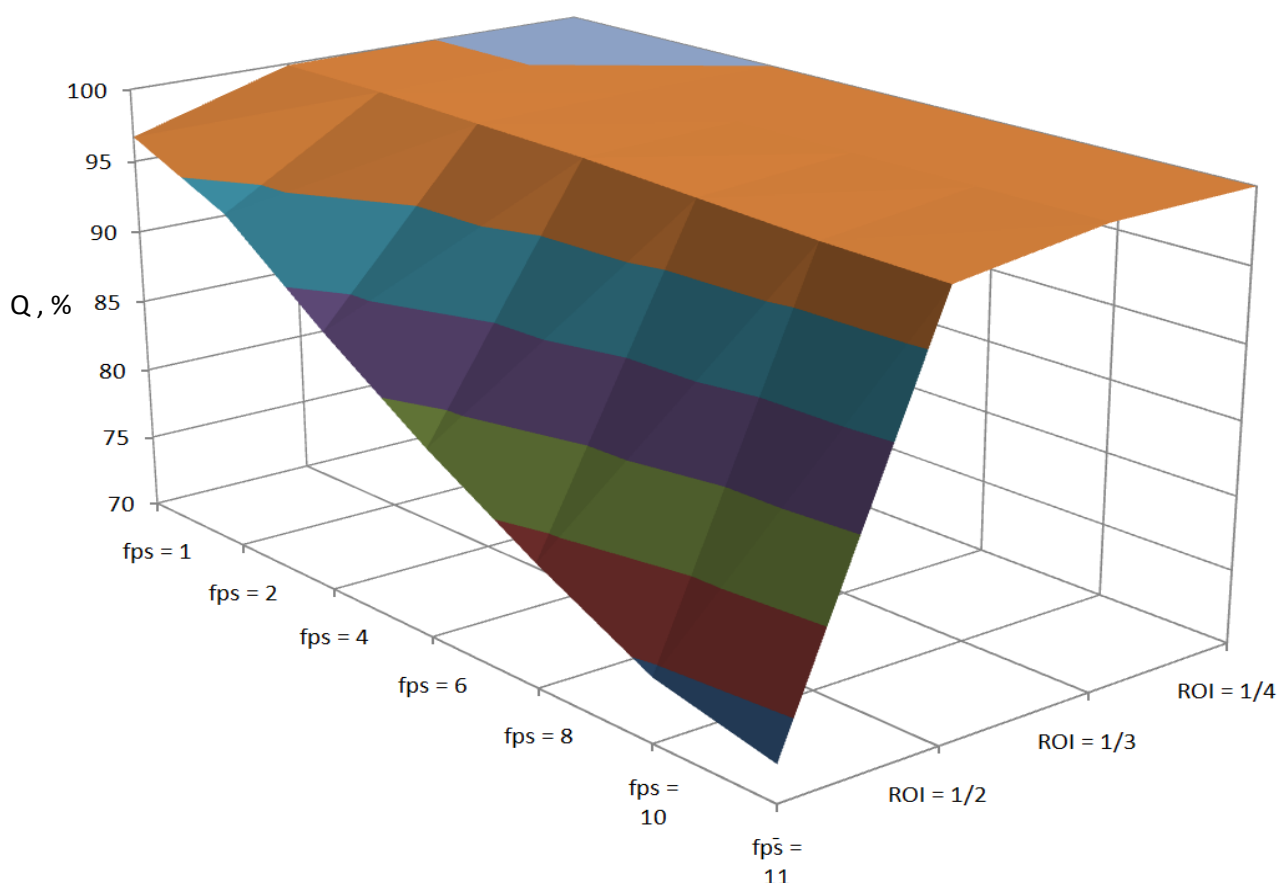


Рис. 4. График относительной пропускной способности системы распознавания объекта (аналитическое моделирование)

Область интереса равная 1/4 при всех исследуемых режимах показывает максимально приближенную к 100% относительную пропускную способность (т.к. вероятность отказа, согласно теории массового обслуживания, не может быть равна 0), поэтому она была проверена имитационным моделированием (рис. 6)

Для проверки адекватности моделей был выбран критерий Фишера, который позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух рядов наблюдений. Адекватность данных моделей составляет более 95%. Поэтому исследованные

характеристики системы будут рекомендованы для реализации эксперимента на физическом стенде.

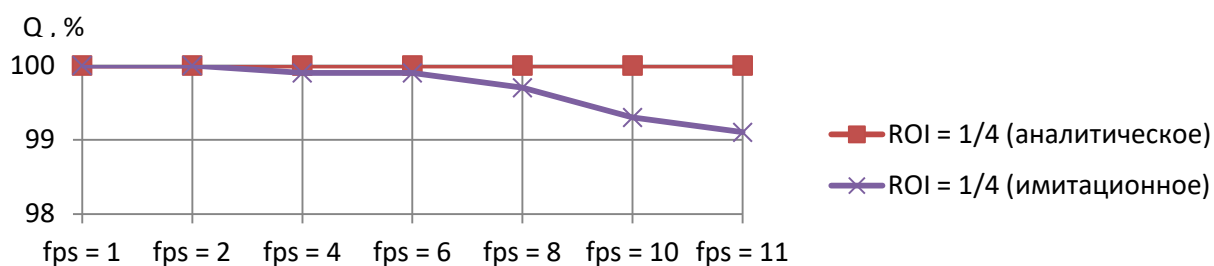


Рис. 6. График сопоставления результатов, полученных при аналитическом и имитационном моделировании

В четвёртой главе описывается реализация прототипа системы иерархического распознавания на базе автомата по сортировке твёрдых бытовых отходов «Sortomat» (рис. 5). В автомате был применён предложенный в работе иерархический метод идентификации на этапе процесса распознавания. Для распознавания объектов используется нейронная сеть MobileNet и контроллер Raspberry Pi 3 (включающий в себя 64-битный четырехъядерный процессор ARMv8 Cortex-A53 с тактовой частотой 1.4 ГГц, модуль оперативной памяти LPDDR2 SDRAM на 512 МБ).

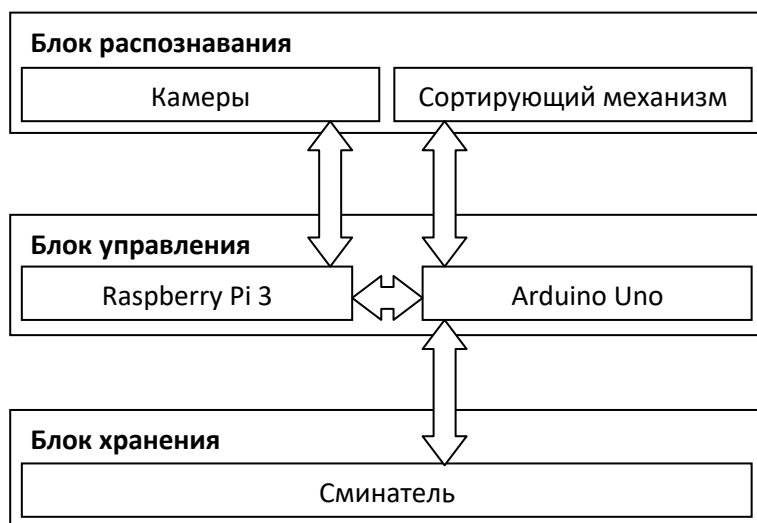


Рис. 5. Проект «Sortomat» на выставке Цифровое образование (г. Пермь) и функциональная схема автомата

Для проведения эксперимента была использована нейронная сеть MobileNet, обученная на поиск бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТ). «Sortomat» анализировал три группы последовательных изображений, полученных из одного видеофрагмента, разных по разрешению: 1920x1080 – оригинальное полное изображение, 860x480 – дубликат изображения для поиска ROI и 500x1080 – фрагмент оригинального изображения, отмеченный как ROI и (равный 1/4). После каждых 50 изображений производились замеры времени обработки фрагмента. Результаты замеров представлены в таблице 2 и на рисунках 6 и 7.

Время, затраченное на анализ первого видеопотока, представлено в столбце «Анализ полного изображения». В столбце «Поиск ROI» представлено время распознавания второго видеопотока. В столбце «Иерархический анализ» – сумма времени распознавания второго и третьего – полное время распознавания иерархическим методом (без учёта времени необходимого для сохранения и считывания изображения в память компьютера). Такое допущение позволительно, так как время операций над изображением в оперативной памяти будет оказывать небольшое влияние на конечную величину по сравнению с самим временем распознавания. Время необходимое для передачи изображения серверу тоже не будет учитываться для упрощения.

Таблица 2. Результаты эксперимента по определению времени, необходимого для анализа потока изображений автоматом «Sortomat»

Номер эксперимента	Анализ полного изображения (с)	Поиск ROI (с)	Иерархический анализ (с)
1 (50 изображений)	21,0045	0,6956	7,8712
2 (50 изображений)	20,3127	0,6399	7,9956
3 (50 изображений)	20,9035	0,6001	6,6439
4 (50 изображений)	20,5047	0,5476	6,1611
5 (50 изображений)	21,6109	0,643	7,7549
Среднее значение (50 изображений)	20,8673	0,6252	7,2853
Среднее значение (1 изображение)	0,4173	0,0125	0,1457

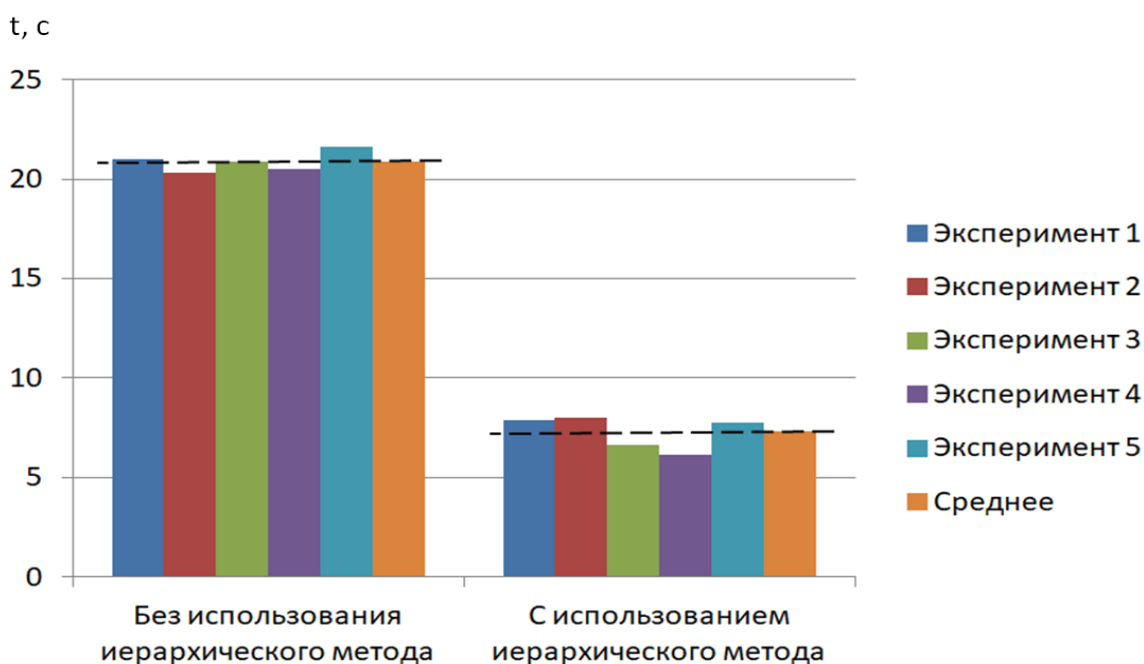


Рис. 6. График экспериментального времени для распознавания одного кадра с применением выбранного иерархического метода и без него

Соответственно среднее экспериментальное время распознавания одного кадра иерархическим методом заняло 0,1551 секунды, а стандартным – 0,4322 секунды (рис. 8). Разность между ними составила 0,2771 секунды (на 64% быстрее), что подтверждает расчёты, представленным во второй главе, Согласно им процесс распознавание иерархическим методом в заданных условиях быстрее распознавания стандартным методом на 62%. Адекватность полученных результатов по критерию Фишера – выше 95%.

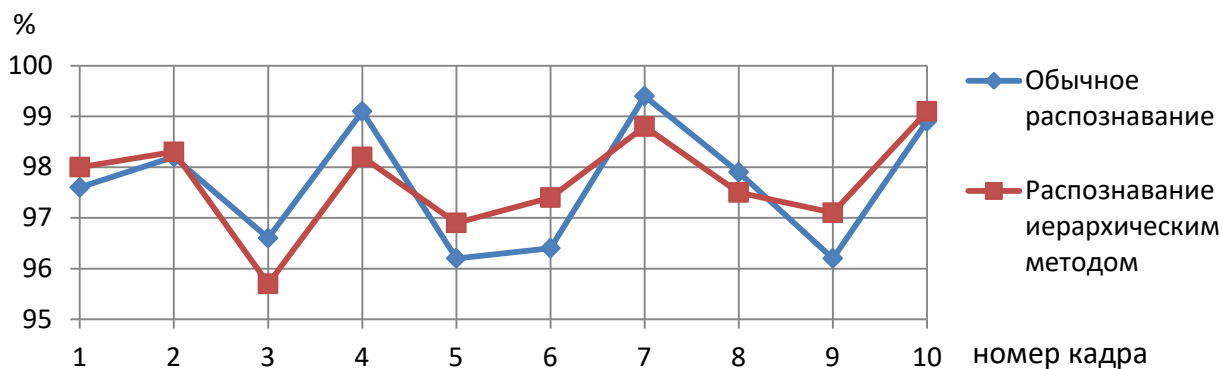


Рис. 7. График правильности распознавания объекта на кадре

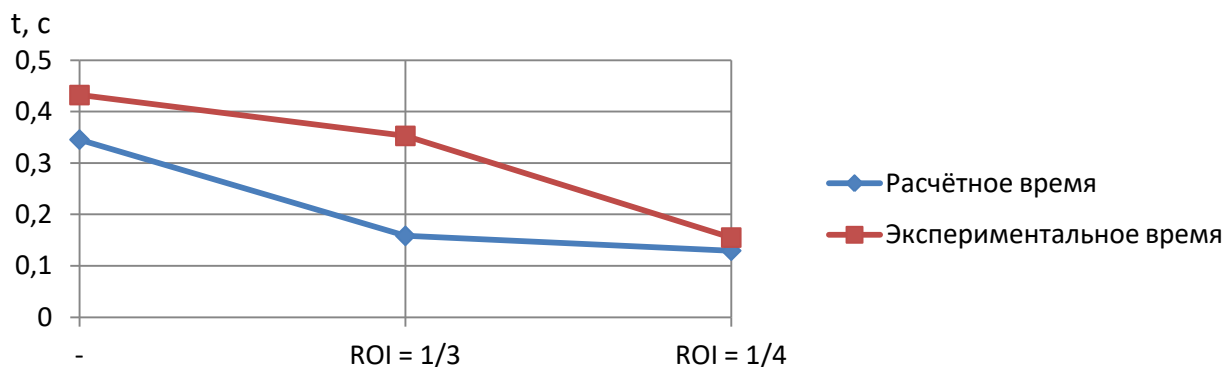


Рис. 8. График времени распознавания объекта на кадре

Разница в показателях времени распознавания между расчётным и экспериментальным временем, прежде всего, обусловлена наличием дополнительных временных задержек в работе реальной системы, вызванных записью и чтением информации из памяти контролера, а также техническими особенностями работы операционной системы. Экспериментальные результаты, полученные на том же автомате, но при  $ROI = 1/3$ , демонстрируют влияние загруженности системы на скорость обработки данных – наблюдается уменьшение времени распознавания, однако в меньшей степени из-за периодической нехватки вычислительных ресурсов. Таким образом, разработанные в третьей главе, модели позволяют рассчитать параметры системы, при которых иерархический алгоритм распознавания может быть применён эффективно.

Подобные расчёты могут быть выполнены для любых систем, занимающихся визуальным распознаванием объекта на изображении. При больших вычислительных возможностях платформы и/или меньшей вычислительной

сложности алгоритмов распознавания (при заданном размере изображения) различия между временными показателями обычного и иерархического распознавания будут меньше. При значительной начальной нехватке вычислительных ресурсов – рост производительности будет наглядней, но может не достичь оптимальных значений из-за разумного ограничения размера ROI, всё ещё позволяющего распознавать объекты с заданной достоверностью.

Освободившиеся вычислительные ресурсы было принято направить на обработку информации с дополнительной камеры. Для внесения изменений в конструкцию автомата была разработана полезная модель. Она учитывает возможность установки двух камер соосно отсеку распознавания. Подобная конструкция позволяет уменьшить высоту отсека распознавания до 50%, что открывает возможность для увеличения полезного объёма отсека хранения.

Для корректной работы обновленного отсека распознавания была разработана программа бинокулярного зрения. Она реализует процесс склейки изображений с двух камер с учетом расстояния до объекта. Это позволяет получать изображения предмета при его близком расположении к камерам без смещений, вызванных смещением объекта в кадре. Алгоритм опирается на сведения, получаемые от матриц камер и датчика расстояния, установленного в автомате.

Описанная модификация повысила время автономной работы автомата, что снижает потенциальный срок самокупаемости и уменьшает затраты на его обслуживание.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Основным результатом диссертационной работы является решение научной задачи, заключающейся в разработке метода распознавания данных, представленных в графическом виде в АСУТП, позволяющего повысить скорость обработки (при заданной достоверности результатов распознавания) в условиях ограниченных вычислительных ресурсов:

— разработаны аналитическая и имитационная модели иерархической системы распознавания информации, представленной в графическом виде, в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, позволяющие оценить эффективность модернизации подсистемы распознавания АСУТП по входным характеристикам (интенсивности потока заявок и обслуживания, полный размер анализируемого изображения, размеры области интереса и коэффициент предварительного сжатия изображения);

— разработан оригинальный иерархический метод обработки информации, представленной в графическом виде, в автоматизированной системе управления на основе иерархического подхода, позволяющий снижать требования к аппаратной базе системы без изменения уровня достоверности результатов распознавания и уменьшающий общее время распознавания объекта;

— выполнена программно-аппаратурная реализация системы иерархического метода распознавания информации, представленной в графическом



виде в условиях ограниченных вычислительных ресурсов на базе автомата по сортировке твёрдых бытовых отходов «Sortomat».

Основные положения в диссертации отражены в следующих публикациях:

*Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Тур А.И., Кокоулин А.Н., Ахметзянов К.Р., Южаков А.А. Вопросы применения иерархических систем распознавания в системах видеонаблюдения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2020, № 34

2. Тур А.И., Кокоулин А.Н., Дзыгарь А.В. Иерархическая система поиска и распознавания штрихкода на повреждённой таре в автомате раздельного сбора отходов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2019, № 29

3. Тур А.И., Липин Ю.Н. Вопросы восстановления поврежденных штрихкодов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2019, т. 21, № 3

4. Тур А.И., Южаков А.А., Кокоулин А.Н. Иерархическая архитектура сверточной нейронной сети в распределенной системе распознавания лиц // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2019, т. 21, № 3

*Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных SCOPUS:*

5. Кокоулин А.Н., Тур А.И., Южаков А.А., Князев А.И. Архитектура иерархической сверточной нейронной сети в распределенной системе распознавания лиц // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) : Jan. 29-30, 2019, St. Petersburg, Moscow, Russia / IEEE Russia North-West section [et. al.]. - [S. I.] : [s. n.], 2019. - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8656727>, Материалы конференции молодых ученых-исследователей в области электротехники и электроники (ElConRus), IEEE 2019: Санкт-Петербург, Москва, 29-30 января 2019 года, секция IEEE Российская Северо-Западная секции [Б. М.] : [б. и.], 2019. - URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8656727>

6. Кокоулин А.Н., Южаков А.А., Тур А.И., Польшгалов С.В., Троегубов А.С., Коротаев В.Н. Проект по сбору контейнеров для напитков // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 317. - Art. 012006. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/317/1/012006>, Серия конференций IOP: Земля и наука об окружающей среде, 2019, Т. 317. - Артикул. 012006. - URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/317/1/012006>

7. Тур А.И., Кокоулин А.Н., Южаков А.А., Князев А.И. Оптический метод распознавания и сортировки пластиковых отходов в обратном торговом автомате // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 : [Conf. Proc.], 30 June-6 July 2019, Albena, Bulgaria. Vol. 19, iss. 4.1 / Bulg. Acad. of Science [et. al.]. - Sofia : [s. n.], 2019, 19-я Международная многопрофильная

научная геоконференция SGEM 2019 : [тр. конф.], 30 июня-6 июля 2019 года, Албена, Болгария. Т. 19, вып. 4.1 / Болгар. акад. наук [и др.]. - София : [б. и.], 2019

8. Тур А.И., Южаков А.А., Кокоулин А.Н., Лукичев А.Н. Подготовка системы распознавания объектов на базе TensorFlow и Keras // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018) : сб. докл., Санкт-Петербург, 23-25 мая 2018 г. : в 2 т. Т. 1-2 / Междунар. ассоц. нечетких систем, М-во образования и науки Рос. Федерации, Науч. совет по искусственному интеллекту РАН [и др.]. - Санкт-Петербург : СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2018. - Т. 1. - Секция 3

9. Тур А.И., Южаков А.А., Кокоулин А.Н. Возможности применение алгоритмов нечёткого поиска и нейронных сетей в технологии Fingerprint // XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2017) : сб. докл., Санкт-Петербург, 24-26 мая 2017 г. Секция 1-8 / Междунар. ассоц. нечетких систем, М-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]. - Санкт-Петербург : [б. и.], 2017. - 1 USB флеш накопитель (General USB Flash Disk)

10. Тур А.И., Южаков А.А., Кокоулин А.Н. Возможности применение алгоритмов нечёткого поиска и нейронных сетей в технологии Fingerprint (статья на англ. языке) // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017 : [Conf. Paper], St. Petersburg, 24-26 May 2017 / Russia (Northwest) Section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. “LETI”. - [S. I.] : IEEE Inc., 2017, Материалы 20-й Международной конференции IEEE по мягким вычислениям и измерениям 2017 года, SCM 2017 : [тр. конф.], Санкт-Петербург, 24-26 Мая 2017 г. / Секция Россия (Северо-Запад), Санкт-Петербургский Электротехнический университет “ЛЭТИ”. - [Б. М.] : IEEE Inc., 2017

*Патенты, полученные по тематике диссертационной работы:*

11. № 188755 Россия, МПК G07F 11/00 (2006.01) Автомат по приёму тары (патент на полезную модель) / Тур А.И., Южаков А.А., Ахметзянов К.Р., Кокоулин А.Н // Бюл. № 12

12. № 2019664159 Программа бинокулярного зрения с учетом расстояния до объекта (свидетельство на программу для ЭВМ) / Тур А.И., Южаков А.А., Ахметзянов К.Р., Кокоулин А.Н

*Материалы, опубликованные в тезисах докладов, материалах конференций и прочих источниках:*

13. Кокоулин А.Н., Тур А.И., Князев А.И. Применение иерархического подхода для распознавания объектов в автоматах по приему использованной тары // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) : Москва, 17-20 июня 2019 г. : [доклады] / Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. - Москва : ИПУ РАН, 2019. - 5 с. - 1 USB flash-drive

14. Кокоулин А.Н., Тур А.И., Князев А.И., Южаков А.А. Система сортировки пустых контейнеров в автоматах по сбору использованной тары //

Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : сб. стат. по материалам Четвертой всерос. науч.-практ. конф., проводимой в рамках Перм. естественного форума “Математика и глобальные вызовы XXI века” (г. Пермь, 21-23 мая 2019 г.). Ч. I / Перм. гос. нац. исслед. ун-т, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т [и др.]. - Пермь : Издат. центр ПГНИУ, 2019

15. Тур А.И. Использование технологии burst buffer для обработки больших данных // Перспективные технологии в средствах передачи информации : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. ПТСПИ-2017, г. Суздаль, 5-7 июля 2017 г. Т. 1 / М-во образования и науки Рос. Федерации, Рос. науч.-техн. о-во радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова [и др.]. - Владимир : ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 2017

16. Южаков А.А., Тур А.И. Выбор алгоритмов для реализации системы машинного зрения // Управление большими системами. УБС-2017 : материалы XIV Всерос. shk.-конф. молодых ученых, 4-8 сент. 2017, Пермь / Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Москва : [б. и.], 2017