

На правах рукописи



МОРОЗОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

**Разработка методики построения качественных матриц корреспонденций
для решения задач управления транспортными потоками**

Специальность 05.22.08 – «Управление процессами перевозок»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орёл - 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Научный руководитель: **Жанказиев Султан Владимирович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Горев Андрей Эдливич,**
доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные системы», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург;
Веремеенко Елена Геннадьевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация перевозок и дорожного движения», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж.

Защита состоится **«24» марта 2021 г.** в **11:00** часов на заседании объединенного диссертационного совета Д **999.111.03** по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «ТулГУ», ФГБОУ ВО «ЛГТУ» по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, аудитория 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орёл, пл. Каменская д.1.

Автореферат разослан: «___» _____ **2021г.** Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации в двух экземплярах направлять в диссертационный совет по адресу:

302026, г. Орёл, ул. Комсомольская д. 95.

Телефон для справок +7(960)647-66-60 E-mail: srmotu@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 999.111.03



В.В. Васильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Анализ мировой практики в области систем управления транспортными потоками позволяет сделать вывод, что применение интеллектуальных транспортных систем в качестве инструмента, способного обеспечить организацию дорожного движения в режиме адаптации к сложившейся дорожной обстановки, так и в режиме прогнозирования. Область контроля, охватываемая данным системами может распространяться как на отдельный участок улично-дорожной сети (micro-режим управления), так и на дорожную сеть регионов (macro-режим). Применение интеллектуальных систем управления транспортными потоками, как правило, приводит к росту качества предоставляемых транспортных услуг (грузо- и пассажироперевозки). Поскольку рассматриваемый вид услуг неразрывно связан с социальным институтом и экономическим сектором, то можно с полной уверенностью сказать, что темпы и качество развития бизнес-сектора (производство и оказание услуг) и социум-сектора напрямую зависят от качества развития технологий на транспорте.

В настоящее время интеллектуальные транспортные системы управления транспортными потоками воспринимаются в основном как средство оптимизации директивных методов управления транспортными потоками. Однако, не так давно было предложено развивать дополнительные возможности, а именно управление транспортными потоками посредством подсистемы информирования участников дорожного движения. Такие подсистемы называли косвенными (недирективными) системами управления транспортными потоками, задача которых состоит в предоставлении актуальной информации о возможных альтернативных вариантах (маршрутах) проезда по улично-дорожной сети, основываясь на данных о текущей и прогнозной дорожной обстановке. При этом, в системы косвенного управления транспортными потоками заложена функция проведения самоанализа, т.е. проведение оценки последствий своего функционирования, что позволяет проводить более гибкое и эффективное управления транспортными потоками. Такой функционал позволяет оптимизировать динамическую пропускную способность улично-дорожной сети (сети дорог) и гармонизировать транспортные потоки в целом.

Для эффективного функционирования систем косвенного управления транспортными потоками необходимо располагать информацией об актуальных истоках транспортного потока и их доминантных объектах притяжения, и основных маршрутах движения транспортных потоков, что позволит наиболее рационально формировать сообщения участникам дорожного движения. От точности перечисленных исходных данных напрямую зависит эффективность

функционирования систем косвенного управления транспортными потоками, кроме того, некорректное информирования может не только оказаться малоэффективным, но и оказывать существенное негативное воздействие на пропускную способность улично-дорожной сети (сети дорог), создавая или усугубляя транспортные заторы.

Также стоит отметить, что в настоящее время в Российской Федерации разработаны и вступили в действие несколько стандартов, в которых перечисляются различные виды необходимых исходных данных для интеллектуальных транспортных систем. Однако, они не предъявляют никаких требований к их минимальной точности и не предложены методики сбора рассматриваемых исходных данных, что может спровоцировать создание и внедрение неэффективных систем косвенного управления транспортными потоками, что будет являться нерациональным использованием материальных ресурсов.

Стоит также отметить, что, в рамках современной тенденции развития интеллектуальных транспортных систем и автономного движения в частности, качественные матрицы корреспонденции также играют немаловажную роль. Данные матрицы являются неотъемлемой технологической частью цифровой модели дороги и являются источником всех необходимых данных для расчета наиболее оптимальных маршрутов движения транспортных средств. Стоит отметить, что расчет маршрутов может исходить как из принципа соблюдения интересов владельцев транспортных средств (минимизация временных затрат и перепробега), так и из принципа соблюдения интересов структур, отвечающих за организацию дорожного движения, иными словами, оптимизируя загрузку дорожной сети без учета личных интересов участников дорожного движения.

При определенных условиях с помощью качественных матриц корреспонденции возможна и качественная реорганизация принципов управления транспортными потоками, при которых станет возможным не только процесс реагирования на спрос на передвижения транспортных средств, но и само создание транспортных потоков под наиболее оптимальный сценарий управления.

Отсутствие научной и практической проработки вопроса, связанного с качественными матрицами корреспонденций также актуализирует тематику диссертационного исследования. Таким образом, исследование, посвященное разработке методики построения качественных матриц корреспонденции как источника исходных данных для решения задач управления транспортными потоками является актуальной задачей.

Степень проработанности темы исследования. Вопрос оптимизации загрузки улично-дорожной сети был и остается актуальным для большинства

стран мира, поскольку рост уровня автомобилизации населения провоцирует необходимость удовлетворения постоянно растущего спроса на передвижение. Одним из решений данного вопроса является совершенствование систем управления транспортными потоками. Данному решению еще с середины прошлого столетия. Научной проработке в данной области было посвящено немало работ целого ряда советских ученых, таких как: Афанасьев М.Б., Бабков В.Ф., Васильев А.П., Лобанов Е.М., Сильянов В.В., Ситников Ю.М., Калужский Я.А, Рыжков И.П., Зырянов В.В. Среди зарубежных трудов, посвященных имитационному моделированию, особо выделяются труды Джиппса П. и Дрю Д., Хейт Ф. которые легли в основу многих программных продуктов имитационного моделирования. Также существует множество современных научных трудов, посвященных данному аспекту, однако, развитие систем управления транспортными потоками становится все более зависимым от текущих параметров транспортного потока. При современном уровне развития улично-дорожных сетей и высокого уровня мобильности населения сбора информации о классических параметрах транспортных потоков становится недостаточно для формирования эффективного управления транспортными потоками, т.к. для построения достоверных имитационных моделей и организации косвенного управления транспортными потоками требуется дополнительная информация об объектах притяжения и о маршрутах движения транспортных потоков. Кроме того, стремительное развитие технологий автономного движения подводит к необходимости и, своего рода, неизбежности разработки и внедрения технологии цифровой модели дороги, для которой информация об объектах притяжения, их актуального «времени жизни», объем транспортных потоков и маршрутах движения является основополагающей информацией. Таким образом возникает необходимость в решении достаточно непростой задачи – разработке инструмента, позволяющего получать информацию о маршрутах движения транспортных средств и инструмента обработки данной информации, с целью определения остальных необходимых данных (приоритетные объекты притяжения, истоки транспортных средств, их «актуальное время функционирования» и т.д.).

Цель исследования: разработка методики построения качественных матриц корреспонденций для решения задач управления транспортными потоками.

Для достижения цели исследования были **поставлены следующие основные задачи:**

1) проведение исследования зависимости эффективности систем косвенного управления транспортными потоками от точности качественных матриц корреспонденции;

2) определение минимально допустимой точности качественных матриц корреспонденции для эффективного функционирования систем косвенного управления транспортными потоками;

3) разработка метода снижения требований к минимальной точности качественных матриц корреспонденций;

4) проведение исследования зависимости точности качественных матриц корреспонденции от точности используемого оборудования и его расположения на сети дорог.

Объект исследования – транспортные сети городов и автомагистралей, системы косвенного управления транспортными потоками, дорожная инфраструктура, связанная с элементами косвенного управления транспортными потоками.

Предмет исследования – параметры транспортных потоков и улично-дорожной сети, а именно: интенсивность, скорость и плотность транспортных потоков, топология улично-дорожной сети, методы получения исходных данных для систем управления транспортными потоками.

Научная новизна заключается в следующих положениях:

– разработана математическая модель расчета точности качественных матриц корреспонденции в зависимости от точности используемого оборудования и его расстановки на улично-дорожной сети;

– определена зависимость эффективности систем косвенного управления транспортными потоками от точности качественных матриц корреспонденций при ошибках I и II рода;

– определена минимальная необходимая точность качественных матриц корреспонденций для эффективного функционирования систем косвенного управления транспортными потоками, равная 90%;

– разработан принцип перерасчета качественных матриц корреспонденций, позволяющий снизить требования к точности качественных матриц корреспонденций на 30%;

– определена область допустимых значений средней фактической точности определения маршрутов движения транспортных средств, при которой реализуется эффективное функционирование систем косвенного управления транспортными потоками.

Теоретическая и практическая значимость заключается:

– в практических рекомендациях по применению разработанной математической модели расчета точности качественных матриц корреспонденции в зависимости от точности используемого оборудования и его расстановки на улично-дорожной сети, в качестве инструмента достижения наибольшей оптимизации затрат как на стадиях разработки и внедрения, так и на

стадии аудита уже функционирующих интеллектуальных транспортных систем, связанных с управлением транспортными потоками;

– в разработанной методике построения качественных матриц корреспонденций, применение которой позволит создавать достоверные имитационные модели и разрабатывать эффективные решения в области управления транспортными потоками. Кроме того, наличие достоверных имитационных моделей будет полезным для решения задач транспортного планирования;

– в практических рекомендация по применению идентификационного оборудования и по его расстановке на улично-дорожной сети;

– в практических рекомендациях по внесению изменений в ГОСТ Р 56351 «Интеллектуальные транспортные системы. Косвенное управление транспортными потоками. Требования к технологии информирования участников дорожного движения посредством динамических информационных табло» и ОДМ 218.9.011 «Рекомендации по выполнению обоснования интеллектуальных транспортных систем», а именно внесение требований к минимальной допустимой точности качественных матриц корреспонденций и внедрение методики построения рассматриваемых матриц в качестве приложения, которое носит рекомендуемый характер.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, метод имитационного моделирования, метод сравнения.

Положения, выносимые на защиту:

1) математическая модель расчета точности качественных матриц корреспонденции в зависимости от точности используемого оборудования и его расстановки на улично-дорожной сети;

2) зависимость эффективности систем косвенного управления транспортными потоками от точности качественных матриц корреспонденций;

3) минимальная необходимая точность качественных матриц корреспонденций для эффективного функционирования систем косвенного управления транспортными потоками;

4) принцип перерасчета качественных матриц корреспонденций;

5) область допустимых значений средней фактической точности определения маршрутов движения транспортных средств для эффективного функционирования систем косвенного управления транспортными потоками.

Степень достоверности. Степень достоверности результатов исследования подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями, а именно: использование метода системного анализа, метода сравнения, применение классической теории вероятностей и математической

статистики, использование современных программных продуктов имитационного моделирования транспортных потоков, метод сравнения.

Личный вклад автора. Все новые идеи и полученные результаты при разработке математической модели расчета точности качественных матриц корреспонденции с помощью дорожной инфраструктуры и методики построения качественных матриц корреспонденции для решения задач управления транспортными потоками средств принадлежат автору.

Внедрение и реализация результатов работы

Полученные теоретические результаты приняты к использованию в учебном процессе МАДИ кафедрой «Организация и безопасность движения» по дисциплине «Интеллектуальные транспортные системы».

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении НИР в рамках следующих контрактов:

1) Государственный контракт № П1272 от 27 августа 2009 г. «Создание интеллектуальной системы косвенного управления транспортными потоками и обеспечения безопасности на автомобильных дорогах» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.;

2) Государственному контракту № 02.740.11.0671 от 29 марта 2010 г. «Разработка принципов проектирования интеллектуальных транспортных систем, как систем технологического и информационного взаимодействия транспортных средств, инфраструктуры управления и технических комплексов на дороге с целью достижения максимальных показателей эффективности функционирования дорожно-транспортного комплекса регионов (городов)» в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.;

3) Государственный контракт № УД 47/186 от 14.10.2011 г. «Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Интеллектуальные транспортные системы. Системы организации дорожного движения. Косвенное управление транспортными потоками. Требования к техническим элементам информирования участников дорожного движения» (ГОСТ Р 56350);

4) Государственный контракт № УД 47/187 от 14.10.2011 г. «Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Интеллектуальные транспортные системы. Системы организации дорожного движения. Косвенное управление транспортными потоками. Требования к технологии информирования участников дорожного движения» (ГОСТ Р 56351);

5) Соглашение № 14.В37.21.0120 между Министерством образования и науки Российской Федерации и ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

«Формирование концепции жизненного цикла локальных проектов Интеллектуальных транспортных систем»;

б) Государственный контракт № УД 47/30 от 19 февраля 2013 г. «Разработка ОДМ «Рекомендации по выполнению системного анализа в рамках обоснования проектов Интеллектуальных транспортных систем на федеральных автомобильных дорогах» (ОДМ 218.9.011).

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.22.08 – «Управление процессами перевозок», пункт 1 – «Планирование, организация и управление транспортными потоками».

Апробация результатов. Результаты исследований доложены, обсуждены и одобрены на 72, 73, 74 и 75 научно-методических и научно-исследовательских конференциях Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), г. Москва в 2014, 2015, 2016 и 2017 гг. соответственно, на заседаниях кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» в 2016 и 2019 гг. (протоколы заседания кафедры №5 от 29.01.2016 г. и № 1 от 11.09.2019 г.), на международной научно-практической конференции Транспорт России: проблемы и перспективы, г. Санкт-Петербург, 2016 г., на 13-ой международной конференции «Организация и управление безопасностью движения в больших городах», ОБДД-2018, 28-30 сентября 2018г., Санкт-Петербург, Россия.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работы, общим объемом 7,5 п.л., в том числе 4 из них опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и 3 статьи опубликованы в изданиях включенных в перечень научных изданий SCOPUS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографического списка из 120 наименований и 4 приложений. Объем работы: 197 стр. печатного текста, 66 рисунков, 47 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационного исследования, определены предмет и объект исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту, а также информация о внедрении результатов исследования в образовательный процесс и научно-исследовательские работы в рамках Государственных контрактов и соглашений.

В первой главе раскрыто понятие систем косвенного управления транспортными потоками (КУТП), принцип их функционирования, схема процесса разработки и основные преимущества перед существующими системами информирования участников дорожного движения (УДД). Также проведен анализ отечественного и зарубежного опыта в области технологий информирования УДД, а именно методов сбора исходных данных, построению матриц корреспонденции и их применение в средах имитационного моделирования. Раскрывается понятие качественных матриц корреспонденции¹ (КМК) и проводится анализ возможных и перспективных способов ее построения. В результате проведенного анализа были определены основные задачи и сформирована структура диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена определению целевой функции, основным ограничениям и допущениям, принимаемым в рамках диссертационного исследования, разработке математической модели расчета точности маршрутов движения транспортных средств и разработке методик проведения экспериментальных исследований.

На основе ограничений и целевой функции были определены основные индикаторы эффективности, необходимые для проведения экспериментов и анализа их результатов:

- увеличение фактической пропускной способности улично-дорожной сети (УДС);
- снижение временных затрат на преодоление участка УДС;
- оптимальность загрузки УДС (равномерная загрузка дорог);

Для расчёта данных индикаторов эффективности были использованы следующие параметры транспортных потоков (ТП):

- средняя интенсивность ТП (N , авт/ч);

¹ КМК – Таблица, отражающая результат определения спроса, ориентированного относительно лимита пропускной способности в пределах принятой области распространения локального проекта ИТС, определяемая методом анализа треков транспортных средств и состоящая из истоков, целей и маршрутов следования [ГОСТ Р 56829].

– общее время в пути, ($t_{\text{общ}}$, сек/мин).

Примечание – Параметр «общее время в пути» обладает специфичной размерностью, указывающая величину суммарного времени, затраченное всеми транспортными средствами (ТС) на преодоление модели участка УДС за один час имитации (аналогичным показателем можно назвать сумма моточасов всех сгенерированных ТС за час имитации).

Для оценки оптимальность загрузки УДС проводился расчет основных параметров уровня обслуживания:

- коэффициент загрузки движения (z);
- коэффициент скорости движения (c);
- коэффициент насыщенности движения (p).

Оптимальность загрузки УДС оценивалась с помощью среднеквадратичного отклонения (σ) перечисленных параметров для каждой из основных дорог моделей УДС.

Для обеспечения возможности корректного сравнения эффективности перераспределения ТП различных моделей был выведен коэффициент эффективности КУТП:

$$K_{\text{Э}} = \frac{t_{\text{авт баз}} - t_{\text{авт факт}}}{t_{\text{авт баз}} - t_{\text{авт мин}}} = \frac{\Delta t_{\text{авт факт}}}{\Delta t_{\text{авт max}}}, K_{\text{Э}} \leq 1 \quad (1)$$

где $t_{\text{авт мин}}$ – общее время, затраченное ТС на проезд по УДС при наиболее эффективном КУТП (мин/ч);

$t_{\text{авт факт}}$ – общее время, затраченное ТС на проезд по УДС при текущем КУТП (мин/ч);

$t_{\text{авт баз}}$ – общее время, затраченное ТС на проезд по УДС при отсутствии КУТП (мин/ч).

Анализ влияния на эффективность КУТП проводился с учетом возможности возникновения следующих ошибок:

- ошибка I рода, при которой расчетная точность КМК ниже фактической;
- ошибка II рода, при которой расчетная точность КМК выше фактической.

В рамках экспериментов были созданы имитационные модели, обладающие необходимыми условиями для осуществления перераспределения ТП (базовые модели), относительно выходных данных которых проводился расчет коэффициента эффективности КУТП. Для каждой модели назначалась точность КМК, в зависимости от которой создавались матрицы сторонних ТП, представляющие собой разницу между фактической и расчетной точностями КМК (для соответствия выходным данным базовых моделей). При этом точность КМК определяла долю ТП, которую допускалось перераспределять по альтернативным маршрутам. Методика исследования зависимости

эффективности КУТП от точности КМК при ошибке I рода представлена на рисунке 1 (а), а при ошибке II рода на рисунке 1 (б).

Поскольку для рассматриваемого оборудования характерна только ошибка I рода, то был разработан принцип перерасчета КМК исходя из её средней точности определения маршрутов движения до уровня 90%, таким образом создавалось искусственное формирование ошибки II рода.

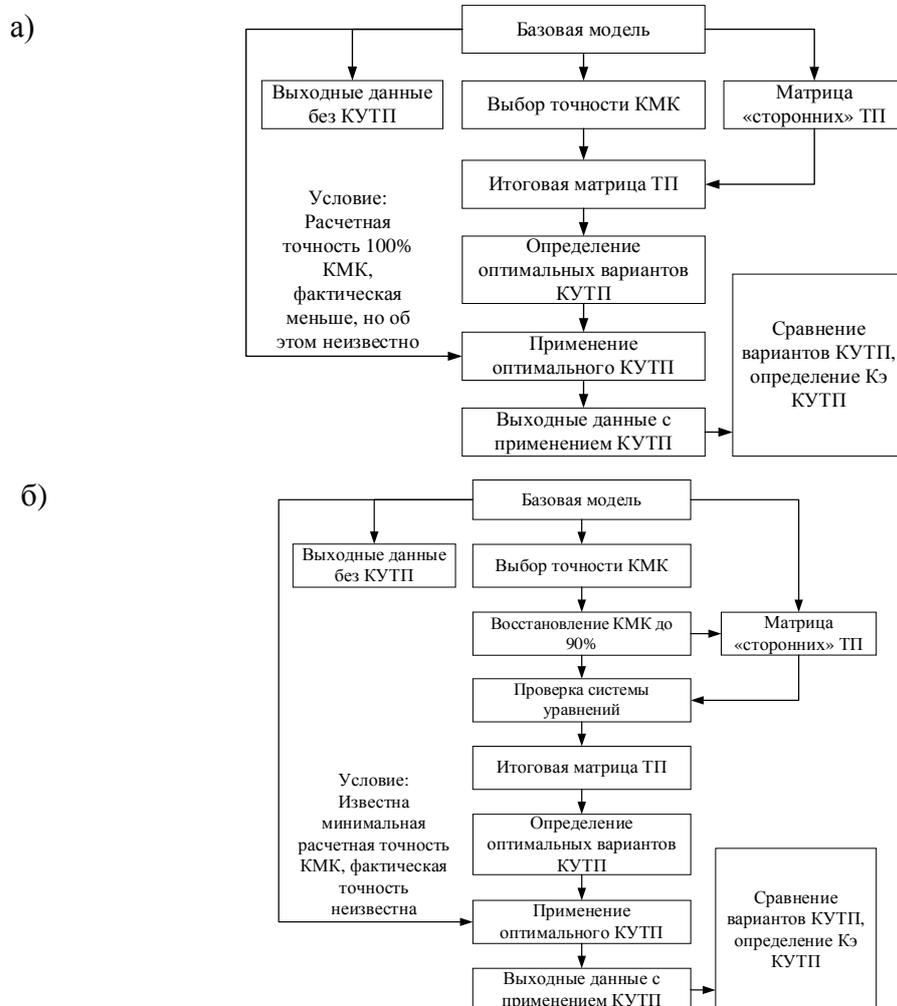


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента
а – при недооценке КМК; б – при недооценке КМК

С целью приближения к реальным условиям и для повышения достоверности полученных результатов каждой рассматриваемой точности КМК с помощью генератора псевдослучайных чисел назначалась фактическая точность маршрутов движения ТС в интервале $[P; 100]$, где P – минимальная расчетная точность КМК, относительно которой проводился перерасчет КМК до уровня 90% относительно значения P .

Далее, во второй главе, было проведено аналитическое исследование зависимости точности КМК от точности оборудования (идентификационных блоков (ИБ)) и вариантов его расстановки на УДС. За основу были взяты положения теории вероятностей, т.к. точность идентификации можно

рассматривать как вероятность наступления события ($p_{\text{бл}}$). При этом идентификация ТС представляет собой случайное независимое испытание, что позволило применить законы теории вероятностей при расчете точности маршрутов (уравнение Бернулли, правило полной группы). Данный подход позволил определить «наихудшие варианты» развития событий, иными словами - минимальную гарантированную точность маршрутов движения ТС.

Также на данном этапе был разработан способ повышения точности определения маршрутов движения, который заключался в рассмотрении возможных дорожных ситуаций (рисунок 2).

Рассмотренные варианты восстановления точности маршрутов подчиняются одной закономерности при составлении формул расчета:

$$P = p_{\text{бл}}^n + \alpha \cdot k \cdot q_{\text{бл}} \cdot p_{\text{бл}}^{n-1} \quad (1)$$

где α – доля ТП, которые возможно восстановить, равная вероятности успешной идентификации хотя бы на одном ИБ, расположенном на объезде;

k – коэффициент, указывающий количество возможных подобных случаев;

$q_{\text{бл}} \cdot p_{\text{бл}}^{n-1}$ – вероятность неудачной идентификации только на одном ИБ.

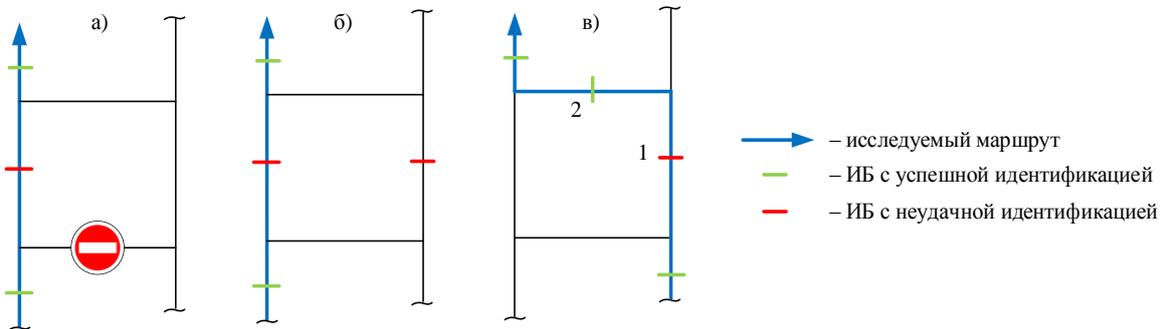


Рисунок 2 – Примеры случаев дорасчета точности маршрутов

С учетом данных положений было выведено уравнение точности построения маршрута:

$$P_m = P_n(n) + \sum_{j=1}^n P_n(n-j) \cdot \sum(\alpha_i \cdot k_i) \quad (2)$$

где i – количество ИБ, расположенных на объезде;

$\alpha_i = 1 - q^i$ – вероятность успешной идентификации хотя бы на одном из i ИБ, расположенных на объезде;

$P_n(n-j)$ – вероятность неудачной идентификации одновременно на j ИБ только для одного сочетания j ИБ из n ;

k_i – коэффициент, обозначающий количество сочетаний рассматриваемых α_i и $P_n(n-j)$.

В зависимости от исходных данных с помощью уравнение точности построения маршрута (2) возможно получить следующие результаты:

- наиболее оптимальные варианты расстановки ИБ по УДС;
- минимальное необходимое количество ИБ;
- минимальная точность ИБ.

В третьей главе приведено описание проведенных экспериментов и их выходные данные, необходимые для последующей обработки и анализа.

С целью получения более достоверных результатов исследования эксперимент были созданы три модели УДС, обладающие различными характеристиками:

- идеальная имитационная модель (отсутствие сторонних ТП, широкие возможности для перераспределения ТП);
- имитационная модель №1: основана на идеальной модели и приближена к реальным условиям (изменена топология УДС; добавлены сторонние ТП, не подверженные влиянию КУТП);
- имитационная модель №2: совершенно иная УДС, приближенная к реальным условиям (наличие сторонних ТП, светофорного регулирования). (рисунок 5).

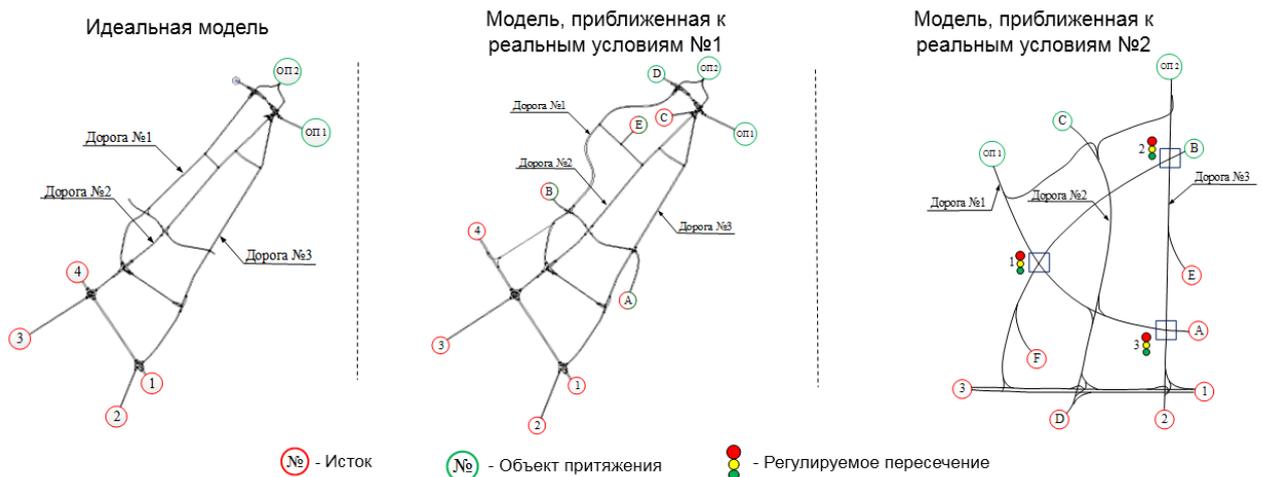


Рисунок 3 – Примененные модели УДС

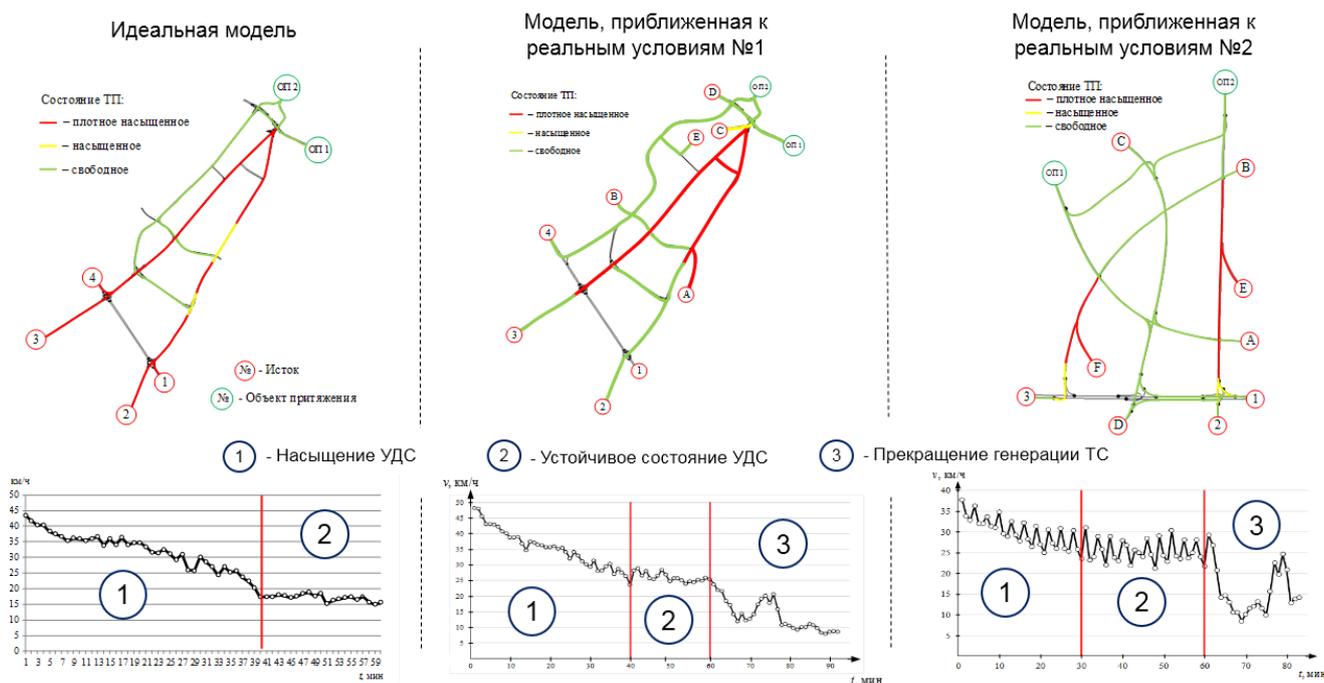
Каждая из моделей отвечает необходимым требованиям для внедрения системы КУТП:

- наличие альтернативных путей;
- наличие транспортных заторов;
- наличие доминантных объектов притяжения;
- длина альтернативных маршрутов не превышает длину основных маршрутов более чем в два раза.

Для каждой модели была создана определенная дорожная ситуация, которая считалась базовой, а также был определен актуальный временной

интервал, в течение которого собранные статистические данные позволили получить наиболее качественные результаты. Данное положение связано с особенностью применяемой программы имитационного моделирования и позволило исключить интервалы заполнения и освобождения модели участка УДС после окончания генерации ТП, которые существенно искажали общую картину (рисунок 4).

Далее в главе описана методика проведения и результаты натурального эксперимента, направленного на изучение возможностей современных средств идентификации государственных регистрационных знаков (ГРЗ) графоаналитическим методом на полигоне МАДИ «Умная дорога» (рисунок 5). Целью эксперимента являлось установления точности идентификации ГРЗ в различных условиях (отсутствие загрязнения, максимальная допустимая загрязненность согласно ТР ТС 018/2011 и загрязнение, превышающее допустимое значение).



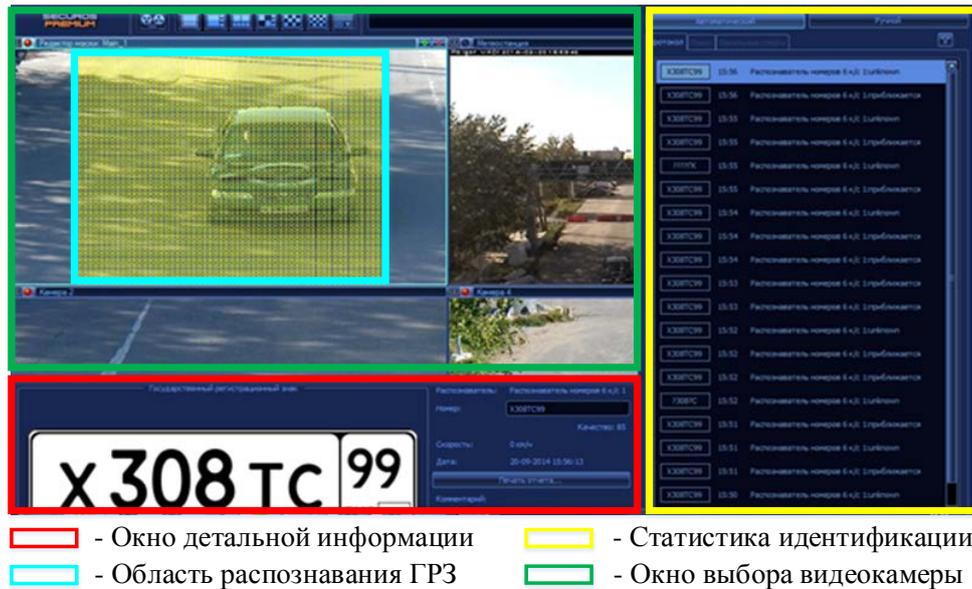


Рисунок 5 – Интерфейс программы распознавания ГРЗ

Также был проведен аналитический эксперимент по применению разработанной математической модели расчета точности маршрутов движения ТС на примере одной из моделей УДС (рисунок 6), где проводилась расстановка ИБ различными способами, для которых затем проводился расчет минимальной гарантированной точности определения маршрутов движения ТС.

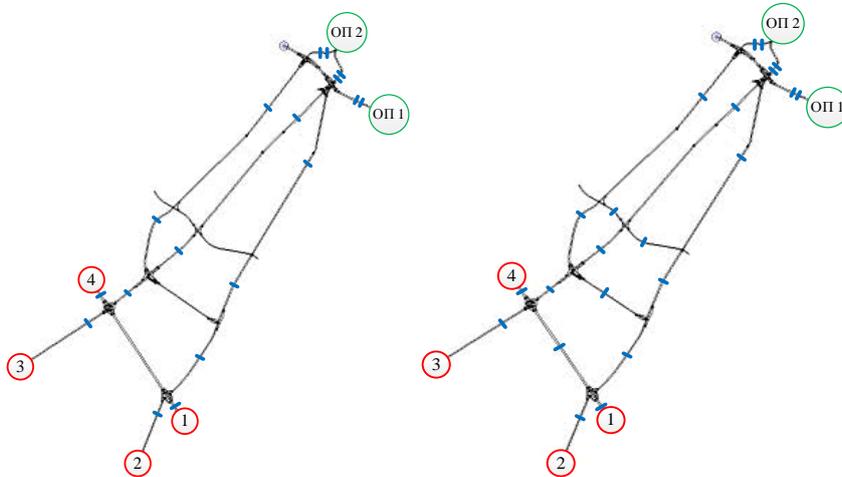


Рисунок 6 – Пример исследованных вариантов расстановки ИБ на УДС

В четвертой главе представлены результаты обработки и анализа данных, полученных в результате проведения экспериментов и сформулированы основные выводы диссертационного исследования.

Во-первых, обработаны результаты проведенных модельных экспериментов при исследовании влияния ошибки I рода (рисунок 7).

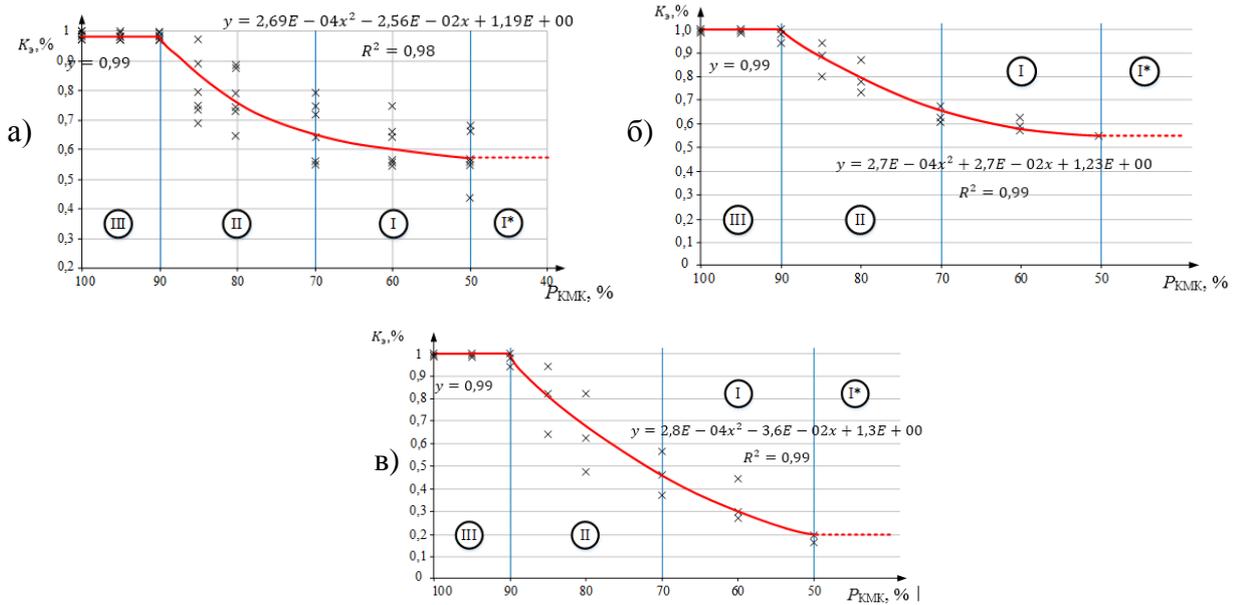


Рисунок 7 – Результаты проведенных модельных экспериментов при исследовании влияния ошибки I рода

а – идеальная модель, б – модель, приближенная к реальным условиям №1, в – модель, приближенная к реальным условиям №2

Согласно полученным данным зависимости эффективности КУТП от точности КМК при ошибке I рода были разделены на характерные интервалы:

– Интервал I* (точность КМК менее 50%). Характерен наличием единственного варианта перераспределения ТП, при котором большая часть ТП направлялась на альтернативные маршруты, что только усугубляло транспортные заторы;

– Интервал I (точность КМК от 50% до 70%) – область неэффективного КУТП. Характерна самыми низкими значениями коэффициента эффективности и значительной неравномерностью загрузкой основных дорог, $\sigma \in (0,2; 0,4]$;

– Интервал II (точность КМК находится в пределах от 70% до 90%) – область рискованного КУТП. Характерна непредсказуемой эффективностью КУТП вследствие чего применение КМК с данной точностью неприемлемо, $\sigma \in (0,1; 0,2]$;

– Интервал III (точность КМК превышает 90%) – область эффективного КУТП. Характерна наиболее эффективным КУТП и сбалансированной загрузкой УДС, $\sigma \leq 0,1$.

Таким образом, было определено, что минимальная допустимая точность КМК при её недооценке (ошибке I рода) составляет 90%.

Во-вторых, обработаны результаты проведенных модельных экспериментов при исследовании влияния ошибки II рода (рисунок 8).

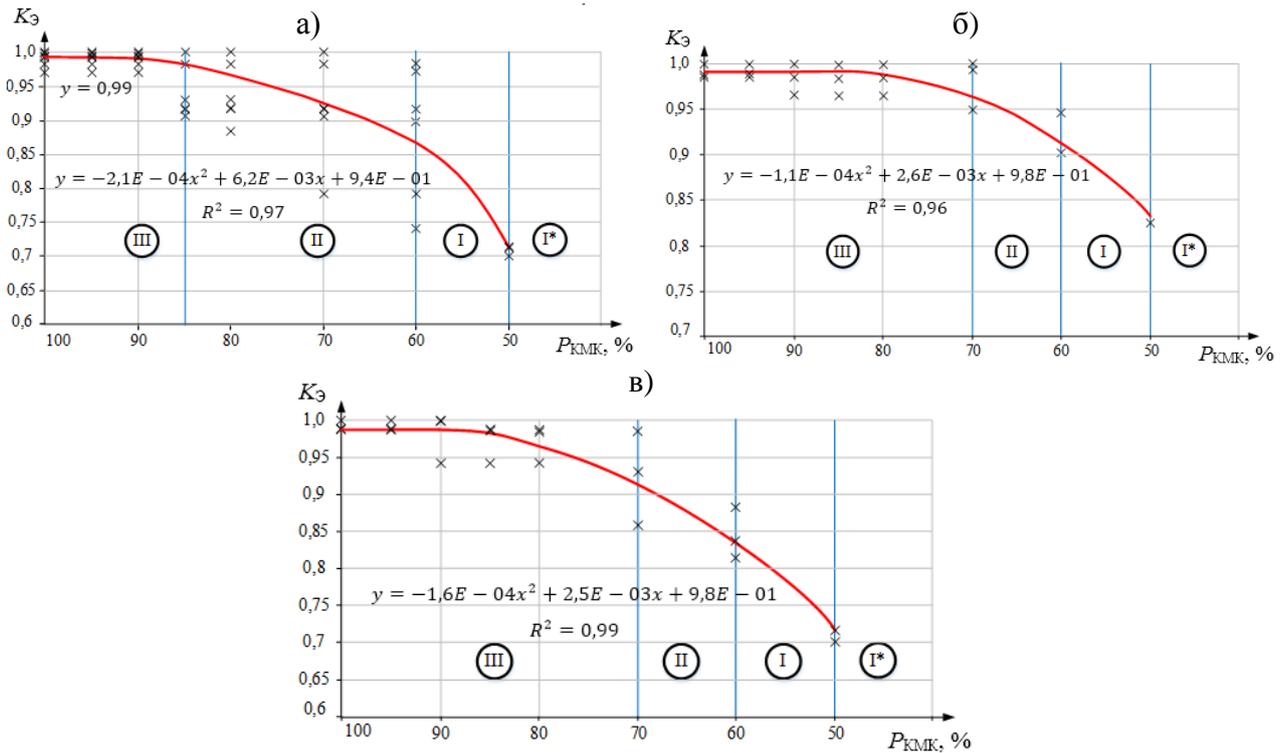


Рисунок 8 – Результаты проведенных модельных экспериментов при исследовании влияния ошибки II рода

а – идеальная модель, б – модель, приближенная к реальным условиям №1, в – модель, приближенная к реальным условиям №2

Согласно полученным данным зависимости эффективности КУТП от точности КМК при ошибке II рода были разделены на характерные интервалы:

– Интервал I* (точность КМК менее 50%). На данном интервале характеристики ТП, получаемых с помощью перерасчета существенно превышает величину ТП базовых моделей, что делает его рассмотрение нецелесообразным;

– Интервал I (точность КМК находится в пределах от 50% до 60%). Характерна значительным несоответствием перерасчетных и базовой КМК, что порождает ошутимое занижение возможной эффективности КУТП, $\sigma \in (0,15; 0,3]$;

– Интервал II (точность КМК находится в пределах от 60% до 80%). Характерна небольшим и средним превышением перерасчетных КМК над базовой матрицей, что также занижает эффективности КУТП, $\sigma \in (0,12; 0,17]$;

– Интервал III (точность КМК превышает 80%) – зона эффективного КУТП. Характерна наиболее эффективным КУТП, сбалансированной загрузкой УДС и небольшими отклонениями применяемых КМК от базовой матрицы, $\sigma \leq 0,1$.

Таким образом, было определено, что минимальная допустимая точность КМК при её недооценке составляет 60%, т.е. применение предлагаемого ранее

принципа перерасчета КМК позволяет снизить требования к минимальной необходимой точности КМК на 30%.

Для удобства сравнения результатов различных моделей между собой были построены сводные графики зависимости коэффициента эффективности КУТП от точности КМК при её недооценке и при её переоценке (рисунок 9а и 9б соответственно), анализ которых позволяет говорить о схожести полученных результатов на различных участках УДС и, следовательно, универсальности, полученных в рамках исследования результатов.

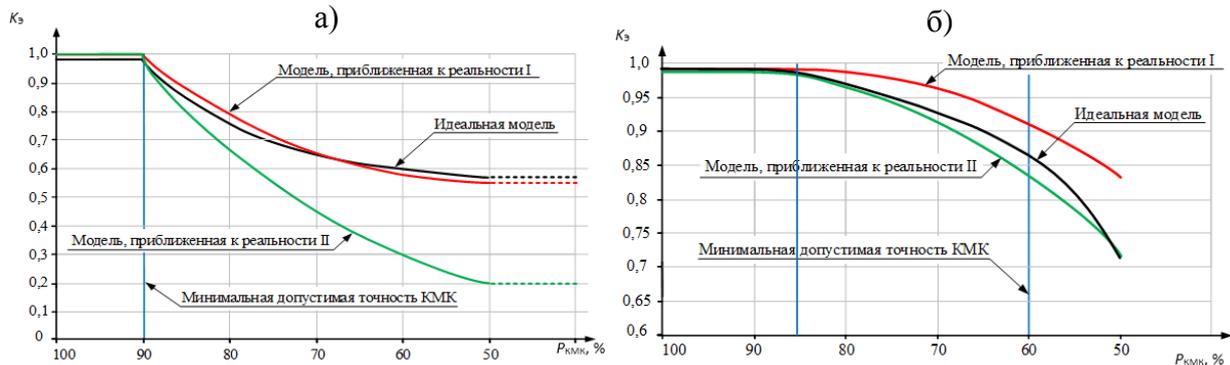


Рисунок 9 – Сравнение графиков зависимости эффективности КУТП от точности КМК при её недооценке (а) и переоценке (б)

В - третьих, была определена область допустимых значений значений средней фактической точности маршрутов движения ТС.

Для определения величины максимальной возможной погрешности при переоценке КМК был проведен расчёт средней погрешности КМК и погрешности маршрутов, обладающих максимальной точностью в результате перерасчета, по следующим формулам:

$$\bar{Q}_{КМК} = \frac{\bar{P}_{факт}}{P_{КМК}^{min}} \cdot 90 - 100 \quad (3)$$

где $\bar{P}_{факт}$ – средняя фактическая (текущая) точность КМК;

$P_{КМК}^{min}$ – минимальная гарантированная точность КМК.

$$Q_{маршр}^{max} = \frac{P_{факт}}{P_{КМК}^{min}} \cdot 90 - 100 \quad (4)$$

где $P_{факт}$ – средняя фактическая (текущая) точность КМК.

Поскольку модельный эксперимент показал, что минимальная допустимая точность КМК, с учетом переоценки, для осуществления КУТП равна 60%, то было решено рассчитать указанные выше погрешности именно для этой минимальной точности КМК (таблица 1).

Таблица 1 – Максимальная погрешность перерасчетных маршрутов движения ТС, примененных в экспериментах

Параметр	$P_{КМК}^{min}$	$\bar{P}_{факт}$	$P_{маршр}^{max}$	$Q_{маршр}^{max}$
Значение	60%	73,5%	86,6%	30,05%

Согласно полученным результатам, для осуществления эффективного КУТП переоценка маршрутов движения ТП не должна превышать 30% ($Q_{\text{КМК}} \leq 30\%$), согласно этому условию был определен диапазон допустимых значений фактической точности КМК, при которых погрешность маршрутов перерасчетной КМК не превысит 30%. Кроме того, фактическая точность КМК ($P_{\text{факт}}$) не может быть больше абсолютной точности (100%), не может быть отрицательным числом и должна быть больше, чем расчетная минимальная гарантированная точность КМК ($P_{\text{КМК}}^{\text{min}}$). Также необходимо было учесть, что при построении неполной КМК данному условию соответствует значение минимальной точности КМК, равной 69%, а при условии построения полной КМК – 65%. Таким образом, для решения поставленной задачи было необходимо решить следующую систему неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{КМК}}^{\text{min}}} \cdot 90\% - 100\% \leq 30\%; \\ 0 \leq P_{\text{факт}} \leq 100\%; \\ P_{\text{факт}} \geq P_{\text{КМК}}^{\text{min}}; \\ \frac{P_{\text{факт}}^{\text{max}} - P_{\text{КМК}}^{\text{min}}}{2} \leq \bar{P}_{\text{факт}}, \text{ при } P_{\text{КМК}}^{\text{min}} < 65; \\ \bar{P}_{\text{факт}} \leq 100, \text{ при } P_{\text{КМК}}^{\text{min}} \geq 65. \end{array} \right. \quad (5)$$

Поскольку при минимальной расчетной точности КМК, меньшей 65% начинает увеличиваться вероятность разработки неэффективных вариантов КУТП и, принимая во внимание результаты модельных экспериментов, было внесено последнее условие: допускается к рассмотрению КМК, точность которых составляет не менее 60% ($P_{\text{расч}}^{\text{min}} \geq 60\%$). Кроме того, вероятность того, что средняя фактическая точность маршрутов будет удовлетворять предъявленным требованиям при минимальной точности маршрутов менее 60% достаточно мала, то решение системы неравенств (итоговая область допустимых значений средней фактической точности маршрутов полной КМК) будет выглядеть так, как показано на рисунке 10. Данную область можно разделить на три характерных участка:

– зона I ($69\% \leq P_{\text{КМК}}^{\text{min}} \leq 100\%$). Соответствует области допустимых значений средней фактической точности маршрутов при условии построения неполной КМК;

– зона II ($60\% \leq P_{\text{КМК}}^{\text{min}} \leq 100\%$). Соответствует области допустимых значений средней фактической точности маршрутов при условии построения полной КМК.

– зона III ($60\% \leq P_{\text{КМК}}^{\text{min}} \leq 65\%$). Соответствует области допустимых значений средней фактической точности маршрутов, при которой

По построенным графикам можно определить наиболее оптимальное сочетание точности ИБ, их количества и их способа расстановки их на УДС. При этом фактическая точность ИБ разделяет график на две части:

– верхняя часть: включает в себя область, которая расположена выше линии фактической точности ИБ. Находящиеся в данной области графика варианты расстановки ИБ недопустимы;

– нижняя часть: включает в себя оставшуюся область графика, включая линию фактической точности ИБ. Находящиеся в данной области графика варианты расстановки являются допустимыми.

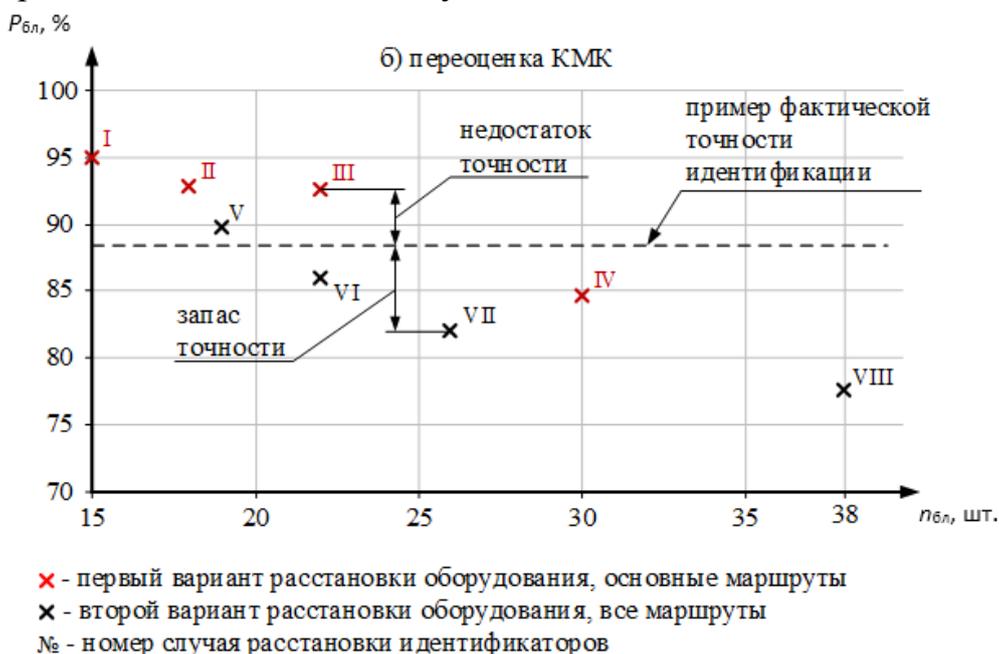


Рисунок 11 – График зависимости точности ИБ от их количества и способа расстановки на УДС при недооценке КМК

В - пятых, на основе всех полученных результатов, была сформирована методика построения КМК, алгоритм которой представлен на рисунке 13. Данная методика рассматривает все возможные случаи, которые могут возникнуть во время процесса построения матриц на реальных участках УДС. Также с помощью методики возможно проведение аудита и модернизации системы сбора данных для построения КМК с необходимой для решения поставленных задач УТП точностью. Кроме того, методика учитывает практические рекомендации, сформированные в рамках диссертационного исследования.

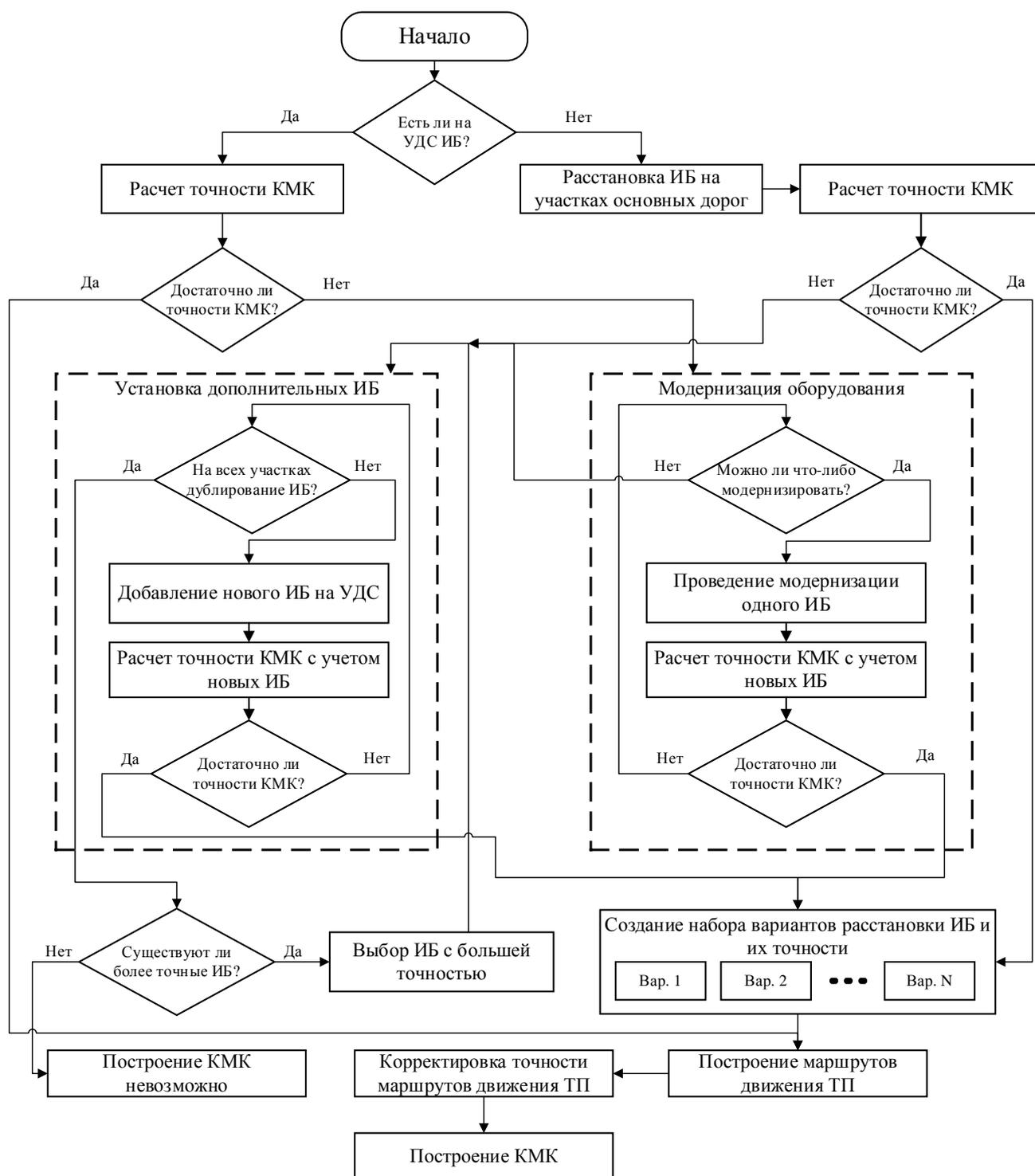


Рисунок 13 – Алгоритм построения качественных матриц корреспонденции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования были достигнуты все поставленные задачи и основная цель, в том числе:

1) проведено исследование зависимости эффективности систем косвенного управления транспортными потоками от точности качественных матриц корреспонденции, в результате которого определена зависимость эффективности косвенного управления транспортными потоками от величины ошибки I рода качественных матриц корреспонденции, при которой фактическое перераспределение части транспортного потока, превышает расчетное количество и от величины ошибки II рода качественных матриц корреспонденции, при которой фактическое перераспределение части транспортного потока, меньше расчетного количества.

2) определена минимально допустимая точность качественных матриц корреспонденции для эффективного функционирования систем косвенного управления транспортными потоками, которая составляет:

– 90% без применения перерасчета качественных матриц корреспонденции;

– 69% с применением перерасчета качественных матриц корреспонденции при условии построения неполной качественной матрицы корреспонденции;

– 60% с применением перерасчета качественных матриц корреспонденции при условии построения полной качественной матрицы корреспонденции;

3) разработан принцип перерасчета качественных матриц корреспонденции, позволяющий снизить требования к их минимальной точности, исключить возможность влияния ошибки I рода и понизить требования к точности качественных матриц корреспонденции:

– на 21% при условии построения неполной качественной матрицы корреспонденции;

– на 30% при условии построения полной качественной матрицы корреспонденции;

4) выведена зависимость точности качественных матриц корреспонденции от точности используемого оборудования и его расположения на сети дорог;

5) разработана методика построения качественных матриц корреспонденции, применение которой возможно на любой конфигурации дорожной сети при различных уровнях внедрения элементов интеллектуальных транспортных систем (дорожной инфраструктуры).

Также на основании полученных результатов диссертационного исследования сформированы:

1) практические рекомендации по применению разработанной математической модели расчета точности качественных матриц корреспонденции в зависимости от точности используемого оборудования и его расстановки на УДС;

2) практические рекомендации по применению по применению идентификационного оборудования и его расстановки на УДС;

3) практические рекомендации по внесению изменений в ГОСТ Р 56351 «Интеллектуальные транспортные системы. Косвенное управление транспортными потоками. Требования к технологии информирования участников дорожного движения посредством динамических информационных табло» и ОДМ 218.9.011 «Рекомендации по выполнению обоснования интеллектуальных транспортных систем».

Дальнейшее развитие темы качественных матриц корреспонденций целесообразно проводить в области определения коэффициентов, влияющих на точность систем распознавания государственных регистрационных знаков, разработки принципов корректировки точности качественных матриц корреспонденций на основе статистических данных, формирования облика качественных матриц корреспонденций как базы данных, разработки средств управления базами данных для работы с данными качественных матриц корреспонденций. Кроме того, целесообразно провести исследования, направленные на изучение достоверности алгоритмов распределения транспортных потоков по дорожной сети различных средств имитационного моделирования, что позволит уточнить минимальные требования к количеству и качеству оборудования и его размещения по сети дорог.

Стоит отметить, что для большинства дальнейших задач необходимо создание пилотного проекта на реальном участке УДС.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Основные результаты исследования опубликованы в следующих печатных изданиях:

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Морозов, Д.Ю. Проектирование систем косвенного управления транспортными потоками на основе качественных матриц корреспонденции / Д. Ю. Морозов // Вестник МАДИ. - 2012. - № 4(31). - С.62-65.

2. Морозов, Д.Ю. Проектирование интеллектуальных транспортных систем [Электронный ресурс] / Д.Ю. Морозов, Р.Ф. Халилев // Науковедение. - 2014. - №4(23). - С.51. - Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_22675647_12490823.pdf.

3. Морозов, Д.Ю. Разработка инструмента оценки точности качественных матриц корреспонденций для систем косвенного управления транспортными потоками / Д.Ю. Морозов, С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2017. - №4(51). - С.23-32.

4. Морозов, Д.Ю. Роль качественных матриц корреспонденций в перспективных интеллектуальных транспортных системах / Д.Ю. Морозов // Мир транспорта и технологических машин. - 2019. - №4 (67). - С. 82-87.

В изданиях включенных в перечень научных изданий SCOPUS:

5. Morozov, D.Yu. Efficiency of Operation and Functioning of the System of an Indirect Transport Flow Regulation and Control / D.Yu. Morozov, S.V. Zhankaziev, A.N. Novikov, A.I. Vorobyev, A.V. Kulev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - vol.12, №13. - pp. 3645-3652.

6. Morozov, D. Definition of Accuracy of Qualitative Correspondence Matrixes for Indirect Traffic Flow Control and Regulation / D. Morozov, S. Zhankaziev, A. Novikov, A. Vorobyev, A. Kulev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2017. - vol.12, №13. - pp. 3653-3658.

7. Morozov, D. Scientific and methodological approaches to the development of a feasibility study for intelligent transportation systems / Morozov D., Zhankaziev, S., Gavrilyuk, M., Zabudsky, A. // Transportation Research Procedia. - 2018. - vol.36. - pp. 841-847.

В других изданиях:

8. Морозов, Д.Ю. Исследование зависимости точности качественных матриц корреспонденции от точности оборудования и его размещения на дорожной сети / Д.Ю. Морозов, С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев // Транспорт Российской Федерации. - 2015. - № S. - С.44-47.

9. Морозов, Д.Ю. Тенденции развития автономных интеллектуальных транспортных систем в России / Д.Ю. Морозов, С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев // Транспорт Российской Федерации. - 2016. - №5. - С. 26-28.

10. Морозов, Д.Ю. Определение величины минимальной допустимой точности качественных матриц корреспонденций с помощью имитационного моделирования. / Д.Ю. Морозов, С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев // Транспорт Российской Федерации. - 2016. - № 2-3(63-64). - С. 54-58.

11. Морозов, Д.Ю. Опыт разработки кооперативных и автономных транспортных систем в российской федерации. / Д.Ю. Морозов, С.В. Жанказиев, А.Ю. Забудский // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016. Материалы Международной научно-практической конференции. - 2016. - С 63-67.