

На правах рукописи

НЕКРАСОВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ И  
РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НА  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕВОЗКИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре технического сервиса машин и оборудования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Научный руководитель **Апатенко Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технического сервиса технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Юхин Иван Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

**Сметнев Андрей Степанович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического развития систем жизнеобеспечения сельских территорий ФГБОУ ВО «Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина».

Защита состоится 27 февраля 2025 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета \_\_\_\_\_

Н.Н. Пуляев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

Согласно национальному докладу о ходе и результатах реализации в 2023 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия сельхозпроизводство выросло на 10,2%. В 2023 г. валовой сбор овощей открытого грунта вырос, на 4,5 %, плодовых и ягодных культуры на 1,5 %. Поэтому вопросы повышения производительности труда и снижения повреждений продукции АПК на транспорте приобретают все большее значение.

Одной из наиболее существенных и сложных задач при транспортировке сельскохозяйственной продукции является сохранение ее качества и снижение потерь, в которой весомая роль отводится автомобильному транспорту, как важнейшему звену в системе функционирования АПК России. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. Новая стратегия нацелена устранить недостатки транспортной сети, связать все регионы России стабильными, надёжными транспортными путями, организовать эффективную и быструю перевозку грузов.

Сегодня для предприятий АПК с большим парком транспортно-технологических машин существующие методы планирования перевозок нуждаются в новых решениях. Такие современные подходы, как гибридные методы реализации транспортных задач, обеспечение высококачественной информационной поддержки, методы и модели сетевого планирования на практике оказываются малоприменимыми.

Организация транспортировки сельскохозяйственной продукции сопряжена с рядом особенностей связанных с изменением своих свойств и качеств под действиями погодных условий и колебаний во время транспортировки. В реальных условиях эксплуатации парка машин вероятность появления неисправности деталей, узлов и агрегатов не регламентирована и происходит в результате внезапных отказов.

В связи с этим, решение вопросов, направленных на формирование системы транспортно-технологического взаимодействия в АПК, является актуальной темой научного исследования.

### **Степень разработанности.**

Большой вклад в исследование процессов перевозки сельскохозяйственной продукции, оптимизации формирования парка машин и их надежности внесли ученые: И.А. Юхин, А.С. Сметнев, А.Л. Севостьянов А.Ю. Измайлов, С.И. Головин, В.И. Кузнецов, А.А. Раюшкина, А.Г. Левшин, О.Н. Дидманидзе, А.С. Дорохов, В.А. Евграфов, М.Н. Ерохин, А.С. Апатенко, Л.Б. Миротин, В.А. Житков, В.М. Курганов, В.И. Рассоха, А.Н. Скороходов, А.А. Зангиев, Е.Ф. Шульга, Н.С. Севрюгина, Н.В. Алдошин и другие.

В их работах рассмотрены ключевые подходы организации транспортного обслуживания предприятий АПК при перевозке сельскохозяйственной продукции.

**Целью исследования** является установление влияния показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин на эффективность процесса перевозки сельскохозяйственной продукции.

**Задачи исследования.**

Для достижения цели работы сформированы следующие задачи:

1. Провести анализ системы транспортного обеспечения сельскохозяйственного производства и определить транспортно-технологические показатели процесса перевозки сельскохозяйственной продукции, влияющие на качество и стоимость.

2. Исследовать существующие методы и модели организации перевозок и обосновать необходимость совершенствования процесса перевозки с учетом специфики транспортируемой продукции и показателей надежности транспортных машин.

3. Описать логическую структуру процесса перевозки сельскохозяйственной продукции, с учетом показателей надежности транспортных машин.

4. Выбрать среду и средства моделирования, разработать рабочую версию и осуществить ее настройку с последующей оценкой адекватности и точности.

5. Провести сбор и обработку статистической информации транспортных машин при перевозке сельскохозяйственной продукции, в том числе показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин в условиях реальной эксплуатации.

6. Разработать и апробировать методику по определению оптимальных параметров процесса перевозки сельскохозяйственной продукции с учетом показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

7. Оценить экономическую эффективность внедрения результатов научного исследования.

**Объектом исследования** являются транспортные машины, осуществляющие процесс перевозки сельскохозяйственной продукции.

**Предметом исследования** являются показатели безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

**Научная новизна.** Заключается в разработке имитационной модели по определению оптимальных параметров перевозки сельскохозяйственной продукции с учетом показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Разработанный алгоритм и программное обеспечение для системы поддержки принятия решений по управлению предприятием позволяют уменьшить влияние внезапных отказов и сократить время простоя транспортных

машин. Статистические данные, полученные в ходе имитационного моделирования на основе созданной методики, обеспечивают проведение комплексного анализа текущего состояния системы, поиск решения для достижения оптимальных показателей за счёт структурной и параметрической конфигурации процесса перевозки сельскохозяйственной продукции.

Практическая ценность результатов научных исследований подтверждается внедрением разработанных программных модулей системы «Сапфир» в условиях транспортной компании «Технология Движения».

Результаты работы актуальны для АПК при выборе оптимального варианта эксплуатации имеющегося парка машин, прогнозировании продолжительности и стоимости перевозок, работ по техническому обслуживанию и ремонту.

#### **Методология и методы исследования.**

Теоретической и методологической основой выполненных исследований послужили труды ученых в области организации машинно-использования, решающие задачи повышения эффективности эксплуатации транспортных машин, в том числе и в сельском хозяйстве. Применены методические подходы, основанные на принципах исследования особенностей производственных процессов, как сложной многокомпонентной технологической системы. Положения, выводы и результаты экспериментов диссертационной работы получены с применением следующих инструментов: теория графов, методы определения распределений выходных характеристик, теория вероятностей, методы имитационного моделирования. Разработанные модели и методы прошли проверку через программную симуляцию имитационных экспериментов на моделях. Эмпирической базой исследования стали официальные данные ТК «Технология Движения».

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Структура имитационной модели и результаты имитационного моделирования процесса перевозки сельскохозяйственной продукции в зависимости от специфики перевозимой продукции и показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

2. Методика по определению оптимальных параметров процесса перевозки сельскохозяйственной продукции с учетом показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

3. Результаты оценки экономической эффективности использования имитационного моделирования в процессе планирования и распределения транспортных машин в условиях реальной организации.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Исследования проводились с использованием стандартных методик в соответствии с разработанной программой экспериментальных исследований. Достоверность результатов имитационного моделирования обеспечивается качеством настройки модели, что в достаточной мере подтверждается в процессе калибровки. Полученные экспериментальные данные расширяют и дополняют

технологии изучения сложных стохастических систем и позволяют оценить эффективность производственных процессов.

Диссертационное исследование выполнялась в рамках программы «Студенческий-стартап 2022» при поддержке Фонда Содействия Инновациям.

По результатам проведенных исследований разработан программно-аппаратный комплекс информационной системы «Сапфир», а также ряд вспомогательных программных модулей, что подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ: №2024610468 «Сапфир-1.1: Программно-аналитический комплекс организации взаимодействия между подвижным составом автомобильного транспорта и складами»; №2024610603 «Сапфир-1.0: Программно-вычислительный комплекс моделирования транспортно-технологических систем»; № 2024665968 «Сапфир 1.2 Программно-вычислительный комплекс загрузки транспортных средств».

#### **Апробация работы.**

Основные результаты научной работы обсуждались и получили положительную оценку в профессиональной среде на семинарах, круглых столах и научно-практических конференциях: Digital technologies in agriculture of the Russian Federation and the world community, Stavropol, 27–30 сентября 2021 года; Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова, Москва, 06–08 июня 2022 года.; Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях, Саратов, 27–28 апреля 2022 года; 26-я Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы», Москва, 12–13 мая 2022 года; чтения академика В.Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года; Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы, Москва, 26–27 апреля 2023 года; Транспортные и транспортно-технологические системы, Тюмень, 13–14 апреля 2023 года; 11-ая Международная молодежная научная конференция, Курск, 18–19 апреля 2024 года; 28-я Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 26 апреля 2024 года; Всероссийский студенческий научный семинар «Инновационные технологии беспилотного авиационного и высокоавтоматизированные транспортные средства для АПК», Москва, 24 сентября 2024; Научно-практической конференции, посвященной 90-летию Шарова Н.М., Москва, 23-24 октября; Международная научная конференция «АГРОНОМИЯ – 2024» (AgriScience2024) 19-20 ноября 2024 г., так же представлены на отраслевой выставке Российская агропромышленная выставка: «Золотая осень–2024», г. Москва, 8–12 октября 2024 г. – золотая медаль «За разработку программно-вычислительного комплекса Сапфир».

### **Публикации результатов исследований.**

Основные положения и результаты диссертационного исследования изложены в 17 научных публикациях, из которых 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статья в изданиях, входящих в международные базы научного цитирования Scopus, получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, список используемых литературных источников из 100 наименования. Работа содержит 139 страниц машинописного текста, поясняется 58 рисунками и 10 таблицами

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформированы цель, задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования»** выполнен анализ текущего состояния системы транспортного обеспечения сельскохозяйственного производства, обоснованы цель, актуальность проблемы и задачи исследования. По данным ФАО, что уровень потерь овощей и фруктов в мире на стадии транспортировки составляет от 3% до 18%. В России более 15–20% плодоовощной продукции не доходит до потребителя из-за низкого качества перевозки. При этом низок качественный уровень использования транспортных средств при перевозке. До 50% времени пребывания транспортных средств в пути составляют простои в пунктах погрузки и разгрузки, что также отрицательно сказывается на сохранности плодоовощной продукции. Ежегодные убытки от потерь составляют около 8 млрд рублей, а транспортные издержки достигают 30–40% от себестоимости перевозимой сельскохозяйственной продукции. Кроме этого, ключевым условием сохранности продукции является соблюдение режимов перевозки и хранения овощей и фруктов согласно СанПиН No 2.3.6.3668-20. Скоропортящиеся продукты (картофель, лук, чеснок, корнеплоды, яблоки, груши, цитрусовые, зелень, упакованная в контейнеры) с целью минимизации затрат на транспортировку часто перевозят в открытых грузовиках без холодильных систем, что приводит к механическим повреждениям и порче продукции. Применение рефрижераторов и соблюдение скоростного режима водителем помогают защитить продукцию от порчи и повреждений. Упаковка для перевозки овощей должна защищать плоды от трения и ударов и изготавливаться из экологичного материала. Овощи и фрукты, выделяющие этилен, должны транспортироваться и храниться отдельно с продукцией, подверженной вредному воздействию. В целях экономической целесообразности несовместимую продукцию часто транспортируют в одном рефрижераторе,

размещая ее в противоположных частях кузова, увеличивая срок совместного хранения до двух суток.

Производство овощей в России в промышленном секторе в 2023 году составило 7,2 млн тонн, при этом большая часть продукции произведена в условиях открытого грунта (5,5 млн тонн). По данным Росстата, в России ежегодно самые большие объемы производства приходятся на репчатый лук (113,0 тыс. тонн), капусту (101,0 тыс. тонн), морковь (39,3 тыс. тонн), столовую свеклу (22,5 тыс. тонн). В условиях открытого грунта лидируют по объемам выращенной продукции огурцы (870,5 тыс. тонн) и томаты (724,1 тыс. тонн).

В ходе анализа показателей, влияющих на качество и себестоимость перевозки сельскохозяйственной продукции выявлено, что помимо условия транспортирования, а именно сезонности, режимов и сроков перевозки с/х продукции, являются показателями безотказности и ремонтпригодности транспортных машин (вероятность безотказной работы транспортной машины, пробег транспортной машины до отказа, время устранения отказа транспортной машины)

Во второй главе «Теоретические исследования в области перевозки сельскохозяйственной продукции» рассмотрены существующие методы и модели по управлению процессом перевозки сельскохозяйственной продукции, определены их основные особенности и показатели, влияющие на качество и себестоимость процесса.

В агропромышленном комплексе значительная часть перевозимых грузов имеет специфические требования к транспортировке, преимущественно составляющих часть процесса подготовки, производства или распределения сельскохозяйственной продукции, ее переработки и сбыта.

Для разработки эффективной системы распределения ресурсов в аграрном секторе выделены функциональные процессы и их отдельные этапы в составе структуры. Графическая модель технологического процесса перевозки сельскохозяйственной продукции представлена на рисунке 1.

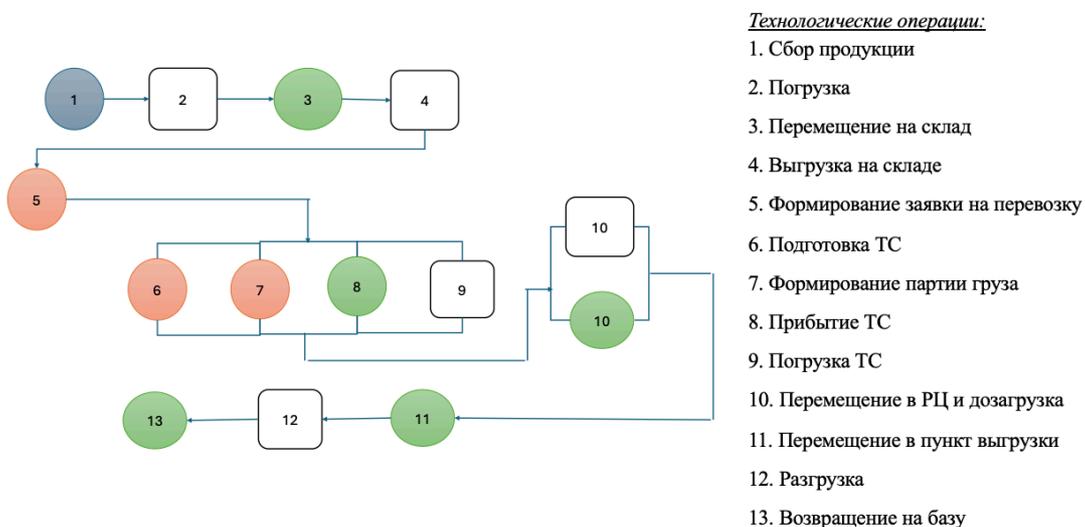


Рисунок 1 – Графическая модель технологического процесса перевозки сельскохозяйственной продукции

Задачи рационального распределения технологического процесса перевозки грузов сельскохозяйственной продукции предполагают создание системы оценки эффективности использования транспортных машин в заданных условиях. В свою очередь она формируется под влиянием группы факторов, которые определяют состав и структуру автопарка, а также систему управления. Данные характеристики зависят от объёма грузооборота и ресурсов, используемых в работе.

В настоящее время многие российские предприятия, адаптируя зарубежный опыт, внедряют в свою производственно-хозяйственную деятельность различные подходы к управлению материально-техническим обеспечением на базе систем MRP, MRPII, ERP, DRP и др.

Одной из наиболее эффективных систем, существующих в данное время, являются системы типа «точно в срок» («just-in-time», ЛТ-система). Данная система характеризуется точными сроками перевозки и производственной мощностью предприятия. Степень достижения основной цели ЛТ-системы зависит от того, насколько достигнуты цели вспомогательные, такие как: исключение сбоев и нарушений в процессе производства; гибкость и адаптивность самой системы; сокращение производственных сроков и времени подготовки к процессу; сведение к минимуму материальных запасов; устранение необоснованных затрат.

Поэтому в рамках проведённого исследования разработка модели будет выполнена и настроена в соответствии особенностями ЛТ-системы.

Работа технической системы характеризуется ее эффективностью, под которой понимается совокупность свойств, определяющих способность системы успешно выполнять определенные задачи, в рамках диссертационного исследования это выбор оптимальных показателей при перевозке сельскохозяйственной продукции.

В разработанной модели находится  $N$ -ое количество транспортных машин, тогда одним из критериев надежности транспортной системы является вероятность безотказной работы, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале или в пределах рассмотренного пробега не произойдет ни одного отказа:

$$P(t) = \frac{N-n(t)}{N}, \quad (1)$$

где  $N$  – общее число машин;  $n(t)$  – число отказавших машин во время эксплуатации;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы машины.

Функция  $p(t)$  обладает такими свойствами:

$$0 \leq p(t) \leq 1; p(0) = 1; p(\infty) = 0, \quad (2)$$

Чем больше  $p(t)$ , тем выше надежность транспортных машин.

Поддержание высокой вероятности безотказной работы транспортных машин за счет оптимизации показателей надежности машин обеспечивает требуемые сроки и качество перевозки сельскохозяйственной продукции.

В третьей главе «Разработка имитационной модели процесса перевозки сельскохозяйственной продукции» установлено, что для максимальной эффективности управления транспортно-технологическим процессом перевозки сельскохозяйственной продукции необходимо интегрировать в конструкцию контрольно-информационную систему, а также установить логику построения алгоритма передачи и приема информации в типовом формате, с учетом правил построения архитектуры блок-схем, представленных на рисунке 2.

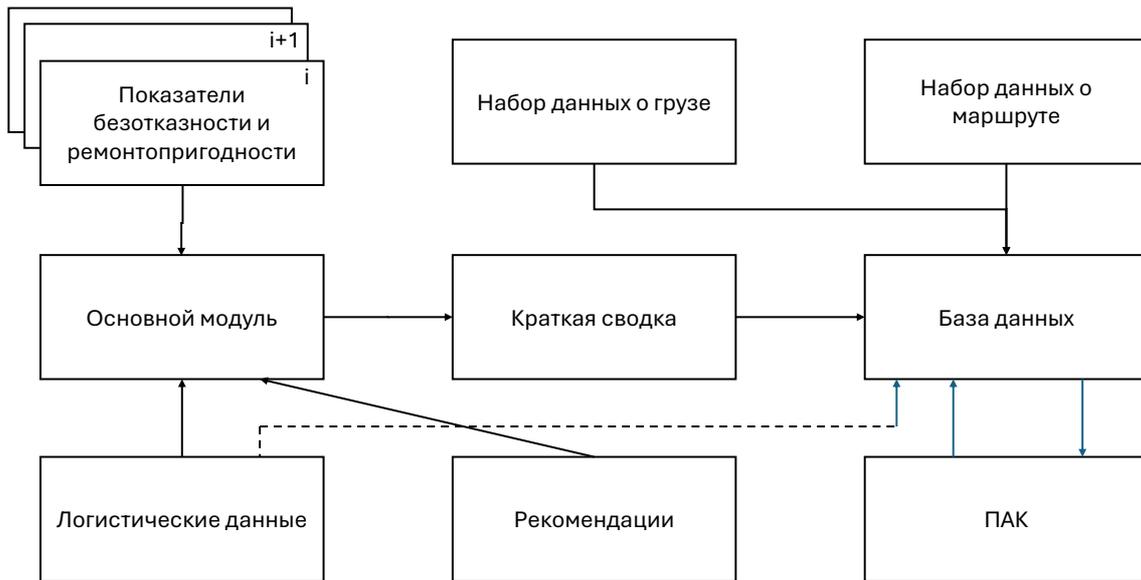


Рисунок 2 – Блок-схемы технологии сбора и передачи параметров ТМ

В ходе анализа показателей, влияющих на качество и себестоимость транспортировки сельскохозяйственной продукции, выявлено, что, помимо условия транспортирования, необходимо учитывать показатели безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

В соответствии с классическими этапами системных исследований для определения особенностей функционирования технологической системы необходимо определить ее структуру. Поставленная задача решается при помощи технологий функционального моделирования. Применение выбранной технологии функционального моделирования состоит из нескольких последовательных этапов. Первым этапом выполняется определение контекстной диаграммы, представляющей из себя аналог «черного ящика» с тремя направлениями для входа и выходом справа (результатом) рисунок 3. В горизонтальном направлении отображаются объекты, описывающие материальные потоки, которые принято обобщать термином «вход». В направлении «снизу-вверх» задаются объекты, необходимые для достижения «результата» в рамках поставленной перед системой задачи при помощи ресурсов, заданных на «входе». По последнему направлению указываются объекты, оказывающие управляющее воздействие на изучаемую систему, передавая тем самым особенности структуры изучаемой системы и ограничений, заложенных условиями функционирования.



Рисунок 4 – Контекстная диаграмма перевозки сельскохозяйственной продукции

Для решения данной задачи необходимо проводить контроль (мониторинг) выбранных показателей постоянно (онлайн) в режиме реального времени для чего предлагается дооснастить транспортное средство (автомобиль) следующим оборудованием: для фиксирования условий перевозки в конструкцию транспортного средства устанавливаются термодатчики и датчики влажности, камеры фиксирования положения груза, а также подключится к стандартным (датчик уровня топлива, загрузки транспортного средства, скорости и др.) через блок телематики, который будет получать и обрабатывать данные и отправлять информацию на компьютер оператора, пример работы системы представлен на рисунке 4.

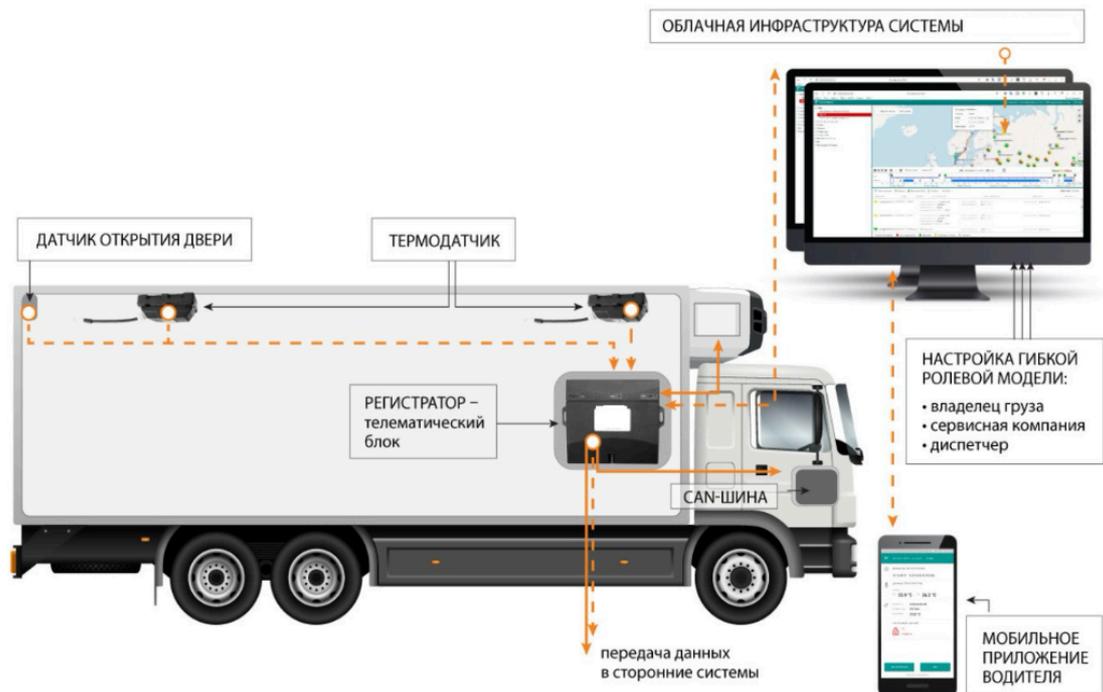


Рисунок 4 – Архитектура программно-аппаратного комплекса

Для определения оптимальных параметров процесса перевозки сельскохозяйственной продукции построена и исследована модель в среде имитационного моделирования AnyLogic. Применение метода имитационного моделирования позволяет получить решение при изменении входных параметров, а также предоставляет детальный анализ динамики системы, учитывая изменения в подсистемах и параметрах внешней среды, отслеживает все логические условия и нелинейность процессов. Структура модели представлена на рисунке 5, она состоит из нескольких взаимосвязанных блоков, которые описывают поведение транспортных машин при выполнении процесса перевозки сельскохозяйственной продукции.

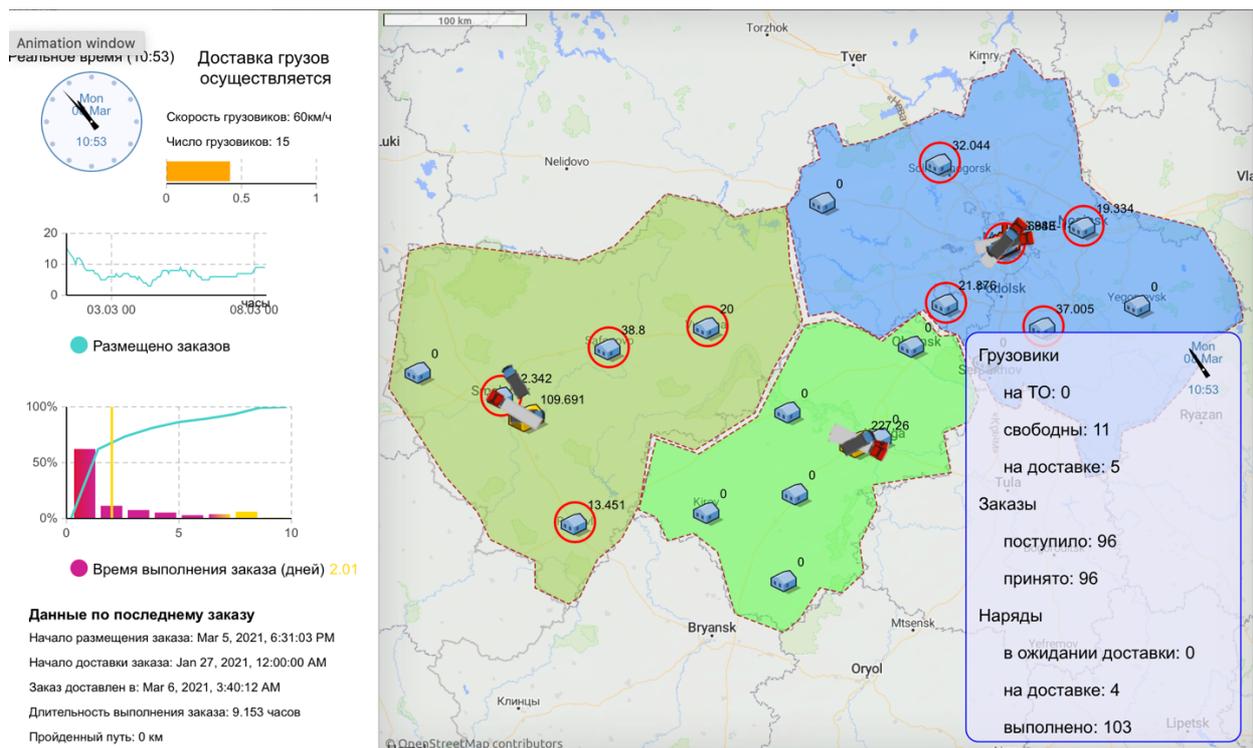


Рисунок 5 – Структура имитационной модели

Реализация данного решения осуществляется на основании рационального управления транспортными ресурсами при перевозках продукции АПК. В имитационную модель с помощью базы данных задаются координаты предприятий и складов, маршруты перевозок формируется по реальным заявкам маршрутизации, условия транспортирования, а именно сезонность, температурный режим задаются, согласно нормам СанПиН № 2.3.6.3668-20, отдельной группой вводимых данных являются технические паспорта транспортных средств (тип кузова, марка, уровень загрузки, эксплуатационные показатели, пробег до отказа, время устранения отказа транспортных машин).

С целью повышения эффективности организации транспортных процессов при перевозках сельскохозяйственной продукции в рамках работы предлагается внедрить алгоритм текущей модели конфигуратора загрузки транспортных машин. С помощью данного инструмента можно более точно определить объем, массу и количество груза для оптимального заполнения, обеспечивая при этом отсутствие превышения грузоподъемности транспортных машин. Далее

выбирается наиболее подходящий способ транспортировки и предоставляются оптимальные варианты по загрузке, избегая перегрузки и оперативно предоставляя точные сведения о состоянии груза (влажность, температуру в кузове) и его текущем местоположении.

В целом, программирование блоков модели сводится к математическому описанию рабочих циклов транспортных машин с привязкой к системному времени моделируемого процесса с учетом основных параметров представлены на рисунке 6.

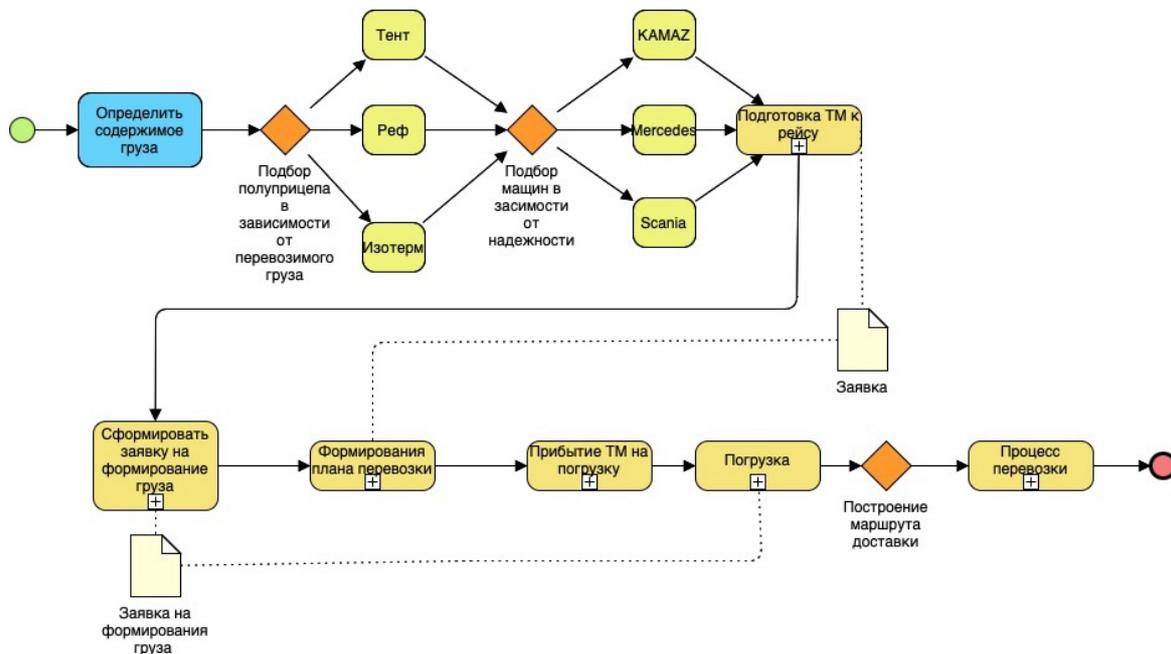


Рисунок 6 – Алгоритм действия разработанной модели процесса перевозки сельскохозяйственной продукции

Функциональное описание агента машина описывается математически и в общем виде выглядит следующим образом:

$$A_{\text{машина}} = f_i(T_i, t_{\text{без}}, t_{\text{отк.}}, K_{\text{сез.}}, \tau_i, N_{\text{куз}}, N_{\text{груз}}, t_{\text{то}}, Q_i), \quad (3)$$

где,  $T_i$  – время выполнения перевозки, ч;  $t_{\text{без}}$  – время безотказной работы транспортного средства во время перевозки, ч;  $t_{\text{отк.}}$  – время устранения отказа в рейсе, ч;  $K_{\text{сез.}}$  – коэффициент сезонности;  $\tau_i$  – температурный режим внутри кузова, °С;  $N_{\text{куз}}$  – тип кузова;  $N_{\text{груз}}$  – тип груза;  $t_{\text{то}}$  – время на техническое обслуживание, ч;  $Q_i$  – средний расход топлива, на 100 км, л.

Для их нахождения в условиях рассматриваемого транспортно-технологического процесса стоит воспользоваться следующей формулой:

$$N_{\text{ком}} = N_{\text{ТС}} * N_{\text{ПС}} * (N_{\text{ТС}} - 1) \quad (4)$$

где  $N_{\text{ком}}$  – количество возможных уникальных сочетаний, ед.;  $N_{\text{ТС}}$  – количество транспортных машин, ед.;  $N_{\text{ПС}}$  – количество погрузчиков, ед.

Для этого рассчитывается время моделирования всех комбинаций и определяются необходимые затраты времени на реализацию расчета:

$$T_{\text{mod}} = N_{\text{ком}} * ((t_{\text{пр}} * n_{\text{prog}}) * t_{\text{обм}} + t_{\text{start}}) \quad (5)$$

где  $T_{mod}$  – время на моделирование, с;  $(t_{пр} * n_{прог})$  – время моделирования эксперимента, с;  $n_{прог}$  – количество прогонов эксперимента, ед.;  $t_{обм}$  – общее время на загрузку данных в модель, с;  $t_{start}$  – потери времени на повторный запуск, с.

В связи с этим принято решение о выполнении серии прогонов одного эксперимента с целью достижения оптимальных для исследования значений параметров методом Монте-Карло.

В четвертой главе «Методика сбора статистических данных и проведения, результаты экспериментальных исследований» установлены основные методические и организационные положения по сбору и обработке статистических данных, полученных во время эксплуатации транспортных средств при перевозке сельскохозяйственной продукции. Разработана программа и методика выполнения экспериментальных исследований.

В реальных условиях эксплуатации выход из строя транспортных машин происходит, как правило в результате возникновения внезапных отказов. Одним из ключевых показателей надежности работы машин являются, время безотказной работы и трудоемкость устранения отказа, которые отражают эффективность работы машин в течение определенного периода. В результате проводимых исследований, под наблюдение находились 306 грузовых автомобилей транспортной компании «Технология движения», из них 118 ед. КАМАЗ (5490, 4389 F1, М 1840, М 1945, Т 2640), 64 ед. SCANIA (G400, R400, R440), 121 ед. MERSEDES-BENZ ACROSS (1836, 1841LS, 1844LS, 1845LS, 1846LS, 1848LS, 1853LS, 1840L). Средний пробег машин за исследуемый период составил около 700 тыс. км на каждый автомобиль. Для оценки влияния показателей безотказности и ремонтпригодности на эффективность работы парка машины собраны и систематизированы статистические данные о распределении отказов по узлам и пробегу (рисунок 7 и 8).

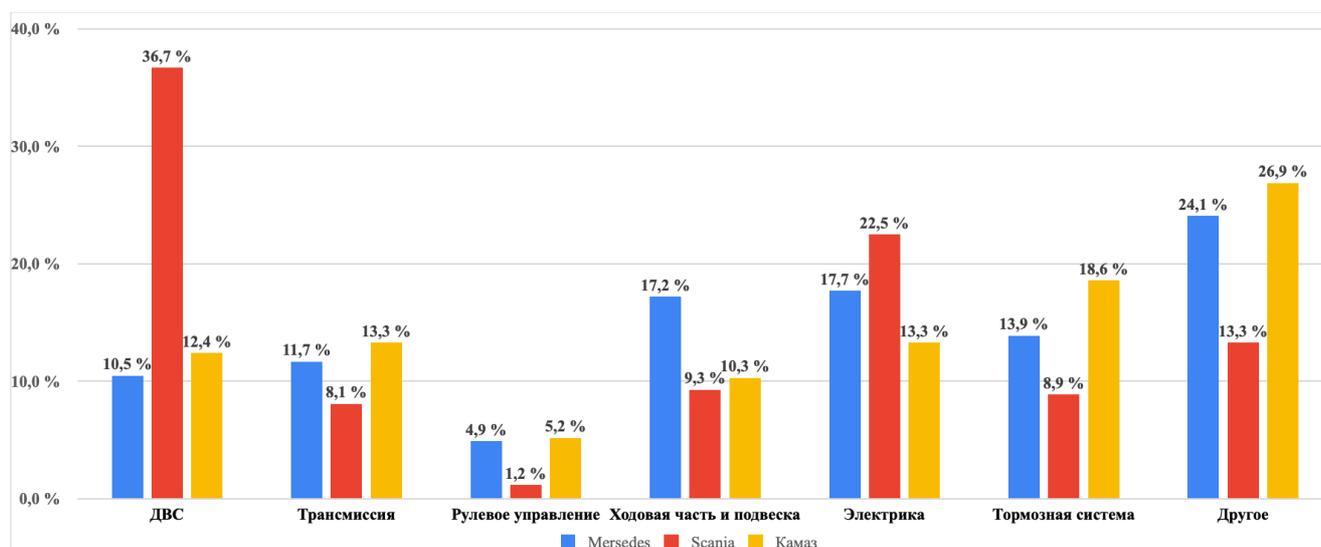


Рисунок 7– Сравнительная гистограмма распределения отказов по узлам транспортных машин

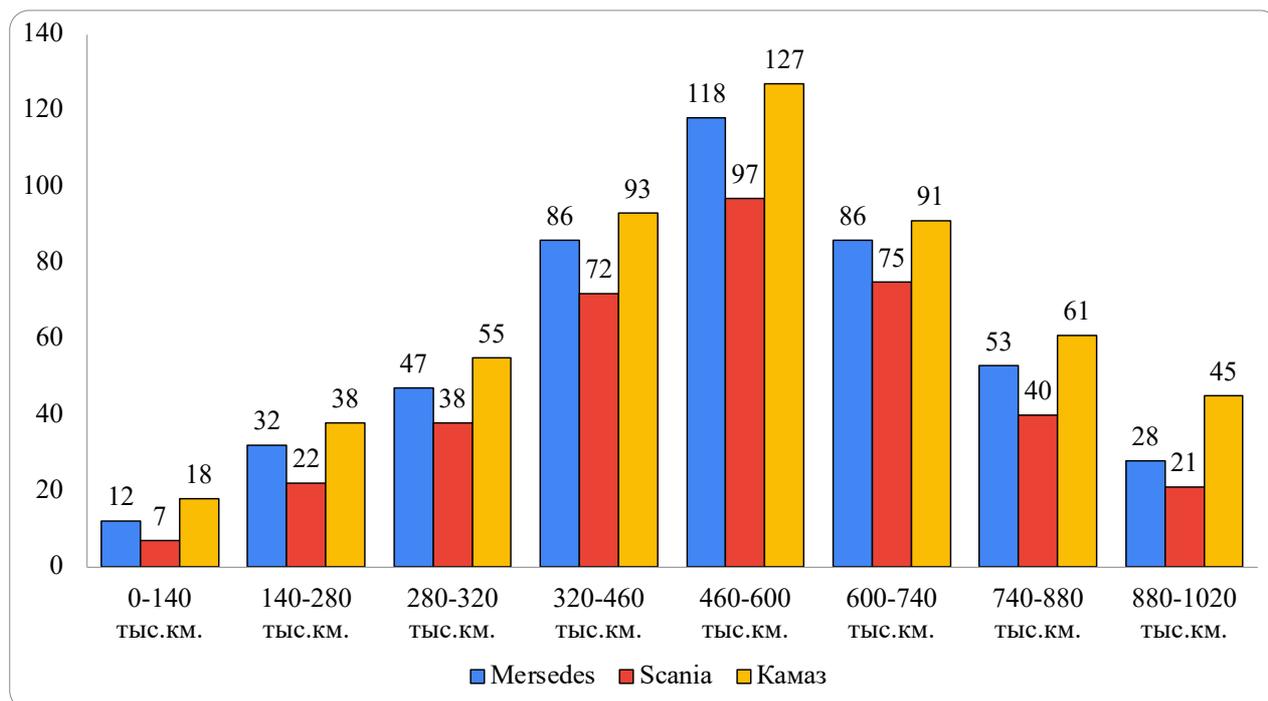


Рисунок 8– Распределение отказов транспортных машин в зависимости от пробега

Исследования отказов относительно пробега показало следующую зависимость, что пиковое количества отказов у рассмотренных машин приходится на пробег 460–600 тыс. км., при этом наиболее частыми отказами машин: у SCANIA являются неисправности в двигателе (36,4%), электрооборудования (21,8%), трансмиссии (8,6%); у КАМАЗ тормозной системы (18,6%), электрооборудования (13,3%), трансмиссии (13,2%); у MERSEDES ходовой части (17,2%), электрооборудовании (17,7%) и тормозной системы (13,9%). Оценка отказов и их трудоемкости устранения позволяет определить наименее надежные узлы и агрегаты машин, требующие особого внимания при подготовки транспортного средства к выпуску в рейс.

Информация о парке машин и данные, полученные от дополнительного оборудования, установленного нами на транспортных машинах, позволили собрать информацию, необходимую для описания процесса, и разработать алгоритм оптимизации показателей, влияющих на себестоимость и качество транспортировки сельскохозяйственной продукции.

Организация серии компьютерных экспериментов заключается в разработке план-матрицы, которая содержит информацию по основным показателям, используемым в процессе моделирования. В ходе итерационного процесса моделирования формируются различные варианты решений, а математическое ожидание определяет среднее значение этой области.

Для повышения достоверности результатов, снимаемых с модели, на входе были заданы полученные в процессе наблюдения статистические данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты обработки статистических данных

Марка транспортного средства	Количество транспортных машин	Количество ремонтно-технических воздействий, чел. ч	Среднее число отказов на одну машину, ед.	Средний пробег, км	Средний пробег до отказа, км	Затраты на ремонтно-технические воздействия, рублей/год
KAMAZ	118	9591,71	16,1	558292	121429,84	74461057,71
Mercedes	121	16732,1	27,7	1138100	160657,02	90738441
Scania	64	5297,38	13,8	1214448,8	203661,53	53262193,43

Следует отметить, что в процессе перевозки сельскохозяйственной продукции необходимо учитывать специфику перевозимой продукции, сезонность и тип кузова, показатели безотказности и ремонтпригодности транспортных машин, поэтому в процессе поиска оптимального решения следует учитывать максимально допустимое время перевозки продукции (рисунок 10).

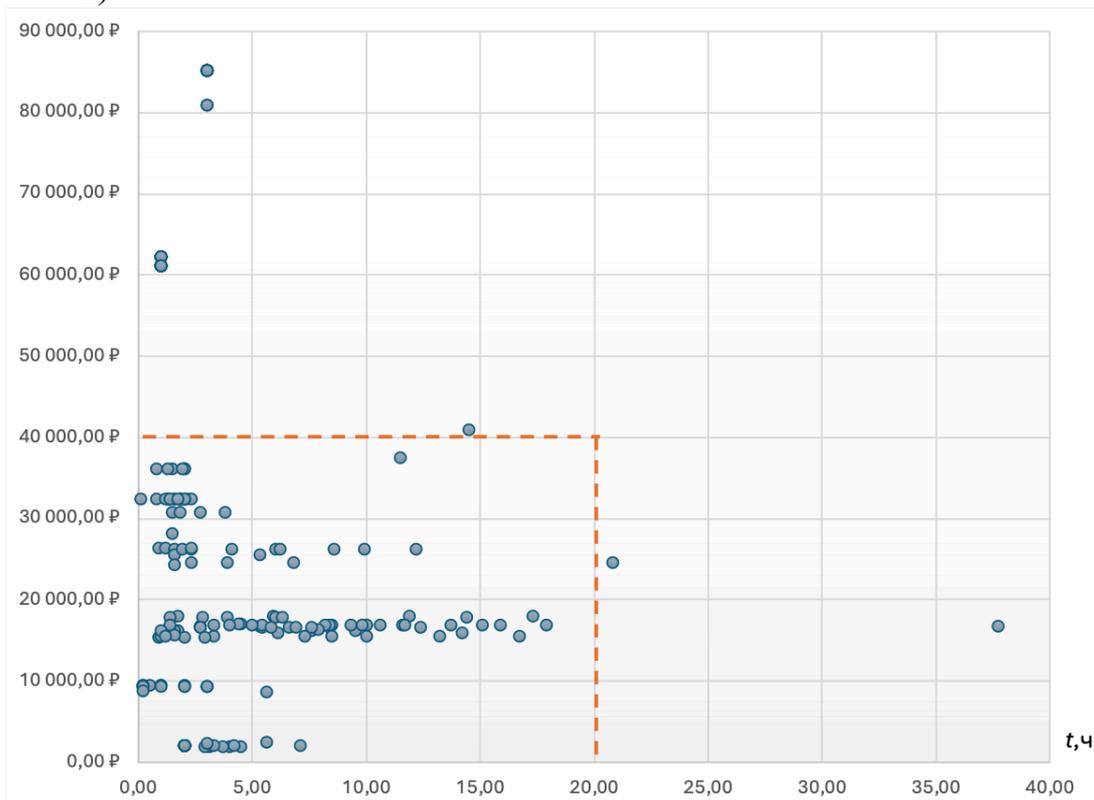


Рисунок 10 – Сводный график результатов имитационного моделирования

Важно отметить, что граница, устанавливающая максимально разрешенный срок перевозки продукции, может варьироваться в зависимости от сезонности, типа продукции и показателей безотказности и ремонтпригодности, помимо экономического критерия, целесообразно оценить возможность модели корректировать продолжительность маршрута в зависимости от вводимых ограничений. Результаты обработки статистических данных представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Техничко-экономические показатели работы перевозки ТК «Технология Движения»

Продолжительность, км	Средняя продолжительность выполнения работ, ч		Затраты на топливо, рублей	
	До	После	До	После
120	4,71	3,00	2 077,33 Р	1 877,00 Р
551	6,06	4,20	9 004,33 Р	8 071,17 Р
1115	15,15	12,15	17 371,83 Р	15 217,33 Р
1573	20,54	18,60	25 518,17 Р	23 757,67 Р
2234	26,60	23,40	35 203,17 Р	33 291,33 Р
3072	41,92	36,75	61 691,83 Р	55 545,83 Р
5081	62,28	57,15	83 401,33 Р	74 722,00 Р

В пятой главе «Техничко-экономическая оценка результатов исследований» представлен расчет экономических показателей перевозки сельскохозяйственной продукции.

Проведенные расчеты по разработанной методике, показали тенденцию к снижению эксплуатационных затрат в зависимости от выполнения плана перевозки на рисунке 11 приведены результаты моделирования технологического процесса грузоперевозки с использованием различных вариантов (моделей) машин, направлений и протяженности перевозки.

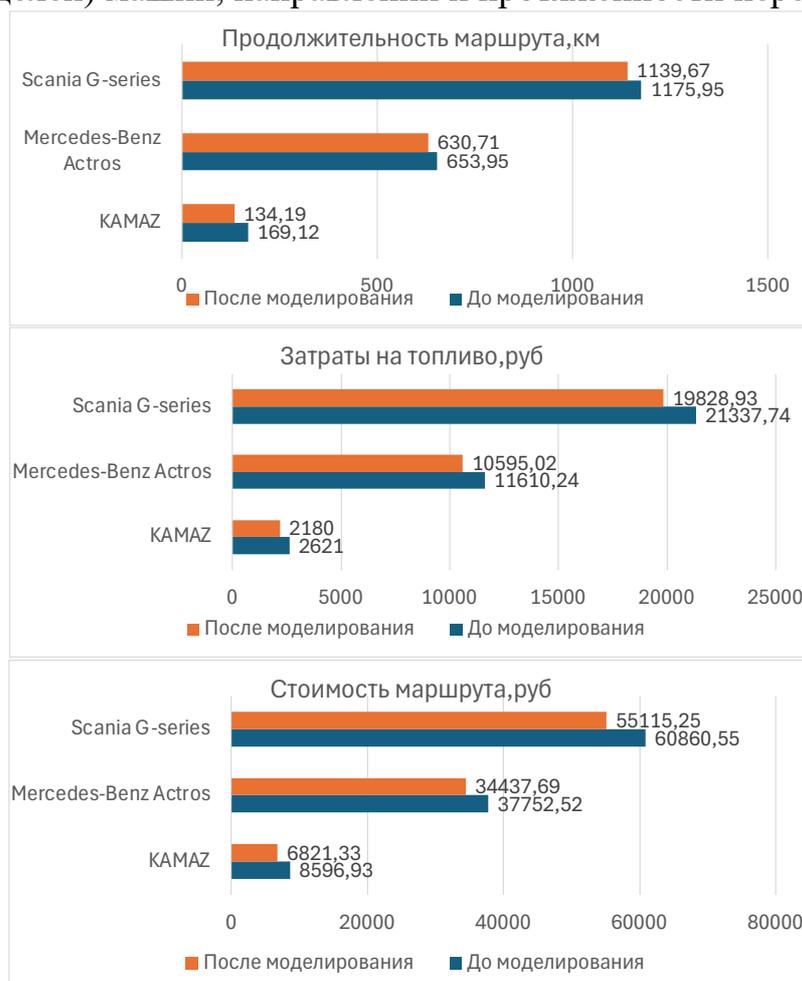


Рисунок 11 – Сравнение результатов моделирования по основным экономическим показателям эффективности использования машин в процессе сельскохозяйственной продукции ТК «Технология Движения»

С помощью разработанной модели происходит корректировка маршрута, подбор транспортных машин с учетом специфики перевозимого груза и показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин.

Сравнение результатов моделирования с данными, полученными в процессе эксплуатации, показывают следующую тенденцию, а именно снижение продолжительности маршрута: с 1 175 до 1 139 км, с 653 до 630 км, с 169 до 134 км в зависимости от маршрута перевозки данный эффект составил в среднем 20–60 км.

За счет создания оптимального маршрута перевозки в зависимости от объема перевозимой продукции с наименьшим количеством используемых машин объем перевозимого груза увеличился с 16 до 17,55 тонн, с 16,7 до 17,8 тонн, с 16,9 до 18,1 тонн.

Затраты на топливо снизились с 21 337,00 рублей до 19 828,00 рублей, с 11 610,00 до 10 595,00 рублей и 2 180,00 до 2 621,00 рублей соответственно за счет вводимых ограничений (в рассматриваемом примере являются срок и режимы перевозки продукции), а также динамическому перестроению маршрута. Если перестроение маршрута не может быть реализовано имеющимися машинами, то добавляется новая и выполняется проверка других сочетаний, соответственно рисунок 12.

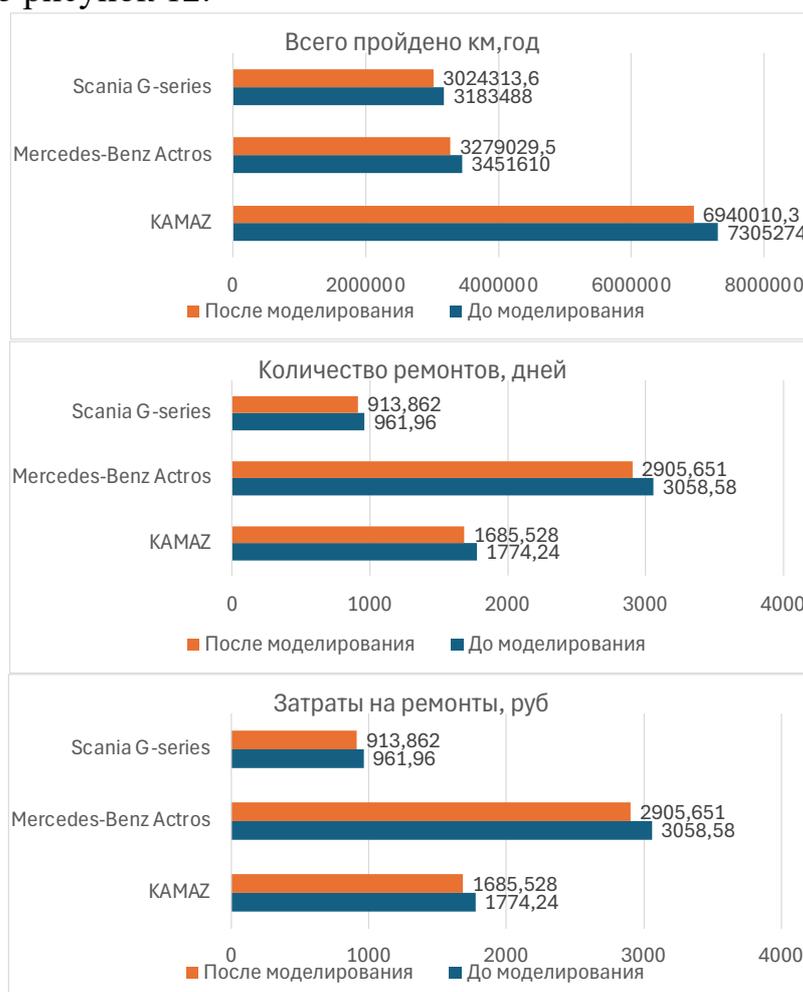
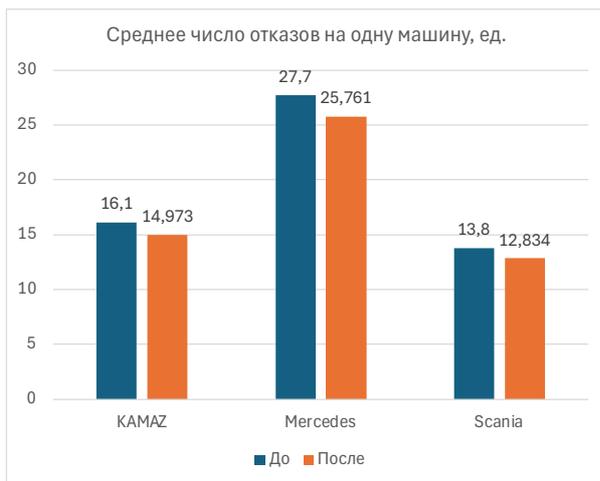


Рисунок 12 – Сравнение результатов моделирования по основным эксплуатационным показателям эффективности парка машин ТК «Технология Движения»

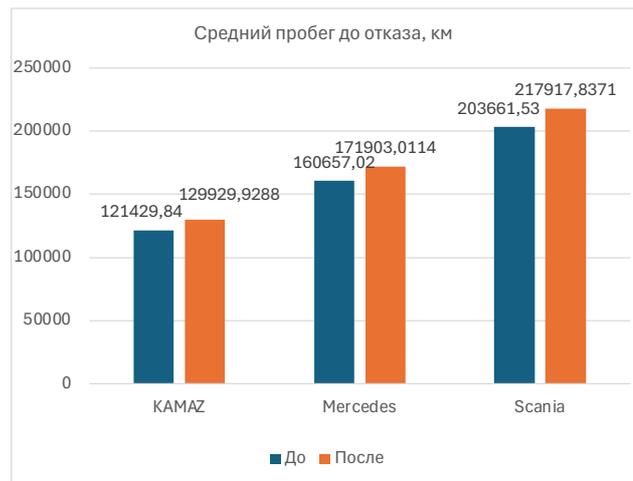
По результатам расчетов по разработанной методике среднее число внезапных отказов на один автомобиль марки KAMAZ, MERCEDES, SCANIA снизился с 16,1 до 14,8; с 27,7 до 25,7; с 13,8 до 12,8 соответственно, а пробег до отказа увеличился с 121 419 км до 129 929 км; с 160 657 км до 171 903 км; с 203 661 км до 217 903 км соответственно.

При этом вырос и средний пробег транспортных машин до 597 тыс. км, 1 217 тыс. км, 1 299 тыс. км соответственно.

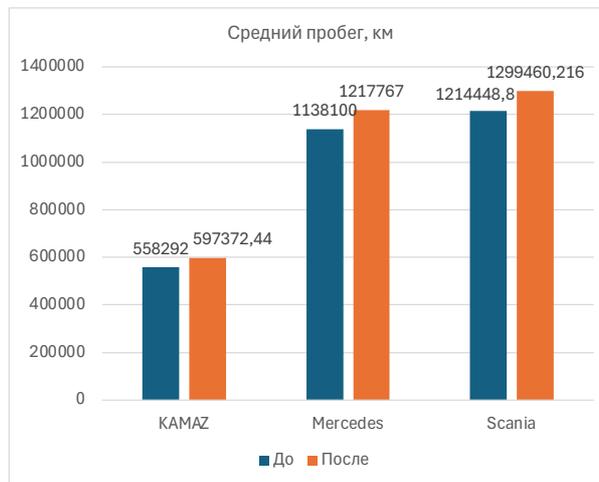
Себестоимость перевозки сельскохозяйственной продукции снизилась с 60 860 рублей до 55 115 рублей, с 37 752 рублей до 34 752 рублей, с 8 517 рублей до 6 821 рублей в зависимости от марки транспортных машины.



а)



б)



в)

Рисунок 13 – Основные показатели надежности транспортных машин при перевозке сельскохозяйственной продукции в ТК «Технология Движения»

а) среднее число отказов на одну машину б) средний пробег до отказа в) средний пробег

Использование разработанной методике на примере функционирования транспортной компании «Технология движения» показали снижение времени на устранение отказов на 7 % и уменьшение затрат, связанных с их устранением на 5 %, получая в целом экономию средств в размере 10 299 тыс. рублей. А также разработанная методика по определению оптимальных параметров перевозки

сельскохозяйственной продукции с учетом технического состояния (показателей безотказности и ремонтпригодности) апробирована в производственных условиях предприятия ООО «КомТранс Трейд», обсуждена и одобрена на ее техническом совете и принята к дальнейшему использованию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ вопроса транспортировки сельскохозяйственной продукции показал, что в мире уровень потерь сельскохозяйственной продукции при перевозке составляет от 3 % до 18 %. В России 15–20% продукции АПК не доходит до потребителя из-за низкого качества перевозки. Из всего многообразия факторов при перевозке нами определены основные показатели, влияющие на качество и себестоимость перевозки сельскохозяйственной продукции, а именно технологические (тип кузова, время перевозки, коэффициент сезонности, влажность, температура), а также показатели безотказности и ремонтпригодности транспортных машин (вероятность безотказной работы транспортной машины, пробег транспортной машины до отказа, время устранения отказа транспортной машины).

2. Установлено, что наиболее удачным решением по обеспечению эффективной перевозки сельскохозяйственной продукции из существующих в данное время, являются системы типа «точно в срок» («just-in-time», JIT-система). Данные системы позволяют: снизить продолжительность цикла перевозки на 35 %, уменьшить издержки на 15–20% и сократить запасы на 25%.

3. Предложена новая функциональная схема процесса перевозки сельскохозяйственной продукции с помощью нотации BPMN с учетом технического состояния (показателей безотказности и ремонтпригодности) транспортных машин.

4. Разработана методика по определению оптимальных параметров процесса перевозки сельскохозяйственной продукции с учетом показателей безотказности и ремонтпригодности транспортных машин в программном продукте «Сапфир» (среда AnyLogic). Уровень согласованности данных с реальными условиями эксплуатации и имитационной модели не превышает более 10%.

5. Установлено, что пиковое количество отказов у рассмотренных транспортных машин приходится на пробег 490–600 тыс. км, средний пробег до отказа для автомобилей марок KAMAZ, MERCEDES, SCANIA составил 121 419 км, 160 657 км, 203 661 км соответственно, а среднее число отказов для автомобилей марок KAMAZ, MERCEDES, SCANIA составило 16,1; 27,7; 13,8 соответственно. В результате сбора и обработки статистических данных, сформированы характерные группы отказов для автомобилей марок KAMAZ, MERCEDES, SCANIA.

6. По результатам применения разработанной методике по определению оптимальных параметров процесса перевозки сельскохозяйственной продукции с учетом показателей безотказности и

ремонтпригодности транспортных машин установлено, что:– среднее число внеплановых отказов на один автомобиль марки KAMAZ, MERCEDES, SCANIA снизилось с 16,1 до 14,8; с 27,7 до 25,7; с 13,8 до 12,8 соответственно; – пробег до отказа на один автомобиль марки KAMAZ, MERCEDES, SCANIA увеличился с 121 419 км до 129 929 км; с 160 657 км до 171 903 км; с 203 661 км до 217 903 км соответственно; – себестоимость перевозки сельскохозяйственной продукции в целом снизилась на 8–15% и составила от 2 до 6 тысяч рублей на одну перевозку в зависимости от марки транспортных машины.

7. Внедрение разработанных программных модулей системы «Сапфир»: рег. №2024610603 «Сапфир-1.0: Программно-вычислительный комплекс моделирования транспортно-технологических систем», рег. №2024610468 «Сапфир-1.1: Программно-аналитический комплекс организации взаимодействия между подвижным составом автомобильного транспорта и складами», рег. №2024665968 «Сапфир 1.2 Программно-вычислительный комплекс загрузки транспортных средств» позволило транспортной компании «Технология движения» обеспечить снижение времени на устранение отказов на 7 % и сокращение затрат, связанных с их устранением на 5 %. В результате получен экономический эффект в размере 10 299 тыс. рублей без снижения качества перевозимой сельскохозяйственной продукции. А также, результаты научного исследования, успешно апробированы в производственных условиях предприятия ООО «КомТранс Трейд», обсуждены и одобрены на ее техническом совете и приняты к дальнейшему использованию.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективами дальнейшего исследования является разработку цифровой платформы для оптимизации производственных ресурсов, с учетом показателей надежности транспортно-технологических машин и оборудования в сельскохозяйственном производстве. Основные функциональные возможности платформы включают выбор оптимальных решений по управлению заказами и поставками, анализ данных и прогнозирование, мониторинг и контроль использования ресурсов, а также интеграцию с другими системами управления. С расширением функционала системы и возможностью пользователям управлять заказами и отслеживать статус доставки продукции, а также в режиме реального времени наблюдать за всем технологическим процессом «от поля до прилавка» сельскохозяйственной продукции.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. *Некрасов, С. И.* Оптимизация перевозки сельскохозяйственной продукции с применением технологий имитационного моделирования / Некрасов С. И., Шитикова А. В., Апатенко А. С. // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, No 6. С. 36-43. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-36-43>

2. **Некрасов, С. И.** Использование нейронных сетей для оптимизации процесса доставки грузов предприятий АПК / Некрасов С. И., Апатенко А. С., Фомин А. Ю. // Международный технический журнал. 2024. № 3 (90). С. 57–66.

3. **Некрасов, С. И.** Многоуровневая логистическая система, как основа рационального распределения и контроля целевого использования производственных ресурсов / С. И. Некрасов, В. И. Горностаев, А. В. Анисимов // Международный технический журнал. – 2023. – № 1(87). – С. 23-35. – DOI 10.34286/2949-4176-2023-87-1-23-35. – EDN ZHEZAQ.

4. **Некрасов, С. И.** Повышение эффективности организационно-технологического обеспечения производственных процессов природообустройства с использованием методов имитационного моделирования / С. И. Некрасов, В. И. Горностаев, А. И. Новиченко // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 3. – С. 27-38. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-84-3-27-38. – EDN UYYAKT.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных**

1. **Nekrasov, S. I.** Use of simulation modeling techniques in solving optimization problems of transport support / S. I. Nekrasov, V. I. Gornostaev // Digital Technologies in Agriculture of the Russian Federation and the World Community, Stavropol, 27–30 сентября 2021 года. Vol. 2661. – Stavropol: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 040007. – EDN OPRZVB.

2. **Nekrasov, S. I.** The use of simulation technologies to optimize the processes of transportation of crop production / S.I. Nekrasov, A.S. Apatenko // BIO Web Conf. 139 03003 (2024) DOI: 10.1051/bioconf/202413903003

#### **Публикации в других научных изданиях**

1. **Некрасов, С. И.** Оптимизация транспортно-технологического процесса путем интеграции контрольно-информационных систем / С. И. Некрасов // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы : Сборник докладов 27-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ-МГСУ, Москва, 26–27 апреля 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. – С. 323-327. – EDN QGKZXG.

2. **Некрасов, С. И.** Информационная система рационального распределения ресурсов как элемент сервисного сопровождения / С. И. Некрасов // Чтения академика В. Н. Болтинского, Москва, 25–26 января 2023 года. Том 2. – Москва: ООО «Сам полиграфист», 2023. – С. 71-75. – EDN LXAXSO.

3. **Некрасов, С. И.** Роль контрольно-информационных систем в сервисном сопровождении / М. И. Некрасова, С. И. Некрасов // Техника и

технологии: теория и практика. – 2023. – № 5(11). – С. 22-25. – DOI 10.34286/2712-7419-2023-11-5-22-25. – EDN MRFZBX.

4. **Некрасов, С. И.** Разработка программно-аппаратного комплекса для рационального распределения и контроля целевого использования производственных ресурсов в АПК / С. И. Некрасов // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы : Сборник статей 26-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 12–13 мая 2022 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 373-376. – EDN KPKUTI.

5. **Некрасов, С. И.** Повышение эффективности организационно-технологического обеспечения с помощью методов имитационного моделирования / С. И. Некрасов, В. И. Горностаев // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы IX Международной научно-практической конференции, Саратов, 27–28 апреля 2022 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2022. – С. 614-618. – EDN YVGQRL.

6. **Некрасов, С. И.** Повышение эффективности организационно-технологического обеспечения с помощью контрольно-информационных систем / С. И. Некрасов, В. И. Горностаев // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова : сборник статей, Москва, 06–08 июня 2022 года. Том 2. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 633-635. – EDN FIFELG.

7. **Некрасов, С. И.** Формализация структуры технологических процессов в природообустройстве с целью создания экспертной системы / С. И. Некрасов, Р. Г. Кучинский, О. А. Ступин // Техника и технологии: теория и практика. – 2022. – № 2(4). – С. 14-18. – DOI 10.34286/2712-7419-2022-4-2-14-18. – EDN YHVIWC.

8. **Некрасов, С. И.** Применение технологий искусственного интеллекта в задачах имитационного моделирования человеко-машинных систем / С. И. Некрасов, Р. Г. Кучинский, О. А. Ступин // Техника и технологии: теория и практика. – 2022. – № 3(5). – С. 15-20. – DOI 10.34286/27127419-2022-5-3-15-20. – EDN KMPMSJ.

#### **Авторские свидетельства, патенты, лицензии**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667321 Российская Федерация. Сапфир 1.2 Программно-вычислительный комплекс загрузки транспортных средств: № 2024665968: заявл. 09.07.2024: опубл. 23.07.2024 / С. И. Некрасов, А. Ю. Фомин, А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина, И. И. Руденко; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610468 Российская Федерация. Сапфир-1.1: Программно-аналитический комплекс организации взаимодействия между подвижным составом автомобильного транспорта и складами: № 2023668336: заявл. 05.09.2023: опубл. 11.01.2024 / С. И. Некрасов, А. И. Новиченко, В. И. Горностаев, А. В. Анисимов; заявитель ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «САПФИР ЮНИОН». – EDN SUTEXC.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610603 Российская Федерация. Сапфир-1.0: Программно-вычислительный комплекс моделирования транспортно-технологических систем: № 2023668332: заявл. 05.09.2023: опубл. 11.01.2024 / С. И. Некрасов, А. И. Новиченко, В. И. Горностаев, А. В. Анисимов; заявитель ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «САПФИР ЮНИОН». – EDN EZODCU.