

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи



Волхонская Елизавета Евгеньевна

**УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ И ТЕХНИЧЕСКИМ
ОБСЛУЖИВАНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Орлов Сергей Павлович

Самара – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫМ ВВОДОМ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	13
1.1 Виртуальный ввод в эксплуатацию технически сложных объектов в рамках концепции «Индустрия 4.0»	13
1.2 Существующие методы управления при виртуальном вводе в эксплуатацию.....	18
1.3 Аналитический обзор применения систем роботизированных автомобилей для агротехнической промышленности	24
1.4 Модельно-ориентированное системное проектирование при создании системы роботизированных транспортных средств.....	33
1.5 Виртуальные испытания цифровых двойников как основной компонент виртуального запуска в эксплуатацию технических объектов...	37
1.6 Задачи исследований по управлению виртуальными испытаниями системы роботизированных транспортных средств.....	41
1.7 Управление виртуальными испытаниями роботизированных транспортных средств.....	42
1.7.1 Методика управления виртуальными испытаниями на основе оптимизационно-имитационного подхода и цифровых моделей	44
1.7.2 Этапы виртуальных испытаний РТС	47
Выводы.....	50
2 УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПРИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ	52
2.1 Структура производственно-логистической системы агропромышленного предприятия	52
2.2 Задача планирования графика производственных работ.....	55
2.3 Оптимизационная задача назначения роботизированных транспортных средств.....	58
Выводы.....	60
3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВИРТУАЛЬНОМ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ	61

3.1 Модели на сетях Петри для исследования эффективности эксплуатации, технического обслуживания и ремонта транспортных средств.....	61
3.2 Иерархические сети Петри для анализа процессов эксплуатации и технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей ...	63
3.3 Имитационная модель эксплуатации роботизированного автомобиля КАМАЗ на стохастических временных раскрашенных сетях Петри	67
3.4 Вероятностные законы для процессов износа и отказов агрегатов роботизированного автомобиля	74
3.5 Интеграция случайных законов в модели на стохастических временных иерархических раскрашенных сетях Петри	83
3.6 Применение стратегии каннибализации для технического обслуживания автопарка роботизированных автомобилей сельскохозяйственного назначения	89
Выводы.....	97
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРКОМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ	99
4.1 Области использования результатов диссертационного исследования	99
4.2 Использование системных моделей и методики управления виртуальными испытаниями роботизированных транспортных средств сельскохозяйственного назначения	100
4.2.1 Решение задачи оптимального распределения парка роботизированных транспортных средств.....	100
4.2.2 Имитационное моделирование производственных задач для верификации распределения парка роботизированных транспортных средств	112
4.3 Практическое использование результатов диссертационного исследования	115
4.3.1 Проект по созданию роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей КАМАЗ	115
4.3.2 Внедрение результатов исследований на промышленных предприятиях.....	116
Выводы.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	122

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ А ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ПОДСИСТЕМ РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ДЕРЕВЬЯ ОТКАЗОВ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ПОДСИСТЕМ РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В НИР	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Г ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Д СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Активное развитие роботизации в промышленности приводит к широкому использованию роботизированных транспортных средств (РТС). К ним относятся автономные и беспилотные автомобили, карьерные самосвалы, сельскохозяйственные комбайны и промышленные погрузчики. Роботизированные транспортные средства представляют собой сложную киберфизическую систему, объединяющую агрегаты, механические узлы и автономные системы контроля, управления и передачи информации, а также моделирующие и диагностические системы на основе «цифровых двойников» (ЦД). Такая особенность РТС, как сложной системы, приводит к необходимости решения задач технического обслуживания и ремонта для транспортных средств (ТОиР) для обеспечения заданной надежности. Наличие в роботизированных транспортных средствах большого количества измерительных приборов позволяет получать значительный объем информации о техническом состоянии автомобиля. Используя, в рамках концепции Индустрии 4.0, удаленные системы обработки информации и технологии «Интернет вещей», можно выполнить переход к прогнозному техническому обслуживанию (ТО), которое более эффективно, чем регулярное профилактическое ТО.

Для обеспечения эффективной работы комплекса роботизированных средств важным является: а) решение задачи оптимального назначения на производственные работы, б) анализ процесса эксплуатации с помощью имитационных моделей. Такой подход позволит распределять имеющиеся ресурсы с одновременным учетом сложных условий эксплуатации, анализировать технические состояния РТС и осуществлять прогнозное техническое обслуживание.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическую основу выполненных в диссертации исследований составили основополагающие труды по теории сложных систем и системному анализу

таких ученых, как В.Н. Бурков, В.Л. Бурковский, С.Н. Васильев, М.В. Губко, А.А. Емельянов, Б.Г. Ильясов, В.А. Ириков, В.В. Кульба, В.В. Липаев, Н.Н. Моисеев, Д.А. Новиков, Г.С. Поспелов, И.В. Прангишвили, С.В. Смирнов, А.В. Цветков, А.Д. Цвиркун, В.Д. Шапиро, Э.А. Трахтенгерц [2, 5, 8–11, 15, 16, 18, 27–29, 34–37, 39–41, 43–46, 60, 64–66, 69, 70, 75, 77], и зарубежных исследователей К. Jensen, К. Heldman, Н. Kerzner, G.J. Klir, L. Kristensen, Y. Shoham, К. Leyton-Brown, М. Mesarovic, Y. Takahara [2, 76, 88, 90, 91, 109, 110, 113, 140].

Решением задач обеспечения надежности и оптимального использования ресурсов при управлении техническим обслуживанием в киберфизических системах занимались А.А. Большаков, Н.О. Дородных, С.П. Орлов, В.М. Помогаев, С.В. Сусарев, М.В. Щербаков, А.Ю. Юрин, J. Andrews, B. Le, J. Sheng, D. Prescott [3, 6, 25, 26, 30, 31, 49, 50, 54, 57, 62, 63, 72, 73, 116, 117, 122–126, 138, 139].

Задачи управления крупномасштабными системами с переменной структурой решались в Институте проблем управления РАН РФ (А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфеев, В.В. Кульба) [1, 2, 5, 18, 36].

Необходимость решения проблемы распределения и технического обслуживания роботизированных транспортных средств связана со следующими факторами.

1. Сложность эксплуатации РТС в связи с протяженностью производственных объектов и удаленностью сервисных центров, а также с изменчивой и чувствительной к погодным условиям внешней средой.
2. Особенности мониторинга технических состояний роботизированных транспортных средств, находящихся в эксплуатации и на ТОиР.

3. Ограниченность финансовых, материальных и временных ресурсов предприятий на техническое обслуживание и ремонт роботизированных транспортных средств.

4. Наличие значительных неопределенностей и случайных факторов, определяющих техническое состояние узлов и агрегатов РТС, что вызывает необходимость изучения этих факторов еще на этапе виртуального ввода РТС в эксплуатацию.

В связи с этим актуальной является задача создания цифровых моделей и методики виртуальных испытаний роботизированных транспортных средств как при проектировании, так и при реальной эксплуатации.

Целью диссертационной работы является сокращение эксплуатационных затрат и снижение времени простоя роботизированных транспортных средств за счет использования цифровых моделей и метода виртуальных испытаний при управлении производственными задачами на предприятии.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены **следующие основные задачи:**

- 1) системный анализ роботизированных транспортных средств и организации их технического обслуживания и ремонта;
- 2) разработка комплекса цифровых моделей для управления виртуальными испытаниями РТС;
- 3) постановка и решение задачи оптимального назначения роботизированных транспортных средств на производственные операции в рамках заданного графика работ;
- 4) разработка имитационных моделей процессов эксплуатации роботизированных транспортных средств при различных условиях с учетом случайного характера износа и деградации агрегатов и элементов РТС и вероятностных законов появления отказов.

5) проведение экспериментальных исследований на имитационных моделях для выработки рекомендаций по назначению РТС на работы, выбора стратегии и организации эффективного технического обслуживания и ремонта.

Объектом исследований является система роботизированных транспортных средств, выпускаемых ПАО «КАМАЗ» для сельскохозяйственной отрасли и выполняющих производственные задачи по грузоперевозкам.

Предметом исследований являются методы и модели управления комплексом роботизированных транспортных средствами при выполнении производственных задач с учетом стратегий технического обслуживания и ремонта.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного и математического анализа, исследования операций, методы математического программирования, имитационное моделирование процессов на дискретно-событийных моделях.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработана методика управления виртуальными испытаниями на цифровых моделях комплекса роботизированных транспортных средств, отличающаяся итерационной процедурой анализа цифровой модели подсистемы планирования работ для оптимального распределения транспортных средств по производственным задачам и исследования иерархической имитационной модели эксплуатации и технического обслуживания, что обеспечивает принятие эффективных решений на всех этапах жизненного цикла транспортных средств (пункт 15 паспорта специальности 2.3.1).
2. Поставлена и решена задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными оптимального назначения роботизированных транспортных средств для выполнения

производственных операций агропромышленного предприятия, отличающаяся учетом ограничений на степень загруженности роботизированных автомобилей в соответствии с площадью полей и объемами бункеров зерноуборочных комбайнов, что позволяет минимизировать затраты на эксплуатацию и формировать множество автомобилей для резервирования и каннибализации (пункт 2 паспорта специальности 2.3.1).

3. Предложена новая цифровая модель эксплуатации и технического обслуживания на стохастических временных раскрашенных сетях Петри с иерархической структурой модулей, отличающаяся моделированием стратегий резервирования и каннибализации и имитацией случайных процессов появления отказов, износа и деградации элементов и узлов транспортных средств, что обеспечивает сокращение времени простоя при техническом обслуживании и ремонте (пункт 11 паспорта специальности 2.3.1).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Методика управления виртуальными испытаниями комплекса роботизированных транспортных средств на цифровых моделях, включающих модель подсистемы планирования работ и иерархическую имитационную модель для оптимального распределения роботизированных транспортных средств и организации эксплуатации и технического обслуживания.
2. Оптимизационная задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными назначения роботизированных транспортных средств, решенная для парка роботизированных автомобилей на базе шасси КАМАЗ, выполняющих задачи погрузки, разгрузки и транспортировки зерна в агропромышленном предприятии.
3. Новая иерархическая имитационная модель на стохастических временных раскрашенных сетях Петри для моделирования процессов

эксплуатации, появления отказов, износа и деградации элементов и узлов роботизированных транспортных средств при различных стратегиях технического обслуживания.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость результатов данного диссертационного исследования заключается в формализации при помощи предложенных цифровых моделей процессов распределения транспортных средств и в обеспечении виртуального ввода в эксплуатацию роботизированных транспортных средств с учетом стратегии технического обслуживания и ремонта в агропромышленном комплексе.

Практическая значимость заключается в применении методики виртуальных испытаний для оптимального распределения транспортных средств по работам с учетом динамики процессов, что позволяет учесть специфику производств отрасли и способствует сокращению времени простоя специализированной техники и уменьшению расходов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследования обеспечиваются корректным использованием методов математического программирования, методов имитационного моделирования, согласованностью численных экспериментов на цифровых моделях с практическим использованием методики на предприятиях, обсуждением выводов проведенных исследований на научных конференциях.

Внедрение. Результаты научных исследований использованы в проекте Минобрнауки РФ «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления», уникальный ID номер RFMEFI157718X0286, выполненному в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в рамках ФЦП «Исследования и

разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Результаты диссертации внедрены на предприятиях: АО «Передвижная механизированная колонна–402», г. Самара, АО «Челно-Вершинский машиностроительный завод», с. Челно-Вершины, Самарская область.

Результаты диссертационного исследования в виде моделей и алгоритмов используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке студентов по направлениям магистратуры 15.04.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств».

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: 34-й и 36-й Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях», (г. Санкт-Петербург, 2021 г.; г. Н. Новгород, 2023 г.); Международной научной конференции «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» – CYBERPHY:2023 – «Cyber-Physical Systems Design And Modelling», (г. Н. Новгород, 2023 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика» (г. Петрозаводск, 2022 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах, в том числе: 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, одна статья в журнале, входящем в международную базу Scopus, одно свидетельство о государственной регистрации базы данных, 4 статьи в прочих изданиях.

Личный вклад автора. Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: разработка методики виртуальных испытаний группы роботизированных транспортных средств на основе комплекса цифровых моделей [12, 50]; решение задачи

оптимального назначения роботизированных транспортных средств для выполнения производственных операций агропромышленного комплекса [13]; разработка цифровой иерархической имитационной модели на стохастических временных раскрашенных сетях Петри [14, 70, 142].

Структура и объем диссертации. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 149 наименований, изложена на 160 страницах текста, содержит 27 рисунков, 15 таблиц и 5 приложений.

1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫМ ВВОДОМ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

1.1 Виртуальный ввод в эксплуатацию технически сложных объектов в рамках концепции «Индустрия 4.0»

Индустрия 4.0 является концепцией для внедрения промышленными компаниями методов и процессов, приводящих к цифровизации, построению облачных вычислений, Интернета вещей и больших данных. Готовность к концепции 4.0 в индустрии напрямую связана с наличием цифровой инфраструктуры на производстве, а также возможностями работы с большими данными. Индустрия 4.0 – это, прежде всего, концепция самодостаточных производств, интегрированных операций, и децентрализованные решения с минимальным вмешательством человека [121]. Данная концепция была создана и разработана в 2011 году промышленными и академическими сообществами в Германии с целью оцифровывания производственных процессов. Индустрия 4.0 представляет собой концепцию «умного» производства с использованием передовых технологий, то есть является адаптивной системой, в которой выполняется автоматическое регулирование производственных процессов для изменяющихся условий и разных типов продуктов при помощи гибких линий. Это позволяет повышать производительность, качество, гибкость производства и способствует крупномасштабному и устойчивому выпуску продуктов с сокращением количества потребляемых ресурсов. В рамках этой концепции, включение различных киберфизических систем в производственные процессы, вызвало значительное изменение парадигм производства и бизнеса.

На сегодняшний день определение элементов Индустрии 4.0 связано непосредственно с такими средствами, как автоматизированные системы, Интернет вещей, киберфизические системы и большие данные, а также с

непосредственной виртуализацией производства. Таким образом, концепция Индустрии 4.0 предполагает сложную технологическую структуру производственных систем. Также Индустрия 4.0 предусматривает внедрение цифровых технологий, которые используют сбор данных, и их анализ в режиме реального времени для обучаемости производственной системы.

Можно сказать, что Индустрия 4.0 основывается на производственной деятельности с использованием новых технологий, а именно, умное производство, умные продукты, умные поставки и умная работа, как новые способы осуществления работниками своей деятельности [121]. «Умное производство» в данной концепции является центральной опорой всей внутренней операционной деятельности, и соответственно, является первой целью, которую необходимо достичь в рамках Индустрии 4.0. Достижение цели «умное производство» можно разделить на 6 основных подцелей:

- вертикальная интеграция;
- виртуализация;
- автоматизация;
- отслеживание движения продукции на всех стадиях производства;
- гибкость;
- управление энергопотреблением.

Вертикальная интеграция включает в себя передовые программируемые системы, которые реализуют иерархическую систему управления предприятием без непосредственного вмешательства человека. Естественно, в рамках умного производства возрастает уровень автоматизации, а в дальнейшем добавляется и некоторая автономность системы, связанная с внедрением роботизированной техники.

После непосредственного создания объекта, важным этапом его проектирования является ввод в эксплуатацию. В связи с необходимым широким спектром информации о функциональности системы, управлении, совокупности программного обеспечения для узлов, компонентов и

подсистем, требования к процессу непосредственного ввода в эксплуатацию повышаются.

Термин «ввод в эксплуатацию» не имеет точной формулировки в научной литературе, однако широко применяется во всех отраслях промышленности. Так, согласно немецкому стандарту DIN 32541, виртуальный ввод в эксплуатацию описывается как предоставление машины или технического оборудования для использования. Европейские стандарты по оборудованию определяют ввод в эксплуатацию как первое использование системы или оборудования по назначению. В Российской Федерации действует ГОСТ Р МЭК 62337-2016, определяющий понятия, связанные с вводом в эксплуатацию [24].

Согласно статье W. Eversheim [95], ввод в эксплуатацию является приведением объектов в рабочее состояние с последующей проверкой функциональности. Иногда проверку функциональности и работоспособности объекта относят к управлению качеством эксплуатации.

На сегодняшний день реальное определение ввода в эксплуатацию выглядит как «определение эксплуатационной безопасности и работоспособности компонентов и систем, соединенных вместе и подключенных к полной производственной системе, с последующей проверкой функциональности» [106]. Устранение недостатков и неисправностей, которые возникли на более ранних этапах, а также оптимизация и дополнительная настройка рабочих параметров и программ управления также является частью этой процедуры.

Помимо отказов, возникающих в процессе разработки систем и компонентов, также наблюдается и высокий риск отказов уже непосредственно в процессе ввода в эксплуатацию. Так как основной ввод в эксплуатацию объекта ограничен во времени и ресурсах, то обычно в данном процессе осуществляется тестирование только начальных сценариев отказов, что не позволяет провести максимальную проверку систем, а следовательно,

приводит к дополнительным затратам и временным задержкам на ранних этапах работы.

В руководстве INCOSE [108], выпущенном в 2011 году, говорится о ценности превентивного снижения риска, поскольку такое устранение ошибок является менее затратным. Говоря о современных системах, можно заметить, что происходит переход к сложным системам и росту затрат, связанных с электроникой и программным обеспечением объектов. Поэтому проблема перенастройки имеет место не только при разработке систем управления для вновь создаваемых систем, но и при необходимой модификации систем управления с минимальным временем простоя на этапах технического обслуживания.

В качестве решения данных проблем предлагается виртуальный ввод в эксплуатацию, во время которого выполняются функции тестирования производственных систем и связанных с ними программ управления. Эти процедуры выполняются до непосредственной реализации реальных систем. Имитационная модель, создаваемая в рамках виртуального ввода в эксплуатацию, решает задачи, которые должен реально выполнить объект, а также способствует обнаружению и исправлению ошибок, возникающих в рамках проектирования, особенно при программировании электронной части системы. Следовательно, преимуществами виртуального ввода в эксплуатацию объектов можно назвать:

- сокращение времени реального ввода в эксплуатацию;
- повышение надежности планирования;
- ранее обнаружение и исправление ошибок для объекта.

При виртуальном вводе в эксплуатацию исключается большее количество возникающих ошибок, что позволяет избежать простоя оборудования при реальном запуске установки.

Анализируя процесс виртуального ввода в эксплуатацию различных объектов, следует отметить широко применяемую концепцию «цифрового двойника» объекта [99]. Данная методика позволяет сконструировать модель,

практически идентичную реальному объекту, что позволяет значительно снизить объем испытаний реальной модели. В рамках применения технологий цифровых двойников объектов можно создавать различные имитационные модели, позволяющие детализировать именно ту часть объекта, которая необходима в данном случае с учетом реальных данных о технических состояниях, полученных за определенный промежуток времени эксплуатации реального объекта.

Виртуальный ввод в эксплуатацию используется как инструмент цифрового планирования для проверки высокоавтоматизированных систем в промышленности, а также киберфизических систем.

Создание цифрового двойника, как и виртуальный ввод в эксплуатацию является междисциплинарной задачей, включающей в себя различные специализированные интегрированные программные системы. Исходя из этого, в области виртуального ввода в эксплуатацию различают два основных типа моделирования:

- а) аппаратное обеспечение в цикле «Hardware in the loop» (HiL), когда симуляция подключается к какому-либо реальному программному объекту [104];
- б) программное обеспечение в цикле «Software in the Loop» (SiL), в котором цифровой двойник имеет полностью моделируемое программное обеспечение [104].

Первый тип моделирования позволяет определять, как работает управляющее программное обеспечение, и отслеживает реакцию системы. Второй тип моделирования позволяет тестировать различные комбинации событий, без физического подключения.

Естественно, при создании цифрового двойника также требуется имитационная модель объекта для формирования представления о работе объекта, имитирующая его физическое поведение для получения кинематических характеристик. В данном случае, модель должна описываться, как можно более точно, но при этом быть достаточно простой

для выполнения имитации. Таким образом, обращаясь к общим принципам проектирования моделей необходимо, чтобы применяемая модель цифрового двойника была модульной, масштабируемой, подключаемой и должна содержать требуемое количество элементов, являющихся важными для обеспечения и отслеживания необходимых функций. На сегодняшний день эффективно ведутся разработки в области виртуального запуска в эксплуатацию различных производственных систем, в том числе и в области машиностроения [7, 42, 47, 71].

1.2 Существующие методы управления при виртуальном вводе в эксплуатацию

Для любого промышленного предприятия является важным повышение эффективности производственной системы и снижение стоимости. Современная производственная система является высоко интегрированной и может использовать роботизированную технику с компьютерной системой управления и мониторинга состояний. Она является динамической, и изменение ее состояний непосредственно связано с возникновением различных событий. Такое поведение характерно для дискретно-событийной системы. Моделирование такой системы способствует выявлению узких мест, ошибок планирования и позволяет создавать различные графики изменений значений параметров на протяжении определенного промежутка времени.

Проведенные исследования в области виртуального ввода в эксплуатацию показали, что его использование сокращает время ввода в эксплуатацию на 75%. Виртуальный ввод в эксплуатацию можно условно разделить на четыре основных этапа [84], как показано на рисунке 1.1:

- 1) планирование процесса;
- 2) моделирование физических устройств;
- 3) моделирование логических устройств;
- 4) моделирование управления системой.

Все преимущества виртуального ввода в эксплуатацию могут быть достигнуты за счет эффективного метода построения имитационных моделей, включающих в себя виртуальные устройства.

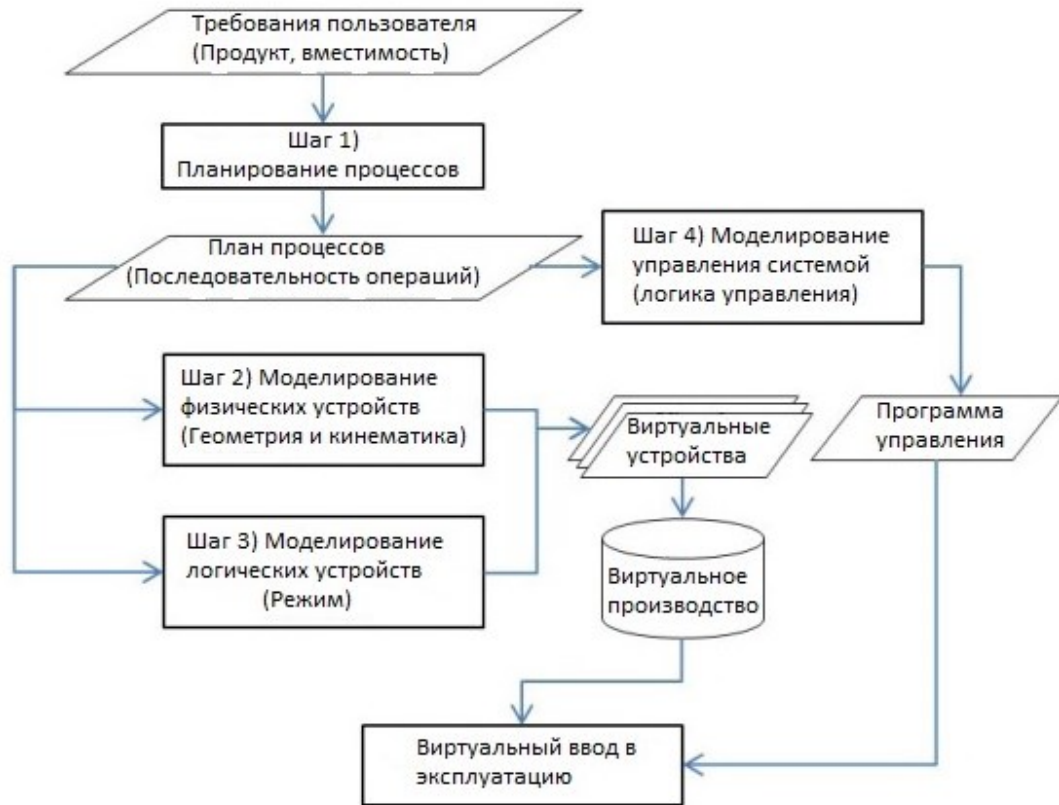


Рисунок 1.1 – Виртуальный ввод в эксплуатацию технически сложных объектов

Анализируя этапы виртуального ввода в эксплуатацию, видно, что шаг 1 и шаг 4 являются частью классической процедуры проектирования, а шаг 2 и шаг 3 предназначены для реализации виртуального ввода в эксплуатацию. Они выполняют моделирование физического аспекта виртуального устройства и его взаимодействие с логической частью других устройств. Особенностью взаимодействия виртуальных устройств является их поведение, которое в точности соответствует их реальным прототипам [118].

Следующей задачей является моделирование логики поведения системы, которое определяется управляющими программами. Здесь задача делится на две условные категории: проверка теоретических атрибутов заданной программы на безопасность, живучесть и достижимость, и создание новой надежной программы программируемого логического контроллера (ПЛК). Создание новой надежной программы ПЛК состоит из двух взаимосвязанных этапов [135]:

- 1) описание логики управления с помощью диаграмм состояний, сетей Петри и IDEF0;
- 2) генерация программ ПЛК с помощью данных формализмов.

Такие программы помогают процессу разработки логики управления, однако не гарантируют отсутствие ошибок в программах управления. Для решения данной проблемы необходимо иметь прозрачную среду программирования, позволяющую распознавать скрытые ошибки, что приводит к концепции виртуального ввода в эксплуатацию.

Также для построения логической модели необходимо рассмотреть и различные сценарии виртуального ввода в эксплуатацию. Так, виртуальный ввод в эксплуатацию существующей системы будет значительно отличаться от виртуального ввода в эксплуатацию новой производственной системы.

Основные цели моделирования в производстве – это представление сложного поведения системы и рассмотрение возможных последствий внешних факторов, конструктивных ограничений и человеческого взаимодействия. В связи с этим, Р. Розеном [134] было предложено использование цифровых двойников на основе моделирования сложного поведения производства на этапах жизненного цикла. Под цифровым двойником Розеном подразумевается структура, способная объединять реальные данные с имитационными моделями для определения прогнозов состояний реальных объектов. Разработка цифровых двойников для производства является следующим уровнем для исследования виртуальных заводов. Однако, это куда шире, чем просто производство оцифровки

конкретной фабрики. Ресурсы и деятельность цеха должны интегрироваться с цифровыми моделями путем обновления и моделирования полной функциональности производства всего жизненного цикла процессов и продуктов. Таким образом, следующим шагом была разработана целостная модель производственной системы, основанная на последовательном и гибком описании различных объектов: процессы, ресурсы, продукт [99, 103].

Одним из направлений разработки цифровых двойников стало моделирование роботизированной техники для улучшения алгоритмов управления и повышения конструкционных свойств в ходе разработки. В случае с роботизированной техникой на производстве – это эффективный источник информации для подготовки стратегических планов, прогнозов, масштабирования и тестирования различных условий настройки с целью повышения производительности, сводя к минимуму временные и финансовые затраты.

Также существуют экспериментальные цифровые двойники, которые имитируют эксплуатацию сложной системы. Изначально в этом направлении M. Schluse и J. Rossmann представили цифровые двойники на основе MATLAB©/Simulink для виртуального ввода с моделированием на системном уровне во время проектирования [137]. В их работе были представлены приложения для обслуживания на орбите космических аппаратов, локализации лесозаготовительных машин, систем помощи водителю и промышленной автоматизации. Было описано микроядро «Универсальная база данных моделирования», представляющее собой объектно-ориентированную базу данных реального времени [136].

В своих работах G. Grinshpun и др. описывают процесс применения цифрового моделирования на виртуальных испытательных стендах для разработки и внедрения робототехнической аппаратуры [100]. В рамках их работы первоначально была создана виртуальная установка для тестирования и оптимизации алгоритма в процессе моделирования. Эта установка включала в себя алгоритм действия используемого физического

манипулятора и прикладную виртуальную среду для его работы. Этот алгоритм тестировался и проверялся с использованием цифрового двойника в рамках моделирования. После успешного запуска в виртуальной системе алгоритм переносился на физическую установку.

Анализируя историю развития виртуальных двойников, видно, что движение в этом направлении началось в 1960х годах с использования в аэрокосмической отрасли. В данной отрасли осуществляется непрерывная симуляция во времени с использованием большого числа полетов при различных условиях для распознавания возникающих ситуаций и прогнозирования предстоящих требований к техническому обслуживанию. Важным условием является связь с бортовыми датчиками и устройствами для того, чтобы установить постоянную гармонизацию в зависимости от наземных ситуаций.

Е. Glaessgen и Р. Stargel предложили моделирование на основе технологии цифровых двойников для мониторинга производственных отклонений от номинальных для управления состоянием и историей технического обслуживания для авиации и космических приложений [97]. К. Reifsnider и Р. Majumdar представили цифровой двойник летающего космического аппарата для прогнозирования микротрещин на ранней стадии с использованием комплексного моделирования и бортовой системы управления состоянием [132].

В аэрокосмической сфере также стали появляться разработки различных решений, и одной из них, стала разработка модели механической структуры самолета, известная как планер Airframe Digital Twin (ADT) [144]. Планер ADT представлял собой вычислительную модель самолета, включающую в себя подмодели электроники, двигательных установок, управления полетом и другие. Его отличала высокая степень интеграции между подмоделями с точки зрения уровня точности по сравнению с обычными методами структурного моделирования. Дальнейшей разработкой было создание цифрового двойника на основе виртуального датчика

состояния объекта, с использованием метода конечных элементов FEM (Finite Element Method) и метода Монте-Карло с помощью программного обеспечения Damage and Durability Simulator (DDSim) для прогнозирования потребностей обслуживания [144]. За счет уменьшения неопределенности и увеличения количества служебной информации для ADT снижалась стоимости обслуживания.

Далее В. Gockel и др. предложили использование стратегии технического обслуживания по состоянию объекта с учетом его структурной целостности для определения высокоточных напряжений планера самолета путем записи всех полетных данных с помощью самописца [98]. В дальнейшем эти данные были использованы для запуска модели, определяющей временную динамику аэродинамической нагрузки, а затем полученная временная диаграмма применялась к цифровому двойнику. Программное обеспечение на основе FEM позволяло проводить анализ температуры, напряжений и деформаций. При помощи определенных точек измерений, совместно с маршрутами полета использовались для моделирования вычислительной гидродинамики.

На данном этапе началась интеграция системных моделей для обеспечения координации между механикой, электроникой, программным обеспечением, а также другими аспектами моделей и архитектур на протяжении жизненного цикла системы. В рамках такого подхода появилась общая модель системы с цифровым контуром (цифровой двойник). Используя концепцию цифрового двойника Bajaj предложил интеграцию системного и механического проектирования, в котором цифровой двойник был разработан на основе систем инженерного анализа CAE и с использованием математического описания в MATLAB®/Simulink.

Smarslok и другие предложили модели цифровых двойников, основанные на численном моделировании, для прогнозирования повреждений и срока службы летательных аппаратов. Они интегрировали множество неопределенностей в связанное структурное моделирование. Их

последователи добавили в созданный цифровой двойник механику усталости и расширенные фильтры частиц Калмана для оптимизации компоновки и моделирования взаимодействия человеко-машинного интерфейса (HMI) [141, 147].

1.3 Аналитический обзор применения систем роботизированных автомобилей для агротехнической промышленности

В современной аграрной промышленности необходимо использовать роботизированную технику для повышения производительности и увеличения доли механизации труда. Рост использования робототехники и автономных систем значительно повышает уровень развития «умного» сельского хозяйства. Кроме того, для увеличения производительности были разработаны многочисленные функциональные устройства с человеческими способностями, такие, как системы точного опрыскивания, роботы для сбора урожая, роботы для стрижки, машины для прививки, системы борьбы с сорняками, машины для пересадки и планирования пути. Интеллектуальные и автоматизированные системы для сельскохозяйственных операций необходимы для решения проблемы нехватки рабочей силы, выполнения повторяющихся задач, снижения риска для безопасности и здоровья человека при выполнении сельскохозяйственных работ и снижения производственных затрат за счет экономии времени, денег и энергии [79].

В отличие от промышленного производства, где многие операции являются относительно простыми, повторяющимися, четко определенными в стабильных и воспроизводимых средах, роботизация в сельскохозяйственной отрасли требует передовых технологий для работы в сложных и изменчивых средах [107]. Кроме того, сельскохозяйственная отрасль связана с живой продукцией: фрукты, овощи, зерно, цветы, которые достаточно чувствительны к изменениям физических и экологических условий: температуры, влажности, давления и прочего, что требует повышенной

точности и бережности при обращении с ней. Данные факторы несколько усложняют замену человека роботизированной техникой [94].

Последние два десятилетия также появлялись различные наработки в области сельского хозяйства и в основном они были посвящены взаимодействию человека-оператора и роботизированной системы. Внедрение человека-оператора в цикл работы роботизированной сельскохозяйственной техники позволяло повысить производительность, а также снизить сложность производственной системы. Так, уже в 1998 году R. Ceres и другими была разработана первая человеко-машинная система «AGRIBOT», которая помогала решить задачи движения робота по полю, от дерева к дереву или от ряда к ряду, обнаружения и локализации продукта, захвата и отделения выбранных продуктов [87]. В рамках дальнейших исследований определялось, что применение человеко-машинной системы улучшает показатели обнаружения продуктов, и, как следствие, повышает эффективность работы. Поэтому в 2009 году A. Bechar предложил разработанную целевую функцию для определения наилучшего уровня сотрудничества с учетом свойств человеко-машинной системы, задач, предъявляемых к ней и окружающей среды [78]. Описывая в 2016 году процессы взаимодействия, в своей работе M. Mann с соавторами предложил использовать две основные концепции: одна из них заключалась в синергии взаимодействия людей и роботов, а вторая в работе роботизированной техники без вмешательства человека-оператора [120]. Соответственно, в рамках этого подхода была предложена концепция полностью автономной роботизированной системы. Она разработана для выполнения задач, принятия решений и действий в режиме реального времени без вмешательства человека. Такие системы необходимы в некоторых областях, которые обычно требуют сокращения трудозатрат и рабочей нагрузки, и лучше всего подходят для приложений, требующих повторяемой точности и высокой производительности в стабильных условиях. В последние годы все больше исследований в области робототехники сосредоточено на мобильных

автономных системах в неструктурированной среде (в помещении и на открытом воздухе) [80].

Автономные транспортные системы, используемые в растениеводстве, состоят из множества подсистем и устройств, которые позволяют им работать и выполнять свои задачи. Эти подсистемы и устройства занимаются планированием пути, возможностями навигации или наведения, мобильностью, зондированием, рулевым управлением и контролем, манипуляторами или аналогичными функциональными устройствами. [105]. Сельскохозяйственные роботы, как правило, предназначены для выполнения конкретных «основных» сельскохозяйственных задач, таких как функции посадки, прополки, обрезки, сбор урожая, упаковки, погрузки и другие. Для выполнения «основных задач» требуются способности выполнять несколько «вспомогательных задач», например, локализация и навигация, обнаружение объекта, выполняемое действие и т. д. Информация и команды передаются между «вспомогательными задачами», а также между «вспомогательными» и «основными задачами». Каждая «вспомогательная задача» управляет одной или несколькими подсистемами и устройствами, при этом подсистема или устройство может обслуживать несколько «вспомогательных задач».

Для обеспечения автономности транспортного средства необходимо повышение уровня автоматизации. В таких системах датчики используются для самых разных задач, таких, как картографирование, локализация, навигация, наведение, обнаружение растений, распознавание и измерение параметров окружающей среды (включая почву, воду, воздух и растения). Они используются для поддержки принятия решений, операций, активации, выполнения задачи и оценки производительности робота. Разделение датчиков на категории может быть основано на их положении или информации, которую они измеряют. Внутренние датчики измеряют параметры состояний множества различных частей системы, например, энкодеры, сообщающие об углах шарниров или колес, акселерометры, измеряющие линейное ускорение или инерцию, и гироскопы, измеряющие

ускорение вращения. Внешние датчики, используемые в сельскохозяйственных роботах, собирают информацию об окружающей среде относительно состояния системы, о положении робота и локального позиционирования его различных компонентов с использованием GPS, ИК-излучения, машинного зрения, лазерного радара (ЛИДАР), ультразвуковых волн, гиперспектральных параметров окружающей среды. Среди этих внешних датчиков наибольшего успеха добились датчики машинного зрения и GPS [102]. Использование комплекса этих датчиков позволило увеличить уровень полезности при сборе информации об окружающей среде, что помогло расширить область функционирования, в том числе и в отраслях, таких как городская навигация, транспорт и т.п.

Следующей задачей для мобильной роботизированной машины является планирование движения, которое рассматривается как динамический процесс, включающий в себя взаимодействие между роботом и локальной средой. Планирование пути в сельскохозяйственной отрасли считается подзадачей навигации. Основная проблема планирования пути заключается в поиске качественного пути от исходной точки до пункта назначения, избегающего столкновений с препятствиями. Планирование пути являлось основной проблемой для разработки автономных транспортных средств и систем восприятия в современных приложениях робототехники. В рамках решения данной проблемы в статье [83] представлена разработка небольшого автономного автомобиля для полевых инспекций, позволяющий свести к минимуму влияния разведывающей деятельности на уплотнение почвы и урожай. Представленная система включает в себя камеру с GPS-приемником, зеркальную камеру, расположенную в передней части робота для извлечения центрального ряда в условиях неконтролируемого освещения в режиме реального времени, два нечетких контроллера для достижения визуальной навигации и алгоритма планирования пути с учетом контура поля и типа культуры для определения наилучшего маршрута проверки. Также в рамках решения вопроса планирования пути в работе [145] освещалась

разработка навигационного контроллера для мобильного робота-прополки, который следует установленным колеям колес на участке, чтобы минимизировать уплотнение почвы.

На основании проведенных исследований были выявлены недостатки автономной навигации сельскохозяйственных средств, такие как отсутствие всеобъемлющих стандартов для их применения, а также отсутствие решения вопросов эксплуатационной безопасности и отказоустойчивости. При увеличении числа автономных транспортных средств возможны незапланированные сбои в работе оборудования по различным причинам. Поэтому необходимым является разработка технической системы, которая охватит структуру системы, механизмы обнаружения исправности и надежность компонентов.

В настоящее время в сфере роботизации транспортных средств активно ведет разработки ПАО КАМАЗ. На базе автомобилей КАМАЗ создаются автономные средства для погрузочно-разгрузочных и транспортировочных работ.

Исследования по настоящей диссертации проводились в рамках НИР, выполненных СамГТУ совместно с ПАО «КАМАЗ», по Федеральной целевой программе по созданию роботизированного транспортного средства (РТС) [122, 124, 9, 60, 67].

Типы роботизированных транспортных средств для сельского хозяйства представлены на рисунке 1.2.

В диссертации используются следующие термины, обозначающие компоненты системы РТС:

- 1) РТС – роботизированное транспортное средство, обладающее высокой степенью автономности и автоматически выполняющее производственные операции;
- 2) РА – роботизированный сельскохозяйственный автомобиль на базе грузового шасси КАМАЗ, предназначенный для перевозки грузов на значительное расстояние (до 50 км);

- 3) АА – автономный или беспилотный автомобиль; это РА, управление которым осуществляется полностью без участия водителя;
- 4) Парк РА – группа роботизированных автомобилей, расположенная компактно и обслуживающая территорию в радиусе действия и управления РА;
- 5) РССА – роботизированная система РА, включающая парк автономных автомобилей, а также инфраструктуру получения и обработки информации, диспетчерские пункты, систему принятия решений, цифровые двойники и другие компоненты, сущность которых будет раскрыта далее в работе.

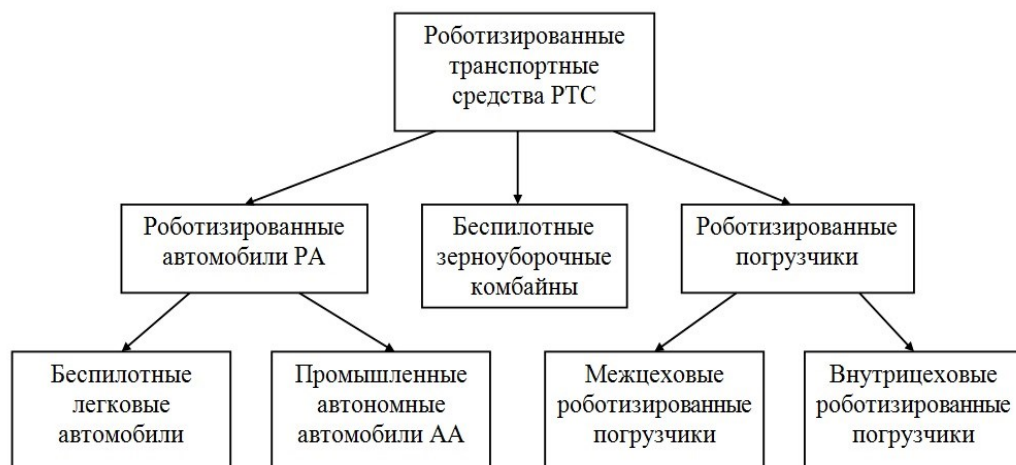


Рисунок 1.2 – Типы роботизированных транспортных средств для агротехнической промышленности

Роботизированный автомобиль модели КАМАЗ представляет собой сложный технический объект с множеством датчиков, измерительных подсистем и устройств передачи информации на диспетчерский пункт управления (ДПУ) всей системы РССА. Полученные значения датчиков роботизированного автомобиля, а также параметры внешней среды проходят первичную обработку с последующей передачей полученных данных в базу данных РА, а также в модель роботизированного автомобиля и модуль анализа параметров. На основании данных, получаемых от модуля первичной обработки, модель РА осуществляет коррекцию параметров узлов, агрегатов и систем РА. Результаты моделирования передаются в модуль анализа

параметров, откуда осуществляется запись информации в базу данных диспетчерского пункта, а также передача данных для прогнозирования износа и дефектов деталей. Прогнозирование дефектов осуществляется на основании данных, получаемых из базы данных РА и значений, передаваемых от модуля анализа параметров. На рисунке 1.3 показана общая структура «Роботизированный автомобиль – цифровой двойник». Такая насыщенная информационными устройствами организация дает возможность обеспечить управление не только движением, но и эксплуатационными режимами агрегатов автомобиля.

Роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей РССА, представленная на рисунке 1.4, обеспечивает управление парком транспортных средств, их движением, управление узлами и агрегатами транспортного средства при выполнении маршрута или отдельных заданий оператора [72].

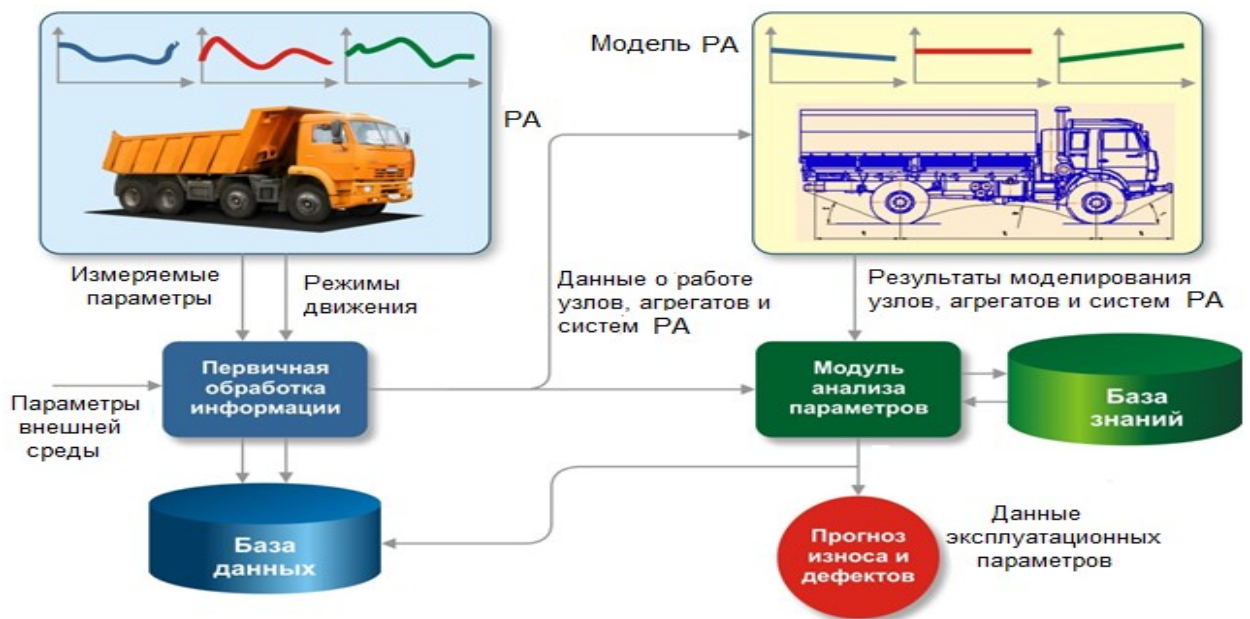


Рисунок 1.3 – Общая структура «Роботизированный автомобиль – Цифровой двойник»

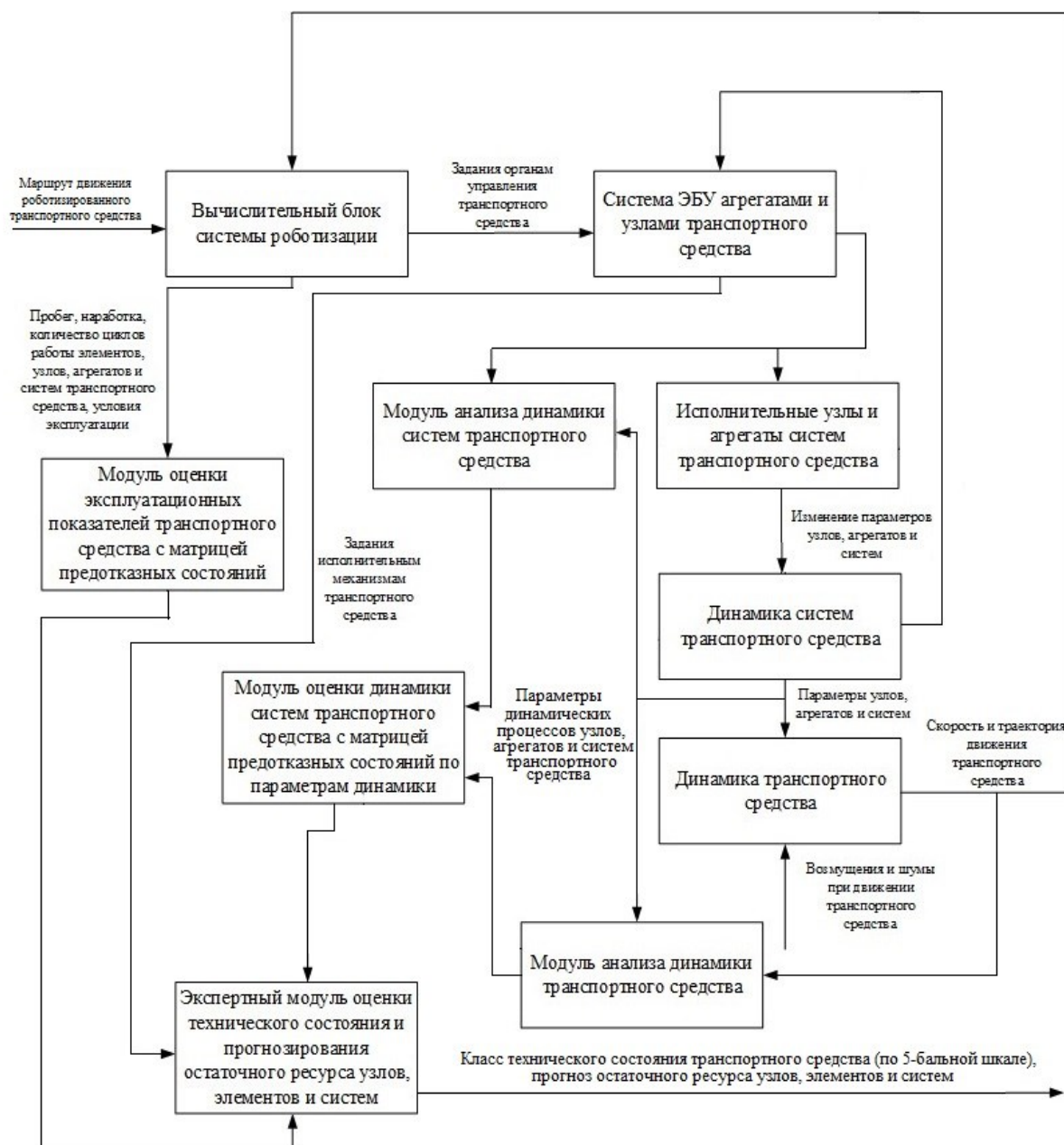


Рисунок 1.4 – Структурная схема системы управления техническим состоянием и остаточным ресурсом транспортного средства

Для управления движением группы роботизированного транспорта используется адаптивная система с модулем эмуляции движения группы РТС. В процессе движения проверяется соответствие параметров движения условиям сформированной программы в модуле эмуляции. Если возникает остановка хотя бы одного транспортного средства, система управления проверяет возможность реализации движения для других транспортных средств и выполнения заданий в соответствии с условием.

Кроме контроля остановок РТС система осуществляет контроль параметров транспортных средств, а также внешних условий эксплуатации: изменение погоды, параметров маршрутов и так далее, для обеспечения эффективности и безопасности выполнения заданий [72].

Наряду с системой формирования программы движения группы транспортных средств при использовании роботизированной техники требуется регулярный контроль за техническим состоянием сложной техники. Для решения этой задачи в рамках системы верхнего уровня предусмотрен отдельный модель мониторинга и прогнозирования технического состояния транспортных средств (рисунок 1.4).

Система управления техническим состоянием и остаточным ресурсом транспортного средства представляет собой каскадную структуру, содержащую эмуляторы, определяющие идеальные модели поведения параметров транспортного средства, на основании данных, полученных при его проектировании.

Определение остаточного ресурса заключается в оценке и анализе данных об эксплуатационных показателях (сравнение с паспортной наработкой с принятием во внимание условий эксплуатации транспортного средства), информации о параметрах и показателях динамических (в том числе переходных) процессов (с принятием во внимание максимального количества измеренных и восстановленных эмуляторами возмущений и параметров внешней среды), а также статистики и информации о накопленных данных в блоках управления агрегатами и системами транспортного средства (ошибки, диагностическая информация).

Для корректной работы системы предусмотрен механизм адаптации базы данных предотказных состояний, первоначально формируемой на основе экспертных знаний, с учетом эксплуатации и обслуживания (ремонт) подобных транспортных средств или транспортных средств, имеющих в своем составе аналогичные элементы, узлы, агрегаты или

системы с учетом ездовых циклов и условий эксплуатации (погода, климат, нагрузки, стиль вождения, качество дорожного покрытия и прочие внешние факторы).

Анализируя разработки в области роботизированных транспортных средств можно заметить, что большее влияние уделялось задаче маршрутизации транспортных средств, взаимодействию их с знаками и условиями дорожного движения, выполнению автономного движения, однако очень мало внимания уделяется надежности роботизированных транспортных средств, его доступности, ремонтпригодности и временной целесообразности технического обслуживания.

1.4 Модельно-ориентированное системное проектирование при создании системы роботизированных транспортных средств

Роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей РССА носит многоуровневый и многофункциональный характер. Следует отметить, что проектирование системы требует использования инструментов системного инжиниринга и объектно-ориентированных платформ для проектирования и разработки (рисунки 1.5 и 1.6). При проектировании РТС на основе автомобилей КАМАЗ был использован подход, базирующийся на методике модельно-ориентированного системного проектирования (MBSE-Model Based System Engineering) [71, 114]. На рисунке 1.5 показана взаимосвязь инструментов модельно-ориентированного проектирования применительно к РТС, а на рисунке 1.6 представлена V-модель жизненного цикла проектирования, которая была использована при разработке автономного автомобиля.

К процессу разработки роботизированной системы можно подойти по-разному.

1. Первый путь заключается в разработке сначала самой системы, а затем последовательно в разработке каждого элемента системы.

2. Второй путь заключается в изначальной разработке основных элементов системы, и в дальнейшей разработке на основе этих элементов общей системы.
3. Третий путь заключается в определении структуры всей системы и определении основных требований к ней, определении основных элементов системы и требований к ним, и только затем в разработке всей системы.

Применение в рамках разработки подходов системного инжиниринга и управления жизненным циклом с V-моделью



Рисунок 1.5 – Инструменты системного инжиниринга и объектно-ориентированных платформ для проектирования автономного автомобиля



Рисунок 1.6 – Цикл междисциплинарного проектирования транспортных средств

Рассматривая эти направления разработки необходимо учитывать сложность разработки одного из основных элементов системы – роботизированного транспортного средства для сельскохозяйственной отрасли. Разработка РТС требует постоянного контроля необходимых показателей, корректировки этих показателей в зависимости от получаемых результатов. В связи с этим, разработкой самой системы и её испытаниями необходимо заниматься на последнем этапе, когда будут известны все полученные характеристики основных элементов.

Рассматривая третий путь разработки, все исследования необходимо разбить на группы.

1. Исследования, связанные непосредственно с выполнением разработки самой роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей. Необходимо учесть, что часть работ необходимо провести на первом этапе, чтобы определить общую структуру всей

системы. Основные работы по разработке системы будут проводиться на заключительном этапе.

2. Исследования, связанные с разработкой основного элемента системы – роботизированного транспортного средства для сельскохозяйственной отрасли. Все работы необходимо разделить на работы теоретического и экспериментального характера. Работы теоретического характера необходимы для предварительного исследования и создания документации экспериментальных образцов, а экспериментальные работы необходимы для экспериментальных исследований разрабатываемых образцов и подтверждения заявленных характеристик.

Для разработки роботизированной системы автомобилей необходимо выполнить следующие работы:

- 1) разработка архитектуры роботизированной системы автомобилей агропромышленного комплекса на базе семейства автомобилей КАМАЗ с различными режимами управления, и дополнительной адаптированной системой диагностики;
- 2) разработка алгоритмов управления группой РТС агропромышленного комплекса;
- 3) составление программной документации на экспериментальный образец роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей (ЭО РССА) с различными режимами управления;
- 4) проведение исследовательских испытаний ЭО РССА.

Для создания роботизированного транспортного средства агропромышленного комплекса необходимо выполнить комплекс работ по:

- 1) анализу характеристик и моделированию движения РА для формирования требований к системе управления движением;
- 2) разработке деревьев отказов подсистем автомобиля, а также логической схемы надежности;

- 3) увеличению обучающей выборки алгоритмов машинного зрения, путем синтеза искусственных данных окружающей среды автомобиля;
- 4) формированию концепции системы диагностики и прогнозирования технического состояния при помощи инструментов сетевой концепции мониторинга парка автомобилей и модельно-ориентированного подхода;
- 5) обоснование эффективности предлагаемых к разработке методов моделирования системы управления робототехническим комплексом, алгоритмов сбора, обработки и анализа сенсорной информации, алгоритмов принятия решений.

1.5 Виртуальные испытания цифровых двойников как основной компонент виртуального запуска в эксплуатацию технических объектов

Техника агропромышленного комплекса часто работает в сложных условиях, таких, как низкая несущая способность грунтов, различные препятствия и уклоны, неблагоприятные погодные условия. Поэтому, при введении автономного автомобиля в технологические процессы агропромышленного комплекса, важно снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций, например, его опрокидывание. Для определения критических параметров, приводящих к таким ситуациям, следует проводить виртуальное моделирование процесса эксплуатации роботизированного транспортного средства. Во-первых, использование виртуальной модели агрегата позволяет выявить несоответствия требований и полученных основных технических характеристик, а во-вторых, благодаря виртуальным испытаниям можно выполнить отладку производственных процессов и оборудования на предприятии, выпускающем роботизированные транспортные средства.

В систему виртуальных испытаний входят:

- подсистема математического моделирования агрегатов;

- подсистема планирования эксперимента;
- подсистема визуализации процесса испытаний и документирования [52].

Общая структура системы виртуальных испытаний представлена на рисунке 1.7.

Здесь основой принятия решений служит экспертная система, которая содержит базу знаний математических моделей агрегатов с реализованной онтологией автомобильных агрегатов на базе шасси КАМАЗ, сочетающейся с методом поиска моделей, и интерфейс специалиста-аналитика, который помогает обеспечивать функционирование системы, изменять математические модели и модифицировать вывод виртуальных испытаний.

Данная система обеспечивает процесс вывода решений на основании фактов, полученных при реализации виртуальных испытаний [52].



Рисунок 1.7 – Общая структура системы виртуальных испытаний агрегатов:

$A_1, A_2, \dots, A_N$ – модели агрегатов; БД РВИ – база данных результатов виртуальных испытаний; РА – роботизированный автомобиль [52]

Информация для базы знаний экспертной системы формируется на основании математической модели исследуемого агрегата, идентифицируемой по значениям измеряемых величин, исходя из результатов виртуальных испытаний. База знаний является частью подсистемы математического моделирования, храня в себе информацию о математических моделях узлов, агрегатов и систем РА.

В подсистеме планирования эксперимента возможны несколько способов проведения виртуального эксперимента. Это проведение дробного или полного факторного эксперимента, а также центральное композиционное планирование. В данной подсистеме выбирается набор виртуальных моделей $A_1, A_2, \dots, A_N$ агрегатов роботизированного транспортного средства, который также может быть модифицирован в процессе самих испытаний.

Хранение, визуализацию и запись информации о проведенных виртуальных испытаниях обеспечивает база данных виртуальных испытаний (БД РВИ). База данных результатов виртуальных испытаний (БД РВИ) содержит следующую информацию:

- 1) название модели и типа агрегата автомобиля;
- 2) серийный номер;
- 3) конструктивные особенности агрегата;
- 4) год производства и сертификации;
- 5) производитель агрегата;
- 6) основные технические характеристики;
- 7) историю виртуальных и натурных испытаний, проводимых с данным экземпляром агрегата [52].

Система имитации работы роботизированного автомобиля может работать в двух основных режимах.

1. Режим виртуальной эксплуатации, в котором осуществляется имитация воздействия различных условий воздействия на агрегат, таких, как вид дорожного покрытия, осадки, температуры окружающей

среды, и режимов работы автомобиля: поездка с грузом, пустой автомобиль и так далее.

2. Режим виртуального производства, где осуществляется имитация производственных процессов по изготовлению агрегатов автомобиля, учитывающих результат проведенных виртуальных испытаний для изменения параметров проекта.

Имитационные испытания в рамках работы системы имитации проводятся на основании информации о математических моделях узлов, агрегатов и систем автомобиля, а также проектных расчетов. Для реализации имитационных испытаний инженер-испытатель задает режимы работы системы имитации роботизированного автомобиля, контролирует ход их проведения и формирует отчетную документацию. Таким образом, информационная подсистема для системы виртуальных испытаний содержит в себе базу знаний математических моделей и базу данных результатов виртуальных испытаний [68].

Общая структура алгоритма проведения виртуальных испытаний представляет собой последовательность следующих этапов:

- 1) выбор типа и модели агрегата для передачи соответствующей математической модели из базы знаний в систему имитации;
- 2) передача исходных параметров агрегата и данных условий эксплуатации в подсистему математического моделирования, для составления виртуальной модели агрегата A_j ;
- 3) выбор задачи испытаний, проведение расчета характеристик агрегата с последующим проведением виртуального эксперимента со случайной девиацией значений для определенной группы параметров;
- 4) выполнение в измерительных каналах имитации измерений параметров агрегата со случайными погрешностями, соответствующими реальным измерительным приборам автомобиля;

- 5) идентификация математической модели агрегата роботизированного автомобиля в соответствии с полученными результатами имитационного эксперимента;
- 6) если присутствует значительное расхождение значений, присутствует необходимость решения аналитика о модификации математической модели, и как следствие повторение этапов виртуального испытания с пункта 2;
- 7) по окончании виртуального эксперимента занесение данных в БД РВИ и формирование протокола испытаний для использования их в дальнейшем для графической иллюстрации взаимозависимостей параметров агрегата [52].

1.6 Задачи исследований по управлению виртуальными испытаниями системы роботизированных транспортных средств

Проведенный системный анализ показал, что проблема обеспечения высокой надежности роботизированных транспортных средств является актуальной. Наиболее перспективным подходом к повышению надежности является проведение виртуальных испытаний на этапах как виртуального ввода в производства, так и при реальной эксплуатации РТС. При этом решения по организации технического обслуживания и ремонта РТС должны объединять на цифровой платформе как задачи управления производственными процессами, так и имитационные модели динамики эксплуатации РТС.

В связи с этим сформулированы следующие задачи исследований, которые выполняются в настоящей диссертации.

1. Разработка комплекса цифровых моделей для управления виртуальными испытаниями РТС.
2. Формулировка и решение задачи оптимального назначения роботизированных транспортных средств на производственные операции в рамках заданного графика производственных работ.

3. Разработка имитационных моделей виртуальной и реальной эксплуатации роботизированных транспортных средств в различных условиях с учетом случайного характера износа и деградации параметров агрегатов и элементов РТС и при заданных вероятностных законах появления отказов.
4. Проведение экспериментальных исследований на имитационных моделях с выработкой рекомендаций по назначению РТС на работы, выбора стратегии и организации эффективного технического обслуживания и ремонта.

1.7 Управление виртуальными испытаниями роботизированных транспортных средств

Роботизированные транспортные средства, как беспилотные, так и с дистанционным управлением, являются сложной киберфизической системой, содержащей в себе агрегаты, подсистемы контроля, управления, передачи информации, а также системы диагностики и моделирования на основе «цифровых двойников». Современный подход к проектированию сложных производственных систем использует виртуальные испытания с использованием цифровых двойников. Целью виртуальных испытаний является проведение проверки проектных и организационных решений по техническому обслуживанию парка транспортных средств до производства РТС и начала реальной эксплуатации. Во время виртуального ввода в эксплуатацию объекта на цифровой модели осуществляется статистический эксперимент, который также позволяет оценить стоимость затрат, производительность транспортной системы, а также параметры надежности отдельных транспортных средств: наработка на отказ, остаточный ресурс, ремонтпригодность, вероятность появления различных отказов и т.д. [136].

Гибкие производственные системы (FMS) крупных предприятий включают внутреннюю транспортную структуру, которая, в совокупности с обрабатывающим оборудованием и складами, образует производственно-

логистическую систему. Парк роботизированных транспортных средств формируется для осуществления погрузочно-разгрузочных работ и транспортировки грузов в пределах территории предприятия. Ряд производств характеризуется значительной площадью территории, на которой осуществляются производственные работы. К ним можно отнести добычу полезных ископаемых, крупные складские комплексы, агропромышленные предприятия. В этом случае особенно актуальной становится задача организации технического обслуживания и ремонта транспортной техники с учетом значительного расстояния между сервисными центрами и местами выполнения производственных операций [12].

В диссертационной работе предлагаемые методики и модели рассматриваются на примере производственно-логистической структуры агропромышленного предприятия.

Для определения структуры управления виртуальными испытаниями необходимо, в первую очередь, смоделировать производственно-логистическую систему агропромышленного предприятия, которая использует парк роботизированных транспортных средств для проведения уборочных полевых работ. В производственно-логистической системе используются роботизированные транспортные средства двух видов:

- 1) роботизированные автомобили (РА), выполняющие функции транспортировки зерна;
- 2) беспилотные зерноуборочные комбайны (БК).

Схема производственных работ, выполняемых роботизированными транспортными средствами в рассматриваемой производственно-логистической системе представлена на рисунке 1.8 [59].



Рисунок 1.8 – Схема производственных работ, выполняемых РТС

Целью моделирования производственно-логистической системы является определение различных сценариев производственных программ и стратегий технического обслуживания и ремонта. На основании полученных сценариев можно составить необходимую номенклатуру РТС для использования по назначению, параметры оборудования сервисных центров, процедуры выполнения операций технического обслуживания и ремонта. Имитируя различные режимы эксплуатации при виртуальных испытаниях транспортных средств, можно планировать прогнозное техническое обслуживание в условиях значительной неопределенности [13].

1.7.1 Методика управления виртуальными испытаниями на основе оптимизационно-имитационного подхода и цифровых моделей

Существуют подходы к объединению задач оптимизации структуры проектируемой системы и оптимизации поведения элементов этой структуры в процессе функционирования. В работе [19] была предложена общая алгебраическая модель частично упорядоченной системы в виде тройки:

$$\Psi_L = \langle \Psi_a, \Psi_b, P_0(\Psi_a, \Psi_b) \rangle, \quad (1.1)$$

где Ψ_a – модель структуры системы, Ψ_b – модель, описывающая поведение системы; предикат функциональной целостности $P_0(\Psi_a, \Psi_b) = 1$, если существует взаимно однозначное преобразование моделей $\Psi_a \rightarrow \Psi_b$, и равен нулю в противном случае. При этом на множестве-носителе структурной модели Ψ_a определен частичный порядок [57].

Такая постановка отражает основные свойства упорядоченных структур, а также частичную упорядоченность событий, происходящих в исследуемой системе. В работах [48, 53] С.П. Орлов развил данную модель, вводя операции объединения и пересечения и рассматривая множества решеток, как на множестве-носителе структуры Ψ_a системы, так и на множестве-носителе модели поведения Ψ_b .

В настоящее время такая алгебраическая модель реализуется при оптимизационно-имитационном подходе, который был предложен и развит А.Д. Цвиркуном и В.К. Акинфиевым (ИПУ РАН, г. Москва) [2, 146]. Суть этого подхода в итеративной процедуре совместного анализа оптимизационной задачи построения структуры системы и имитационной модели функционирования сложной системы.

В диссертации используется понятие «цифровая модель», определяемая согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения».

Цифровая модель изделия – это система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых испытаний выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям [25].

В диссертации на базе оптимизационно-имитационного подхода предложена методика управления виртуальными испытаниями для определения различных сценариев управления производственными программами и стратегий технического обслуживания и ремонта РТС.

Методика опирается на цифровые модели и реализуется в виде итерации следующих этапов.

1. Формирование множества сценариев эксплуатации РТС и принятие в модели Г решений по составлению расписания работ G для заданного сценария.
2. Управление распределением РТС на работы с помощью решения оптимизационной задачи назначений (ОН) с соответствующими ограничениями. Задача ОН определяет первое приближение Ψ_H варианта распределения РТС в производственно-логистической системе.
3. Формирование иерархической имитационной модели (ИИМ) в виде дискретно-событийной системы функционирования роботизированных транспортных средств и исследование на ней работы комплекса РТС для проверки выполнения ограничений, связанных с динамикой производственного процесса.
4. Если требования к производственному процессу при имитационном моделировании не удовлетворены, проводится коррекция параметров ИИМ, изменение условий для ОН, либо корректировка графика работ Г и повторение пунктов 2–4.
5. Завершение процедуры виртуальных испытаний по определенному сценарию при достижении заданных значений критериев функционирования производственно-логистической системы. Переход к следующему сценарию.

В качестве дискретно-событийной модели целесообразно использовать сети Петри, с помощью которых эффективно осуществляется имитационное моделирование сценариев поведения системы, и выявляют ее структурные свойства, приводящие к конфликтным ситуациям [54, 57, 58].

Таким образом, в соответствии с поставленными в разделе 1 задачами, в дальнейшем был разработан комплекс цифровых моделей, который является цифровым двойником парка роботизированных транспортных средств и используется в системе поддержки принятия решений для управления производственно-логистическими процессами предприятия.

1.7.2 Этапы виртуальных испытаний РТС

Более детализировано предложенная в п. 1.7.1 методика управления виртуальными испытаниями на основе цифровых моделей раскрыта в виде следующих этапов.

1. В рамках цифровой модели подсистемы планирования на модели Г проводится составление календарно-сетевого графика G производственных работ, в которых будут использованы роботизированные транспортные средства. При решении задачи составления расписания транспортных средств необходимо учитывать время начала и окончания работ, их совмещение, время прохождения РТС контрольных точек маршрута, а также время, затрачиваемое на выполнение определенных операций, связанных с ТОиР.
2. На следующем этапе выполняется постановка и решение задачи оптимального назначения роботизированных транспортных средств на определенную последовательность работ на заданном маршруте. Для этого используются математические модели, входящие в модель назначений ОН. В блок задач, выполняемых РТС, входят погрузочно-разгрузочные работы, а также задачи транспортировки грузов. Выполняется управление ресурсосбережением и контроль над соответствием типа транспортного средства конкретному типу перевозок, а также соответствием его технического состояния и условий эксплуатации поставленным задачам. На этом этапе при формальной постановке задачи оптимизации используются аналитические ограничения на ресурсы в виде равенств и неравенств.
3. Управление производственными задачами и работой РТС выполняется с помощью цифровой модели эксплуатации ИИМ. Входящая в нее имитационная модель производственных операций учитывает передвижение транспортных средств, согласно условиям маршрута, и выполнение технологических операций. На этом этапе анализируются динамические ограничения: временные соотношения

событий, последовательности операций и другие условия, которые связаны с динамикой производственного процесса.

4. Управление задачами ТОиР производится с помощью имитационной модели, также входящей в состав цифровой модели ИИМ эксплуатации. При этом определяется стратегия технического обслуживания и ремонта роботизированных транспортных средств с учетом применения системы каннибализации и контроля количества резервных автомобилей и автомобилей, стоящих в очереди на получение запасных частей и ликвидацию поломки.

5. Коррекция параметров цифровых моделей проводится в случае несоответствия заданным требованиям к выполнению производственных работ.

6. Управление сценариями виртуальных испытаний заключается в выдаче полученных на цифровых моделях решений для анализа специалистами-экспертами и переходу на моделирование новых сценариев.

Общая схема методики управления виртуальными испытаниями на основе системных моделей роботизированных транспортных средств и системы технического обслуживания приведена на рисунке 1.9.

Обозначения на рисунке 1.9:

- вектор X – исходные данные для моделей Г, ОН и ИИМ;
- G_K – окончательный календарно-сетевой график работ;
- Ψ_{HK} – выходная булева матрица назначений РТС;
- $\Psi_{ИМК}$ – вектор выходных переменных ИИМ.

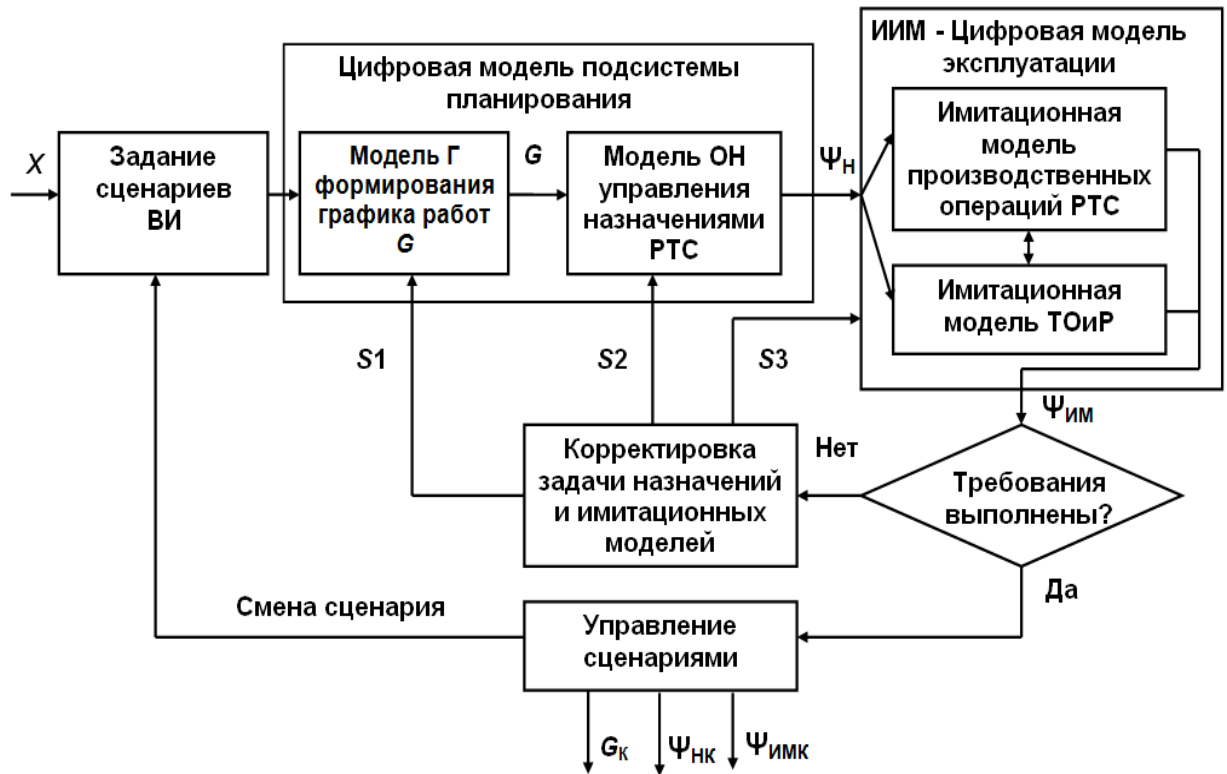


Рисунок 1.9 – Управление цифровыми моделями при виртуальных испытаниях

Корректирующие воздействия $S1$, $S2$, $S3$ — это векторы, элементы которых используются для изменения настроек соответствующих системных моделей:

- а) $S1$ определяет новые временные параметры для задачи расписания работ;
- б) $S2$ задает новые условия для оптимизационной задачи ОН назначения РТС (изменение числа резервных и каннибализируемых транспортных средств, изменение их технических параметров и т.п.);
- в) $S3$ меняет параметры ИИМ (производительность и скорость транспортных средств, время движения РТС и др.) и задает параметры вероятностных законов процессов износа агрегатов и событий отказов транспортных средств.

В блоке коррекции решения принимаются при участии группы аналитиков — специалистов по технологическим операциям и транспортным системам.

Комплекс цифровых моделей обеспечивает проведение виртуальных испытаний РТС при разных сценариях эксплуатации

Выводы

1. В рамках концепции «Индустрия 4.0» предусматривается переход на автоматизированное цифровое производство, которое в режиме реального времени с учетом взаимодействия с внешней средой будет управляться интеллектуальными системами. Элементами «Индустрии 4.0» непосредственно будут являться автоматизированные системы, Интернет вещей, киберфизические системы и большие данные, а также непосредственная виртуализация производства. В рамках последней компоненты виртуальные испытания используются как инструмент цифрового планирования для проверки высокоавтоматизированных систем в промышленности, а также киберфизических систем. В результате этого повышается экономическая эффективность, ускоряется процесс ввода в эксплуатацию, улучшается система тестирования аварийных ситуаций.

2. Системный анализ методов и моделей при проектировании сложных киберфизических систем показал высокую эффективность виртуальных испытаний при виртуальном вводе в эксплуатацию роботизированных транспортных средств.

3. Осуществление виртуального ввода в эксплуатацию выполняется с помощью цифровых двойников, в том числе и в виде имитационных моделей. Обзор методов виртуального ввода в эксплуатацию показал, что существуют методы, которые позволяют анализировать необходимость технического обслуживания и ремонта, однако, многие из методов не учитывают сложные условия эксплуатации РТС, например, в сельскохозяйственной отрасли. Для обеспечения эффективной работы роботизированного транспорта необходимо разработать цифровые модели, обеспечивающие оптимальное назначение РТС на производственные

процессы, и поддерживающие виртуальные испытания для организации ТОиР.

4. В диссертации разрабатываются цифровые модели и методика виртуальных испытаний, которые могут применяться для широкого круга транспортных систем. При этом иллюстрация использования разрабатываемых методов и средств проводится на примере роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей. Это обусловлено выполнением НИР по проекту Минобрнауки России по созданию агропромышленного роботизированного автомобиля КАМАЗ.

5. Так как роботизированная система сельскохозяйственных автомобилей носит многоуровневый и многофункциональный характер, необходимо использовать инструменты системного инжиниринга и объектно-ориентированные платформы для проектирования и разработки. При проектировании РТС на основе автомобилей КАМАЗ также был использован подход, базирующийся на методике модельно-ориентированного системного проектирования. Как следствие, путь решения выявленных проблем лежит в области создания гетерогенных цифровых моделей, которые будут являться научно-методологической основой для реализации работы системы поддержки и принятия решений по распределению, эксплуатации и техническому обслуживанию роботизированных транспортных средств на базе автомобилей КАМАЗ.

6. Применение оптимизационно-имитационного подхода способствует решению сложных задач оптимизации задачи, повышая эффективность эксплуатации роботизированных транспортных средств в производственных операциях агропромышленного комплекса.

7. Предложен комплекс цифровых моделей, включающий задачи построения графика работ, назначений РТС и имитационное моделирование производственных процессов для осуществления виртуальных испытаний роботизированных транспортных средств.

2 УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПРИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

2.1 Структура производственно-логистической системы агропромышленного предприятия

В связи с тем, что научные исследования, проводимые в диссертации, опираются на разработку роботизированных автомобилей КАМАЗ, решаемые задачи рассмотрены применительно к производственно-логистической системе агропромышленного предприятия. Целью моделирования производственно-логистической системы является определение различных сценариев производственных программ и стратегий технического обслуживания и ремонта. На основании полученных сценариев можно составить необходимую номенклатуру РТС для использования по назначению, параметры оборудования сервисных центров, процедуры выполнения операций технического обслуживания и ремонта. Имитируя различные режимы эксплуатации при виртуальных испытаниях транспортных средств, можно планировать прогнозное техническое обслуживание в условиях значительной неопределенности [13].

Формальное определение компонентов системы задается следующим образом:

- 1) $U = \{u_i\}, i = \overline{1, I}$ – парк беспилотных комбайнов, предназначенных для уборки зерна;
- 2) $A = \{a_n\}, n = \overline{1, N}$ – парк роботизированных автомобилей;
- 3) $P = \{p_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество полей, предназначенных для работ по уборке урожая;
- 4) $Z = \{z_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество работ по уборке K полей с зерновыми культурами;

5) $G = (Z, T_Z, Arc_Z)$ – диаграмма календарно-сетевого графика множества работ Z , где T_Z – множество заданных длительностей выполнения работ, Arc_Z – дуги между вершинами графа [13].

Таким образом, производственно-логистическая схема системы состоит из следующих основных компонентов.

1. Парк роботизированных автомобилей A , который состоит из трех групп:

- множество активных автомобилей A^A , находящихся в эксплуатации и выполняющих работы Z ,
- множество резервных автомобилей A^R , прошедших техническое обслуживание или ремонт и готовых к эксплуатации,
- множество каннибализируемых автомобилей A^C , предназначенных для снятия агрегатов и узлов и дальнейшей установки на активные автомобили.

При этом необходимо выполнение следующего условия:

$$A = A^A \cup A^R \cup A^C, A^R \cap A^C = \emptyset, \quad (2.1)$$

2. Парк зерноуборочных комбайнов U , который организован аналогично парку автономных автомобилей и состоит из групп комбайнов: активных эксплуатируемых U^A , резервных U^R и каннибализируемых U^C .

3. Дорожная структура, представляющая собой граф D топологии дорог, связывающих поля p_k , приемный пункт продукции и места базирования комбайнов, автономных автомобилей и сервисных центров.

4. Комплекс сервисных центров для технического обслуживания и ремонта, как роботизированных автомобилей, так и беспилотных зерноуборочных комбайнов. В состав этого комплекса могут входить мобильные сервисы для обслуживания транспортных средств непосредственно на полях или маршрутах.

5. Система поддержки принятия решений СППР по организации работ, распределения РТС и их технического обслуживания, которая базируется на цифровых двойниках транспортных средств и имитационных моделях производственных процессов.

Данная структура производственно-логистической системы для агропромышленного предприятия, осуществляющего производство зерновых культур, представлена на рисунке 2.1.

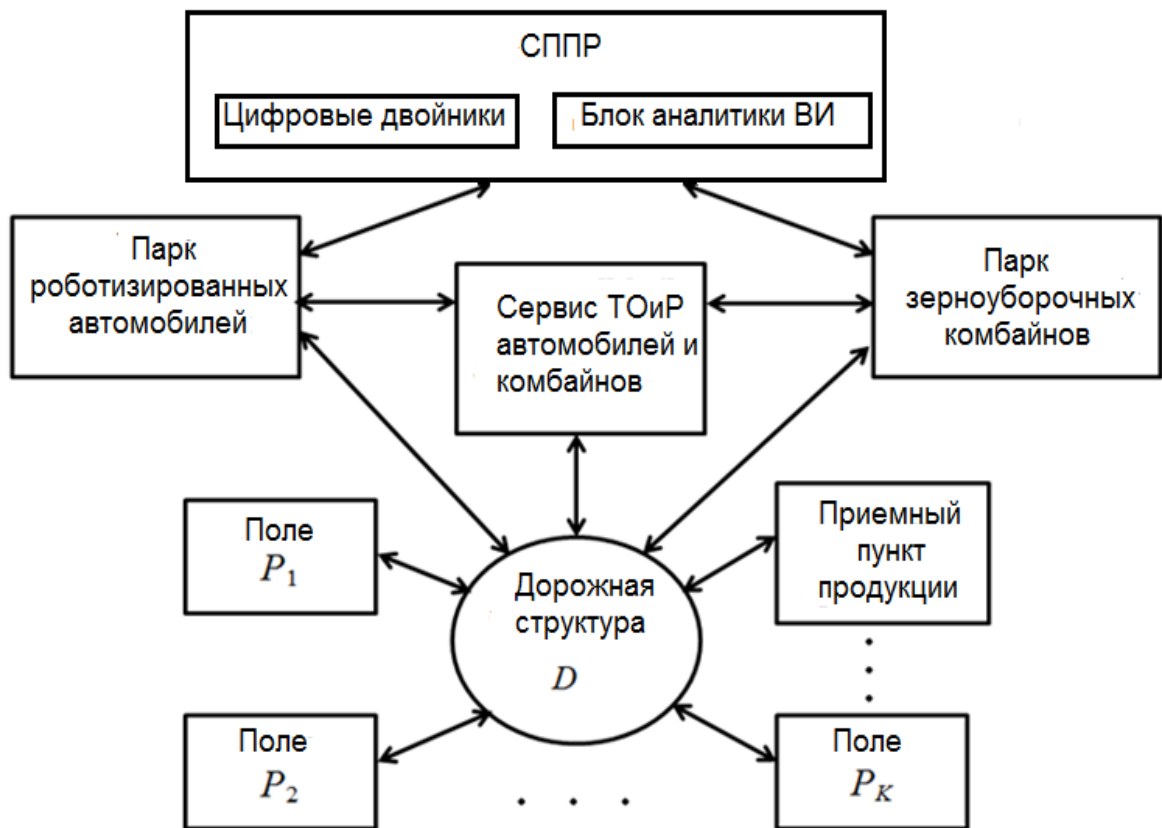


Рисунок 2.1 – Структура производственно-логистической системы агропромышленного предприятия зерновых культур

На основе построенной структуры производственно-логистической системы, формируется определенная иерархическая имитационная модель, структура и функциональные возможности которой раскрыты далее в разделе 3 диссертации. Такая модель позволяет исследовать динамику производственного процесса по уборке и транспортировке урожая, а также

динамику технического обслуживания и ремонта, как беспилотных зерноуборочных комбайнов, так и роботизированных автомобилей.

Реализация виртуальных испытаний на такой многоуровневой модели позволяет выявить оптимальную стратегию технического обслуживания и ремонта роботизированного транспортного средства.

2.2 Задача планирования графика производственных работ

В соответствии с общей схемой управления на рисунке 1.9 и функциями рассматриваемой агротехнической производственно-логистической системы (рисунок 2.1) в рамках цифровой модели подсистемы планирования РТС необходимо решить оптимизационную задачу по составлению календарно-сетевого графика G работ Z на полях P .

Ключевые показатели эффективности KPI:

а) целевая функция минимизации суммарного времени простоев зерноуборочных комбайнов:

$$\Delta T_w = \min\{\sum_i \sum_k \Delta T_{ik}^W\}, \quad (2.2)$$

где k и i – индексы полевых работ и комбайнов соответственно; ΔT_{ik}^W – время простоя при выполнении i -м комбайном работы z_k на поле p_k ;

б) минимизация максимального времени T_z выполнения всех работ Z сводится к поиску критического пути на графе G :

$$\min\{T_z = y_k - y_1\}, \quad (2.3)$$

$$y_r - y_k \geq t_{kr}, \forall v_{kr} \in Acr_z, \quad (2.4)$$

где v_{kr} – дуги между работами z_k и z_r , y_k – переменные, которые трактуются как ранние сроки завершения работ z_k , отсчитываемые от некоторого момента времени, общего для всех узлов сетевого графика G , t_{kr} – время выполнения операций.

Каждое ограничение (2.4) двойственной задачи связано с определённой работой, ограничения устанавливают отношения предшествования между

различными операциями. Решение задач (2.2) и (2.3)–(2.4) проводится с учетом плановых заданий и имеющихся ресурсов.

Определение расписания работ Z на полях P выполняется с помощью известных методов и программных пакетов [17, 31, 56, 59, 129] и не является задачей исследования настоящей диссертации.

В настоящее время используется ряд программных систем для управления проектами и производственными процессами. Наиболее широко известны продукты фирмы Microsoft. В частности, развитыми функциональными возможностями обладают локальная версия Microsoft Project 2021 и облачная версия Project, план 3.

Программа GanttPRO позволяет строить графики в виде диаграммы Ганта в онлайн-режиме и ориентирована на управление ресурсами и стоимостью. Возможно управление работой команды проектировщиков и обеспечение контроля времени.

PlanWIZARD – программный продукт, применяемый в строительстве. Благодаря данной программе уже на стадии предпроектных разработок можно получить стоимостную оценку проекта изделия, рассчитать последовательность производства работ, оценить потребности в ресурсах и составить необходимые графики,

В качестве примера на рисунке 2.2 показана диаграмма Ганта, построенная в Microsoft Project для работ по уборке 8 зерновых полей $P1 - P8$. Парк роботизированных автомобилей КАМАЗ состоит из 10 машин $PA1 - PA10$. На первом этапе создается график G , включающий работы:

- $Z1$ – профилактическое ТО, проводимое со всеми PA ;
- работы $Z2-Z5$ и $Z7-Z10$ по обслуживанию комбайнов на полях $P1-P4$ и $P5-P8$ соответственно;
- $Z6$ – прогнозное ТО, которое выполняется на основании анализа цифровых двойников PA ;

– Z11 – завершающее ТО после окончания всех работ на множестве полей.

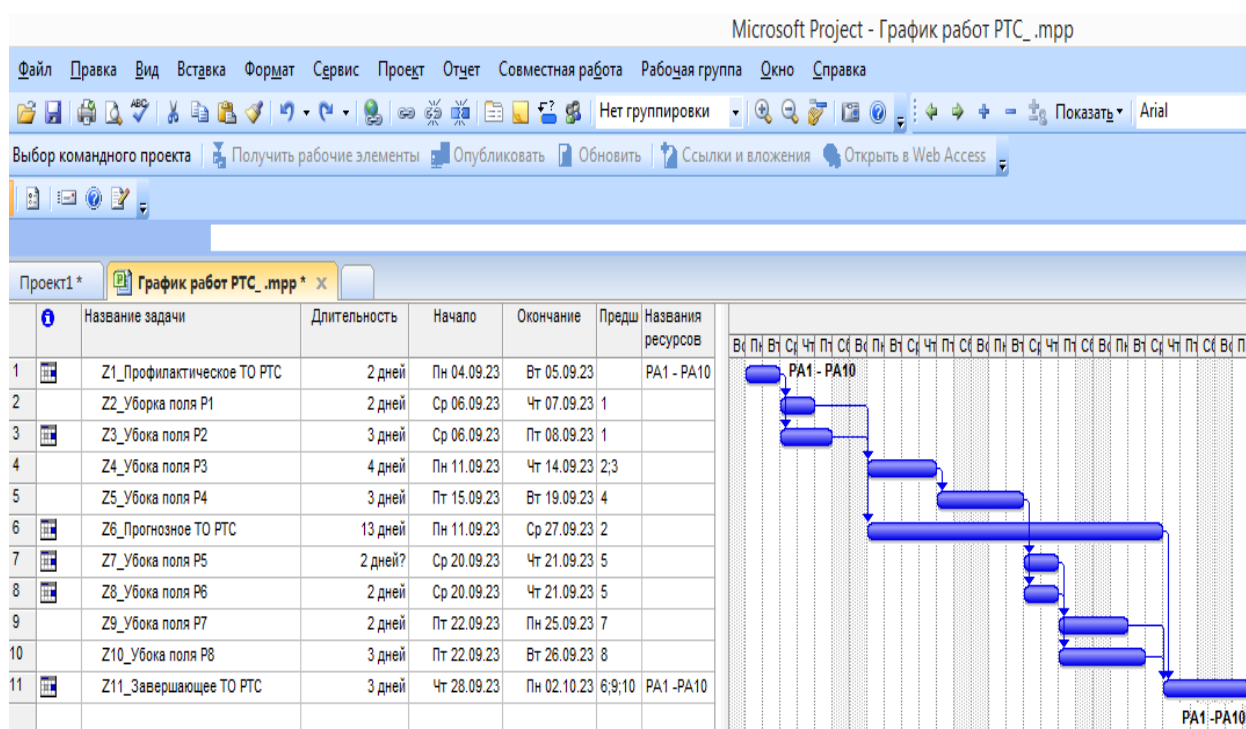


Рисунок 2.2 – Пример диаграммы Ганта для производственных задач с использованием РТС

Однако у перечисленных программ есть существенный недостаток. Распределение ресурсов по задачам производится практически в ручном режиме путем подбора назначений. При большой размерности планируемого графика работ это занимает много времени и не дает уверенности в эффективности решения. В диссертации предлагается выполнять распределение ресурсов роботизированных транспортных средств на базе решения задачи оптимальных назначений с соответствующими ограничениями.

На втором этапе решается оптимизационная задача распределения РА по конкретным задачам с учетом ресурсов и технических характеристик автомобилей.

2.3 Оптимизационная задача назначения роботизированных транспортных средств

Решение второй задачи, – оптимального назначения комбайнов U и роботизированных автомобилей A для выполнения работ Z на полях P в соответствии с графиком G , связано со спецификой рассматриваемой агропромышленной системы и требует новой постановки с учетом определяющих факторов и характеристик. Это обуславливает формирование новых ограничений для оптимизационной задачи.

Будем рассматривать минимизацию стоимости работ в производственно-логистической системе.

Булеву переменную оптимизационной задачи определим, как

$$x_{kin} = \begin{cases} 1, & \text{если для выполнения } k \text{ работы} \\ & \text{назначены } i \text{ комбайн и } n \text{ автомобиль;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция, определяется формулой

$$C_{kin} = \min\{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N c_{kin} x_{kin}\}, \quad (2.5)$$

где C_{kin} – стоимости выполнения операций комбайнами и роботизированными автомобилями.

Ограничения задачи имеют следующий вид:

а) назначение не меньше заданного числа β_k комбайнов, на работу на заданное поле p_k :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N x_{kin} \geq \beta_k, \forall n; k = \overline{1, K}; \quad (2.6)$$

б) время простоев транспортных средств должно быть меньше допустимого значения t_w :

$$|t_{ik}^R - t_{nk}^A| \leq t_w, \forall i, n, k; k = \overline{1, K}, \quad (2.7)$$

где t_{ik}^R – время работы комбайна до выгрузки зерна из бункера, t_{nk}^A – время транспортировки зерна на приемный пункт и возвращения автомобиля на поле k ;

в) условие соответствия загрузочных объемов комбайнов и роботизированных автомобилей:

$$V_i^U \leq V_n^A, \exists (i, n)(x_{kin} = 1), k = \overline{1, K}, \quad (2.8)$$

где V_i^U – объем бункера зерноуборочного комбайна, V_n^A – объем кузова автономного автомобиля;

г) технические характеристики комбайнов и автономных автомобилей должны лежать в допустимых границах:

$$q_{Um}^{min} \leq q_m^U \leq q_{Um}^{max}, m = \overline{1, M}, \quad (2.9)$$

$$q_{Al}^{min} \leq q_l^A \leq q_{Al}^{max}, l = \overline{1, L}, \quad (2.10)$$

где вектор $Q_i^U = (q_1^U, \dots, q_M^U)$ и вектор $Q_n^A = (q_1^A, \dots, q_L^A)$ – значения параметров для комбайнов и автомобилей соответственно;

д) ограничения на доступные ресурсы:

$$\sum_{i=1}^I x_{kin} \leq B_U, \forall k, n, \quad (2.11)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{kin} \leq B_A, \forall k, i, \quad (2.12)$$

где $B_U = |U| - |U^R| - |U^C|$ – количество комбайнов и $B_A = |A| - |A^R| - |A^C|$ – количество роботизированных автомобилей, доступных к вводу в эксплуатацию, которые зависят от задаваемых чисел резервных и каннибализируемых транспортных средств.

Условие (2.8) обеспечивает полную загрузку автомобилей. Если при этом в бункере комбайна остается зерно, то это не прерывает его работу до следующего прибытия роботизированного автомобиля. При несоблюдении условия (2.8) автомобили будут недогружены, что приведет к снижению средней эффективности логистических операций.

В результате решения оптимизационных задач (2.5)–(2.12) получаем булеву матрицу назначений Ψ_H роботизированных автомобилей и беспилотных комбайнов на работы, которые задаются календарно-сетевым графиком G . Полученное решение определяет структуру работ и статическое распределение ресурсов, но не описывает динамику процессов в режиме

эксплуатации в условиях значительной неопределённости внешней среды и вероятностного характера технических состояний транспортных средств.

В четвертом разделе диссертации приведены результаты решения задачи (2.6)–(2.12) для варианта производственно-логистической структуры агропромышленного предприятия, на котором проводились испытания роботизированных автомобилей КАМАЗ.

Выводы

1. Решение задачи целочисленного линейного программирования с булевыми переменными, позволяет получить оптимальное распределение роботизированных транспортных средств на различные задачи по уборке и транспортировке урожая агропромышленного комплекса.
2. Полученное решение используется как первоначальный вариант назначений РТС на производственные работы. Однако, в соответствии с предложенной выше методикой управления виртуальными испытаниями необходимо дополнительно анализировать динамику процесса эксплуатации РТС.
3. Направление дальнейших исследований связано с определением переменной структуры парка роботизированных транспортных средств и учетом факторов с высокой неопределенностью. Такой модели необходим базис на дискретно-событийных представлениях, поэтому ее реализация может осуществляться, например, с использованием аппарата сетей Петри.

3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВИРТУЛЬНОМ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

3.1 Модели на сетях Петри для исследования эффективности эксплуатации, технического обслуживания и ремонта транспортных средств

Актуальность эффективной организации ТОиР роботизированных транспортных средств при проведении производственных процессов все более повышается.

Основой для эффективной организации технического обслуживания стали разработки по построению систем принятия решений, а также программно-информационной поддержки для проведения ТОиР киберфизических систем. В работах [111, 112] был рассмотрен системологический подход к созданию мультиагентных моделей жизненного цикла, включающий в себя техническое обслуживание и ремонт. Для создания автоматизированной системы мониторинга и диагностики РТС в статье [82] было предложено использование алгоритмического подхода с применением моделей, описанных с помощью нечетких диаграмм поведения. Также в рамках исследований технического обслуживания и ремонта особое внимание обращалось на взаимодействие беспилотных ТС.

Эффективным инструментом для построения дискретно-событийных динамических моделей с формальным описанием ТОиР считаются сети Петри, так как их математическое и графическое основание является подходящим для имитационного моделирования с анализом параллельных процессов, включающих в себя дискретные события [92, 148]. Причина выбора связана с тем, что использование сетей Петри обеспечивает удобное, интуитивно понятное графическое представление жизненного цикла сложной системы, а также позволяет сделать ее гибкой и эффективной.

Поэтому именно сети Петри активно применяются для исследования гибких производственных систем (FMS). Особенно эффективно сети Петри работают при прогнозировании дефектов и отказов, о чем свидетельствует работы [133, 149]. В дальнейшем работы с применением сетей Петри использовались для исследования производственных систем с анализом процессов износа оборудования [93]. В [129] использованы высокоуровневые сети Петри для описания иерархической организации производственных структур. В процессах имитационного моделирования наиболее часто используются цветные или раскрашенные сети Петри CPN, временные сети TCPN и стохастические SCPN [125].

Так, цветные сети Петри применялись в работе [85] для формализации временных аспектов функционирования элементов в децентрализованном распределении задач. В дальнейшем в работе [130] было предложено расширение для сети Петри с целью моделирования событий рабочего процесса с учетом необходимых ресурсов. В рамках смоделированных сетей Петри были рассмотрены сценарии тестирования задержки для процедуры прогнозирования обслуживания с определенным количеством заданий и ресурсов в различных рабочих потоках.

Воздействие случайных внешних факторов в технологических процессах исследуется с помощью стохастических сетей Петри. В них реализуются модели случайных событий с заданными распределениями вероятностей их возникновения. В основном, стохастические цветные сети Петри применяются при оценке ремонтпригодности и надежности обширной группы объектов [125]. Примерами эффективного применения цветных сетей Петри являются: моделирование киберфизических систем в работе [115] и обслуживание системы совместного использования электромобилей в статье [103]. В этой статье предлагается дискретно-событийная имитационная модель для систем совместного использования электромобилей для анализа производительности с учетом сложного динамического поведения, организации и параметров, включая мощности

станций, батареи, расположение зарядных станций, а также деятельность по техническому обслуживанию автомобилей.

Дополнительным положительным свойством раскрашенных сетей Петри является реализация иерархических моделей сложных систем. В работах [138, 139] представлена разработка иерархических сетей для моделирования обслуживания воздушного флота. Реализация моделирования воздушного флота содержит иерархические модели процесса эксплуатации и технического обслуживания авиапарка. С помощью этих моделей решены задачи работы воздушного флота, многоуровневое техническое обслуживание с учетом политики каннибализации, графики технического обслуживания и управление резервом запасных частей.

Управлению расписанием автономных транспортных средств была посвящена работа [81], в ней были рассмотрены вопросы движения мобильного робота, размещение РТС на рабочей территории, а также взаимодействие человека с мобильным роботом. Однако, в ней не было уделено внимание процедуре обслуживания автономного автомобиля с учетом прогноза возникновения неисправностей и отказов.

3.2 Иерархические сети Петри для анализа процессов эксплуатации и технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей

Внедрение роботизированных автомобилей для агротехнических комплексов в логистические операции обусловлены, в том числе, большими площадями и удаленностью объектов производственного назначения. В связи с этим, появилась необходимость организации технического обслуживания и ремонта с учетом удаленности объектов от пунктов осуществления работ по ТОиР. Так как в роботизированных автомобилях развита бортовая система мониторинга и передачи данных, это позволяет применять прогнозное техническое обслуживание вместо периодического обслуживания. При разработке системы роботизированных сельскохозяйственных автомобилей

также важным шагом стало создание структуры системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного автомобиля.

При эксплуатации роботизированного автомобиля системой диагностики выполняется решение следующих задач.

1. Получение и обработка данных, получаемых с бортовых систем автомобиля, и хранение информации в облачном хранилище с последующим анализом достоверности и статистической обработкой.
2. Идентификация показателей функционирования узлов, агрегатов и подсистем РА с сопоставлением с соответствующими параметрами динамических моделей, адаптированных под процессы износа и деградации.
3. Анализ расхождения существующих параметров с модельными параметрами с выявлением предотказных состояний отдельных элементов.
4. Анализ статистики отказов узлов, агрегатов и систем с учетом истории эксплуатации РА для прогнозирования остаточных ресурсов автомобиля с учетом взаимовлияния элементов.
5. Формирование рекомендаций по проведению прогнозного технического обслуживания роботизированного автомобиля [123].

Для проведения статистического анализа параметрических характеристик роботизированного автомобиля, получаемых в процессе постоянного мониторинга, используются цифровые двойники узлов и агрегатов. При этом выполняются функции накопления и хранения данных, получаемых с датчиков систем РА и диагностики, обработка параметров для статистики функционирования, передача информации в базу данных для ведения учета, обработка данных в модуле аналитики для определения предаварийных состояний и проведения прогнозного ТО [73].

В настоящей диссертации разработаны имитационные модели системы роботизированных транспортных средств, работающие в составе «цифровых двойников» узлов и агрегатов. Общая иерархическая структура

имитационных моделей роботизированного автомобиля представлена на рисунке 3.1.

Функционирование системы роботизированных автомобилей относится к классу дискретно-событийных систем, в связи с этим для имитационной модели эффективно использовать временные раскрашенные сети Петри [85, 121].

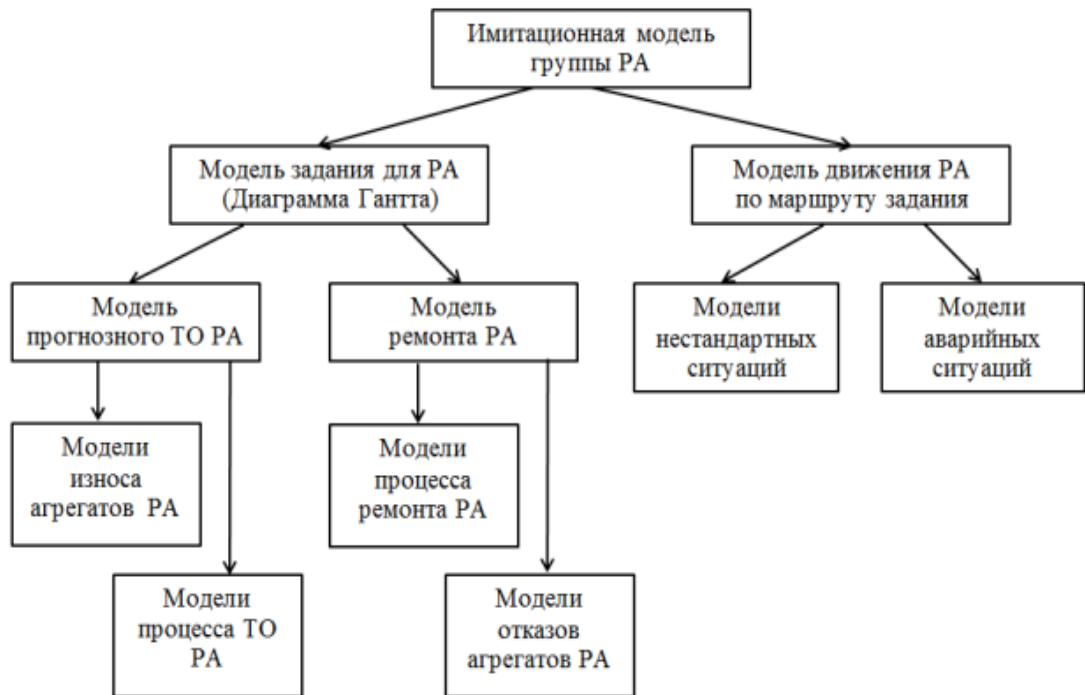


Рисунок 3.1 – Общая иерархическая структура имитационных моделей роботизированного автомобиля

Детализированная структура иерархической модели на сетях Петри для виртуальных испытаний при анализе технического обслуживания и ремонта РТС отражена на рисунке 3.2. Иерархия используемой модели напрямую связана с детализацией технологического процесса. Так, на верхних уровнях процесса выполняется имитация производственно-логистических операций, а именно, процесс уборки зерна на полях, дальнейшее передвижение роботизированных автомобилей по назначенным маршрутам. На нижних уровнях в модели представлены модули:

- описывающие производственные задачи $z_1 \dots z_K$ и функционирование роботизированных транспортных средств $u_1 \dots u_I$ и $a_1 \dots a_N$;
- имитирующие процессы появления отказов в отдельных транспортных средствах и процессы прогнозного технического обслуживания.

На верхнем уровне содержатся «цифровые двойники» агрегатов с описанием внутренней динамики функционирования, а также модель календарно-сетевого планирования и назначения, которая связывает график производственного процесса с назначением агрегатов на конкретные задачи в определенные периоды времени. На более низком уровне формируются имитационные модели сетей Петри по производственным операциям, а также операциям ТОиР. На основании моделирования можно определять остаточные ресурсы агрегатов, время работы после последнего обслуживания и ремонта, как следствие оставшееся время до технического обслуживания по расписанию, а также суммарное время наработки агрегата [55].

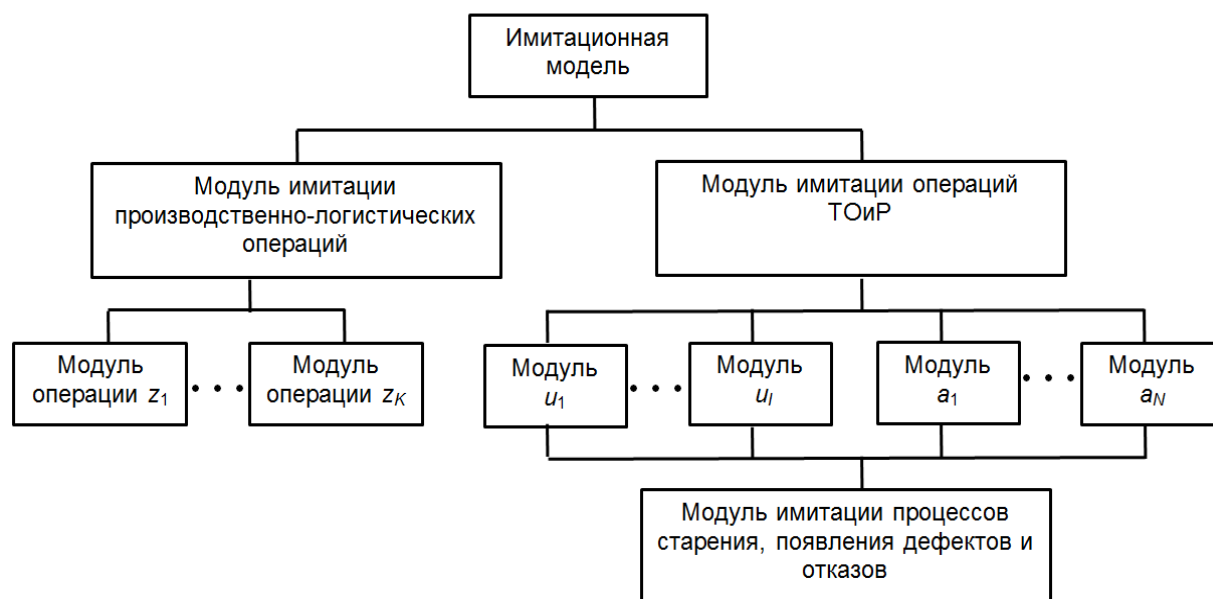


Рисунок 3.2 – Структура иерархической модели на сетях Петри для виртуальных испытаний РТС

Эта модель используется для управления виртуальными испытаниями транспортных средств в составе ИИМ, представленной на рисунке 1.9.

3.3 Имитационная модель эксплуатации роботизированного автомобиля КАМАЗ на стохастических временных раскрашенных сетях Петри

Реализацию имитационных моделей на базе сетей Петри удобно выполнять при помощи программного средства CPN Tools [32]. Данное средство имеет понятный язык программирования модели, позволяет имитировать различные законы распределения вероятностей возникновения событий, анализировать ресурсы для процессов, а также обладает развитым графическим интерфейсом.

Общее определение временной раскрашенной сети Петри TCPN SM представлено следующим образом:

$$SM = (C; B; P; T; A; V; F; w), \quad (3.1)$$

где C – конечное множество цветов; B – набор маркеров цветов $\in C$; P – конечное множество позиций $\{p_1, \dots, p_m\} \in P$; T – конечное множество переходов; V – конечное множество переменных $v(c) \in V$; F – конечное множество функций, используемых для описания действий на дугах, соединяющих позиции и переходы; $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – матрица инцидентности позиций и переходов; $w: T \rightarrow Z^+$ – функция времени срабатывания, которая присваивает положительное целое число каждому переходу в сети.

Разработанная иерархическая модель имеет гибкую структуру и базируется на использовании модулей, которые могут быть вложены друг в друга.

В общем виде модуль на сети Петри представлен на рисунке 3.3.

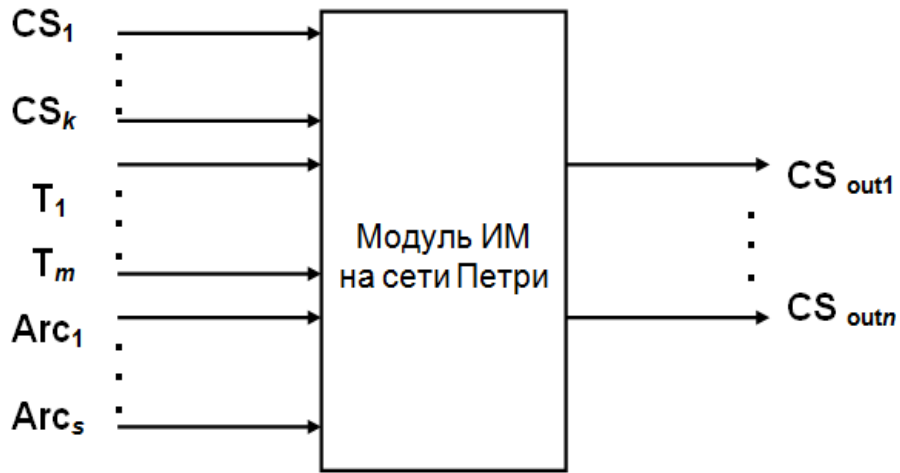


Рисунок 3.3 – Типовая структура входов и выходов модуля имитационной модели

Обозначения входов и выходов: $CS_1 - CS_k$ – мультимножества цветов во входных позициях модуля, задающие параметры модели; $T_1 - T_m$ – времена срабатывания переходов сети или вероятностные законы срабатываний, приписанные переходам; $Arc_1 - Arc_s$ – выражения на дугах сети Петри, описывающие вероятностные законы событий; $CS_{out1} - CS_{outn}$ – мультимножества цветов с измеряемыми параметрами модели.

Исследуемый объект, а именно роботизированный автомобиль, в раскрашенных сетях Петри описывается цветными маркерами в виде мультимножества. Формальное описание параметров роботизированного автомобиля с точки зрения ТО и ремонта представим в виде выражения мультимножества цветов:

$$CS_j = (id_j, md_j, mdf_j, MN_j, RUL_j, tra_j, b_j, tv_j), j = 1, \dots, J, \quad (3.2)$$

где J – число РА; id_j – индивидуальный номер автомобиля; md_j – модель роботизированного автомобиля; mdf_j – модификация модели РА; $MN_j = \{t_{Mjk}\}$ – множество периодов времени до ближайшего технического обслуживания агрегатов РА, час; $RUL_j = \{t_{Ljk}\}$ – множество значений остаточных ресурсов узлов и агрегатов РА, час.; tra_j – период работы РА с

момента активности; b_j – момент времени начала работы РА; tv_j – время общей наработки РА; $k = 1, \dots, K$ – число контролируемых агрегатов РА.

Для простых случаев рассмотрим описание роботизированного автомобиля как мультимножество $AV = \{n, "Model", mdf\}$. В случае, если в одной из позиций сети Петри, находится сразу несколько объектов, предусматривается операция сложения временных мультимножеств, которая обозначается следующими символами «+++». Так, например, присутствие в одной позиции сети Петри двух роботизированных автомобилей КАМАЗ второй и третьей модификации с индивидуальными номерами 5 и 10 отображается следующим образом:

$$AV1 +++ AV2 = \{5, "KAMAZ", 2\} +++ \{10, "KAMAZ", 3\} \quad (3.3)$$

Имитационная модель на временной раскрашенной сети Петри для исследования процессов технического обслуживания и ремонта роботизированных транспортных средств приведена на рисунке 3.4. Данная модель носит обозначение SM_{nm} , где n соответствует числу наборов задач, m – числу роботизированных автомобилей КАМАЗ в группе, которые закреплены за задачами из комплекса задач Z .

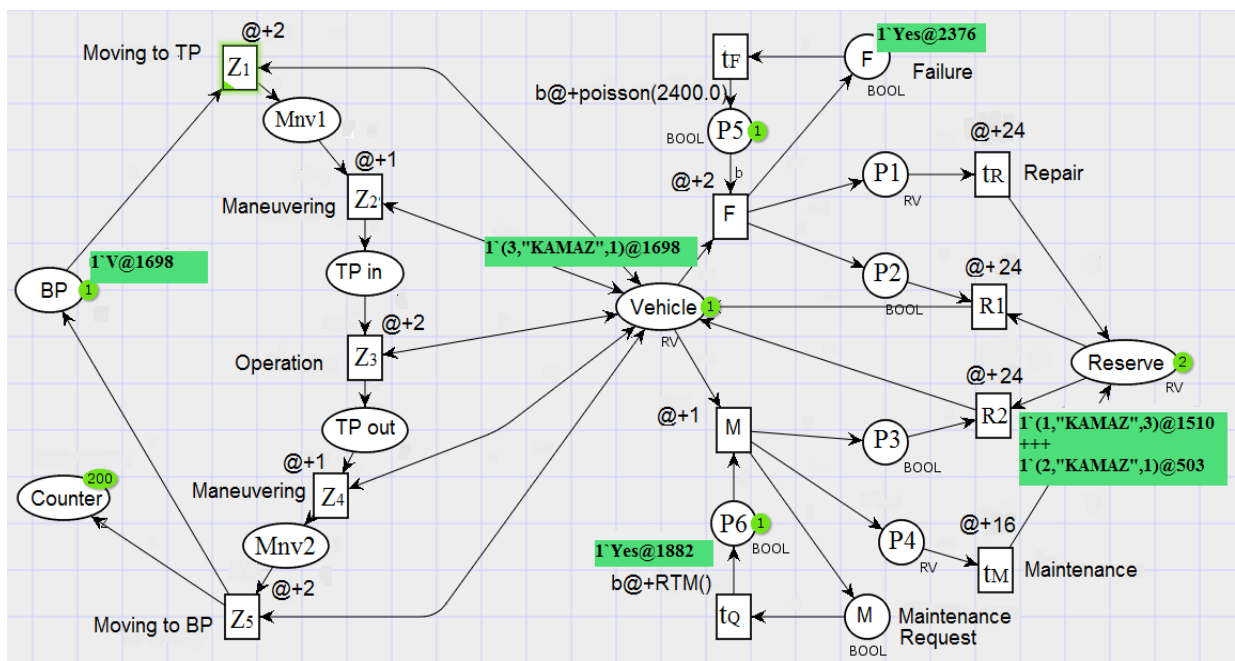


Рисунок 3.4 – Имитационная модель SM_{13} для исследования процессов технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей

Для представленной модели SM_{13} функционирует группа из трех роботизированных автомобилей КАМАЗ, где один автомобиль выполняет производственные задачи из комплекса задач $Z_1 - Z_5$, а два других находятся в позиции Reserve, то есть относятся к резервному транспорту. РА, которому разрешено выполнение задач, находится в позиции Vehicle. Для модели во временной сети Петри принято следующее соотношение модельного и реального времени, где такт модельного времени $1 MTU (model\ time\ unit) = 0,5$ часа. В сети имитационной модель SM_{13} для исследования процессов технического обслуживания и ремонта роботизированных автомобилей существуют 2 группы позиций и переходов, которые реализуют функции появления случайных событий:

- 1) появление отказов (Failure)
- 2) появление запросов на техническое обслуживание (Maintenance)

Их появление происходит в соответствии с прогнозными оценками состояния узлов и агрегатов РА, находящегося на маршруте. Как только в имитационной модели сети Петри генерируется запрос на техническое обслуживание или появляется отказ, РА выводится из эксплуатации и его заменяет исправный роботизированный автомобиль из резерва.

Таблицы 3.1 и 3.2 содержат описание переходов и позиций для имитационной модели SM_{13} для исследования процессов технического обслуживания и ремонта роботизированных транспортных средств.

Таблица 3.1 – Интерпретация переходов в имитационной модели SM_{13}
для исследования процессов ТОиР

Переходы	Значение и события
Z_1	Движение автомобиля к целевой точке маршрута (TP)
Z_2	Маневрирование автомобиля вблизи целевой точки маршрута (TP) после прибытия
Z_3	Выполнение технологической операции автомобилем на целевой точке
Z_4	Маневрирование роботизированного автомобиля при отбытии от TP

Окончание таблицы 3.1 – Интерпретация переходов в имитационной модели SM_{13} для исследования процессов ТОиР

Переходы	Значение и события
Z_5	Движение автомобиля к базовой точке (BP)
t_F	Инициирование события вывода автомобиля из эксплуатации из-за возникновения отказа его элемента
F	Вывод роботизированного автомобиля из текущей эксплуатации и его перемещение для ремонта
t_Q	Инициирование события для вывода автомобиля из эксплуатации при поступлении запроса на техническое обслуживание
M	Вывод автомобиля из текущей эксплуатации и его перемещение для ТО
t_R	Процедура проведения ремонта роботизированного автомобиля и его перемещение в резерв
t_M	Процедура проведения технического обслуживания РА и его перемещение в резерв
$R1$	Возвращение роботизированного автомобиля из резерва в эксплуатацию после ремонта
$R2$	Возвращение автомобиля из резерва в эксплуатацию после технического обслуживания

Таблица 3.2 – Интерпретация позиций в имитационной модели SM_{13}

Позиции	Значение
BP	Базовая точка расположения автомобиля и начало маршрута
$Mnv1$	Обозначение окончания движения по маршруту и готовность маневрирования вблизи ТР
$TP\ in$	Прибытие роботизированного автомобиля в целевую точку и готовность к выполнению операций
$TP\ out$	Отбытие автомобиля из целевой точки и готовность к маневрированию
$Mnv2$	Обозначение окончания маневрирования и готовность к движению по маршруту
$Counter$	Счетчик циклов выполнения задач
$Vehicle$	Содержит номер роботизированного автомобиля в данный момент, который доступен и готов к выполнению операций.

Окончание таблицы 3.2 – Интерпретация переходов в имитационной модели SM_{13}

Позиции	Значение
F	Индикация появления отказа
M	Индикация появления запроса на техническое обслуживание
$Reserve$	Множество доступных резервных автомобилей, готовых к выполнению операций
$P1, P2, P3, P4$	Вспомогательные позиции
$P5$	Разрешение на вывод роботизированного автомобиля на ремонт
$P6$	Разрешение на вывод роботизированного автомобиля на техническое обслуживание

Для оценки качества функционирования роботизированных транспортных средств использовались следующие показатели:

- коэффициент сдвига срока завершения цикла производственных задач $K_Z = T_{SM}/T_{SI}$, где T_{SM} – время выполнения работ на модели, T_{SI} – идеальное время (без отказов и ТО);
- задержка Δ выполнения производственных задач;
- количество резервных роботизированных автомобилей, необходимых для минимизации задержек выполнения задач, связанных с ремонтом или техническим обслуживанием.

Появление отказов в имитационной модели SM_{13} происходит по закону Пуассона, а запросы на техническое обслуживание имитируются генератором случайных событий с равномерным распределением в заданном временном диапазоне.

Рисунок 3.4 демонстрирует состояние модели после 200 циклов выполнения задач из комплекса Z . В результате, общее время выполнения T_{SM} составляет 1698 тактов. «Идеальное» время, то есть время без затрат на ликвидацию отказов и техническое обслуживание, для данной модели T_{SI} должно было составить 1600 тактов.

Исходя из этого, на замену вышедшего из строя агрегата и вывод из эксплуатации роботизированного автомобиля КАМАЗ было затрачено 98 тактов модельного времени, что составляет 49 часов. За 800 часов реального времени в позицию Reserve поступили два роботизированных автомобиля: один из них поступил после технического обслуживания через 251,5 часа, второй через 755 часов после выполнения ремонта. Модель также способна показать, в какое время роботизированный автомобиль будет выведен из эксплуатации:

- а) техническое обслуживание потребуется через 941 часа;
- б) ремонт будет нужен через 1188 часов.

В таблице 3.3 представлены результаты эксперимента на модели SM_{13} для различного количества резервных роботизированных автомобилей.

Таблица 3.3 – Результаты имитационного моделирования на модели SM_{13} при интенсивности отказов $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-3}$, 1/час и среднем времени до технического обслуживания $T_{mo} = 360$ ч

Число циклов	Время цикла, ч	T_{SI} , ч	T_{SM} , ч	K_Z	Превышение срока задания Δ , ч	Резерв РА, ед.
200	4	800	849	1,06	49	2
200	4	800	874	1,09	74	1
200	4	800	897	1,12	97	0
400	4	1600	1645	1,03	22,5	2
400	4	1600	1675	1,05	37,5	1
400	4	1600	1707	1,07	53,5	0

Для проведения эксперимента использовалось два варианта заданного времени циклов операций РТС в агротехническом комплексе: 800 и 1600 часов. Моделирование осуществлялось при помощи статистических испытаний. На основании результатов имитационного моделирования, представленного в таблице 3.3, получены значения сдвига сроков завершения

производственных задач при различном количестве резервных роботизированных транспортных средств, которые изображены на рисунке 3.5.

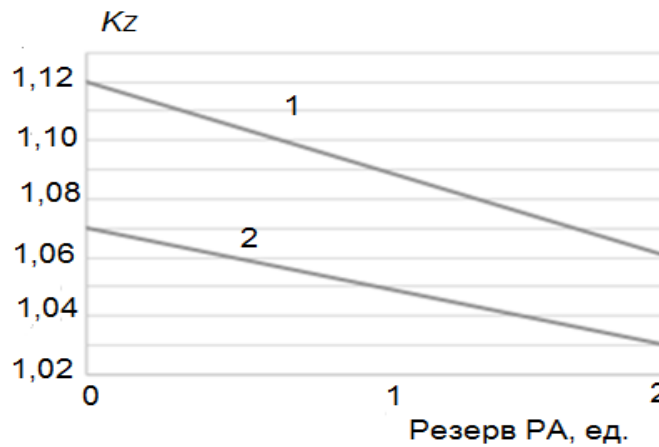


Рисунок 3.5 – График зависимости коэффициента сдвига от количества резервных автомобилей

В зависимости от уменьшения резерва РТС задержка увеличивается, однако в случае повышения количества резервных транспортных средств будет расти время простоя автомобиля, и, следовательно, расти стоимость образования резервного парка и потери от остановки выполнения заданий.

3.4 Вероятностные законы для процессов износа и отказов агрегатов роботизированного автомобиля

В связи со сложными условиями работы роботизированных транспортных средств в сельскохозяйственной отрасли, важной задачей является повышение надежности работы системы транспортного средства. Поддержание высокой работоспособности автомобиля достигается путем своевременного технического обслуживания и ремонта роботизированного автомобиля. Также совершенствование управления техническим состоянием роботизированного автомобиля помогает повысить эффективность эксплуатации.

Проведенный в работе [38] анализ показывает, что использование ресурсов автомобиля происходит не в полном объеме, это ведет к денежным

и трудовым потерям в связи с проведением преждевременного технического обслуживания, то есть технического обслуживания до перехода агрегатов и систем автомобиля в состояние использования остаточного ресурса. Причиной, приводящей к такой ситуации, является, в основном, недостаточное количество информации о техническом и ресурсном состоянии подсистем, агрегатов автомобилей [38].

Для удобства прогнозирования временных затрат на обслуживание и ремонт, необходимо разработать возможные модели отказов роботизированных средств и определить вероятность возникновения отказов в условиях эксплуатации транспортного средства.

Основной группой отказов, имеющих место в роботизированных транспортных системах, являются эксплуатационные отказы, возникающие в результате нарушения условий эксплуатации, недопустимых перегрузок устройств и агрегатов. Необходимо рассмотреть два вида отказов: а) внезапные/аварийные отказы и б) постепенные отказы, связанные с деградацией узлов и элементов объекта. Для роботизированного транспортного средства характерно как естественное старение и изнашивание деталей, так и резкий выход из строя в рамках влияния случайного внешнего фактора.

При анализе соответствующей системы отказов элементов транспортного средства необходимо рассматривать каждую систему отдельно. В данной схеме представлены отказы основных элементов роботизированного автомобиля, наиболее часто встречающиеся виды поломок, требующих срочного ремонта или замены деталей. По сложности устранения отказы подразделяются на следующие основные группы.

1. Отказы первой группы сложности, которые устраняются заменой или ремонтом деталей, расположенных снаружи сборочных единиц или агрегатов. Устранение этих отказов осуществляется за 2-4 часа.
2. Отказы второй группы сложности, которые устраняют заменой или ремонтом легкодоступных сборочных единиц или агрегатов, с

раскрытием внутренних полостей основных подсистем. Устранение этих отказов осуществляется за 6–8 часов.

3. Отказы третьей группы сложности, устраняющиеся разбором в стационарных условиях основных агрегатов автомобиля (двигатель, ведущие мосты, коробки передач). Данный вид отказов требует времени на устранение порядка 12–18 часов [23].

В качестве примера рассмотрим систему коробки передач автономного транспортного средства. В роботизированном транспортном средстве используется коробка передач – автоматизированная ZF Tronic (типа ZF 12AS2330 TO). Управление КП – автоматическое, дистанционное. Плановое техническое обслуживание для данной трансмиссии рекомендуется выполнять каждые 60–80 тыс. км, а капитальный ремонт обычно нужен после отметки 300 тыс. км. Нарботка на предотказное состояние элементов системы коробки передач представлена в таблице 3.4. Элементы взяты из отчета по НИР КАМАЗ за 2020 год [59].

При длительной эксплуатации автоматической коробки передач ZF Tronic могут возникнуть следующие неисправности:

- 1) затруднения при переключении передач;
- 2) самопроизвольное отключение передач;
- 3) утечка масла.

Для моделирования отказа в процессе эксплуатации роботизированного автомобиля необходимо также математически описать возникновение отказов в элементах коробки передач. Для коробки передач существуют основные элементы, в которых происходят отказы: сцепление, подшипники, шестерни, валы, синхронизатор, прочее.

Для математического описания необходимо знать данные о наработке на отказ для автоматической коробки передач, установленной в роботизированном транспортном средстве. Характер величины наработки до отказа T может быть описан с помощью определенного закона распределения вероятностей $P(t)$. Установлено в результате экспериментов, что функции

наработки на отказ технических средств автоматизации во многих случаях могут быть представлены небольшим числом законов распределения: экспоненциальным, Вейбулла, нормальным, Пуассоновским, а также суперпозицией и аппроксимацией этих законов [3].

В случае с элементами роботизированного транспорта, в частности, для коробки передач, наиболее подходящим является распределение Вейбулла. Оно наиболее эффективно используется для оценки надежностей узлов и деталей машин, подходит для описания наработки деталей по усталостным разрушениям и наработки до отказа, особенно для объектов, где преобладают отказы от износа.

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы, в случае, когда наработка до отказа описывается распределением Вейбулла, определяется выражениями (3.4) и (3.5):

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t^a}{b}\right), \quad (3.4)$$

$$\lambda(t) = \frac{a}{b} t^{a-1}. \quad (3.5)$$

В таблице 3.4 представлены основные показатели надежности распределения Вейбулла, совмещенные со временем реальной наработки до предотказного состояния.

Таблица 3.4 – Основные показатели надежности автоматизированной коробки передач ZF Tronic PTC КАМАЗ с реальным значением времени наработки до предотказного состояния элемента

№	Элемент КПП	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов $\lambda(t)$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, ч
1	Подшипник трансмиссионного тормоза	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 24,7 \cdot 10^{-6}$	40 500
2	Вал трансмиссионного тормоза	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 12,5 \cdot 10^{-6}$	80 000

Продолжение таблицы 3.4 – Основные показатели надежности
автоматизированной коробки передач ZF Tronic PTC КАМАЗ с реальным
значением времени наработки до предотказного состояния элемента

№	Элемент КПП	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов $\lambda(t)$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, ч
3	Шестерня трансмиссионного тормоза	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
4	Шестерня первой передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 21,5 \cdot 10^{-6}$	46 500
5	Подшипник шестерни первой передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
6	Шестерня второй передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
7	Подшипник шестерни второй передачи	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
8	Шестерня третьей передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
9	Подшипник шестерни третьей передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 23,3 \cdot 10^{-6}$	43 000
10	Шестерня четвертой передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
11	Подшипник шестерни четвертой передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 24,4 \cdot 10^{-6}$	41 000
12	Подшипник входного вала	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
13	Подшипник выходного вала	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 24,7 \cdot 10^{-6}$	40 500

Продолжение таблицы 3.4 – Основные показатели надежности
автоматизированной коробки передач ZF Tronic PTC КАМАЗ с реальным
значением времени наработки до предотказного состояния элемента

№	Элемент КПП	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов $\lambda(t)$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, ч
14	Шестерня переднего делителя	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 23,5 \cdot 10^{-6}$	42 500
15	Подшипник шестерни переднего делителя	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 23,3 \cdot 10^{-6}$	43 000
16	Шестерня заднего делителя	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 24,4 \cdot 10^{-6}$	41 000
17	Подшипник шестерни заднего делителя	$P(t)=0,95$ $\lambda(t) = 22,2 \cdot 10^{-6}$	45 000
18	Шестерня синхронизатора первой передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 23,5 \cdot 10^{-6}$	42 500
19	Муфта синхронизатора первой передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 24,7 \cdot 10^{-6}$	40 500
20	Шестерня синхронизатора второй передачи	$P(t)=0,95$ $\lambda(t) = 22 \cdot 10^{-6}$	45 500
21	Муфта синхронизатора второй передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 24,3 \cdot 10^{-6}$	41 000
22	Шестерня синхронизатора третьей передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
23	Муфта синхронизатора третьей передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 24,3 \cdot 10^{-6}$	41 000
24	Шестерня синхронизатора четвертой передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000

Окончание таблицы 3.4 – Основные показатели надежности
автоматизированной коробки передач ZF Tronic PTC КАМАЗ с реальным
значением времени наработки до предотказного состояния элемента

25	Муфта синхронизатора четвертой передачи	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 22,5 \cdot 10^{-6}$	44 500
26	Привод сцепления	$P(t)=0,97$ $\lambda(t) = 12 \cdot 10^{-6}$	83 000
27	Диск сцепления	$P(t)=0,91$ $\lambda(t) = 36,2 \cdot 10^{-6}$	27 600
28	Муфта сцепления	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 23,3 \cdot 10^{-6}$	43 000
29	Пневмоклапаны	$P(t)=0,94$ $\lambda(t) = 23 \cdot 10^{-6}$	43 500
30	Цилиндры делителя	$P(t)=0,96$ $\lambda(t) = 16,6 \cdot 10^{-6}$	60 000
31	Цилиндр исполнительного механизма	$P(t)=0,96$ $\lambda(t) = 14,7 \cdot 10^{-6}$	68 250
32	Муфта подкачивающего насоса	$P(t)=0,95$ $\lambda(t) = 21 \cdot 10^{-6}$	47 500
33	Радиатор охлаждения	$P(t)=0,97$ $\lambda(t) = 11,9 \cdot 10^{-6}$	84 000

Для расчета интенсивности отказов и вероятности безотказной работы коробки передач, необходимо определить взаимосвязь элементов и последовательность их выхода из строя. Для удобства представления воспользуемся методом Failure modes and effects analysis (FMEA) для автоматической коробки передач ZF Tronic. Согласно определению, FMEA – метод, в котором объект или процесс разбивают на элементы и для каждого

элемента по очереди идентифицируют и анализируют виды отказов и их последствия. Анализ позволяет выявить все необходимые улучшения путем устранения неблагоприятных последствий или снижения их вероятности и/или значимости [22].

Одним из элементов, удобным для графического представления, служит дерево отказов, которое представляет собой логическую схему причинно-следственных закономерностей возникновения отказа в агрегате роботизированного транспортного средства, которое способно отразить последовательность и сочетание различных отказов элементов, которое приходит к общему выходу из строя агрегата. С помощью него определяется количественное выражение риска методом дедукции.

Исходя из этого структура имеет основное событие, которое вытекает из набора соответствующих нижестоящих событий, образующих причинные цепи. Связь между событиями в узлах «дерева отказов» отображается при помощи логических элементов. Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий. При составлении дерева отказов первичный отказ изображается в виде круга, а результирующее событие в виде прямоугольника.

На рисунке 3.6 представлено дерево отказов для автоматизированной коробки передач ZF Tronic PTC КАМАЗ с указанием вероятности отказов элементов.

При расчете вероятности результирующего события $Q(A)$, а именно отказа коробки передач, необходимо учитывать логические элементы, связывающие вероятности первичных отказов. Вероятность первичного отказа элемента будет определяться как

$$Q(t) = 1 - P(t), \quad (3.6)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы элемента, представленная в таблице 3.5.

Вероятность $Q(A)$ выходного события, то есть вероятность отказа коробки передач, при независимости входных событий $A_1, A_2, \dots, A_n$ для наличия знака «ИЛИ» будет иметь вид:

$$Q(A) = 1 - \prod_{i=1}^4 [1 - Q(A_i)], \quad (3.7)$$

где $Q(A_i)$ – вероятность события A_i (первичный отказ элемента).

На основании формулы 3.4 и дерева отказов рассчитаем общую вероятность отказа автоматизированной коробки передач ZF Tronic роботизированного транспортного средства КАМАЗ:

$$Q(A) = 1 - \prod_{i=1}^4 [1 - Q(A_i)], \quad (3.8)$$

где $Q(A_1)$ – вероятность разрушения трансмиссионного тормоза, $Q(A_2)$ – вероятность отказа 4-ступенчатой коробки передач и делителей, $Q(A_3)$ – вероятность отказа валов и сцепления, $Q(A_4)$ – вероятность отказа вспомогательных агрегатов.

Исходя из этого, вероятность отказа для коробки переключения передач:

$$Q(A) = 1 - \prod_{i=1}^4 [1 - Q(A_i)] = 1 - 0,0006215 = 0,999.$$

3.5 Интеграция случайных законов в модели на стохастических временных иерархических раскрашенных сетях Петри

Роботизированные автомобили являются сложными техническими системами, включающими в себя множество подсистем, агрегатов и узлов, поэтому при учете эксплуатационных свойств РА необходимо учитывать не только характеристики движения, но и выходные характеристики подсистем, узлов и агрегатов, так как с увеличением времени эксплуатации они ухудшаются [4].

В связи с тем, что агрегаты роботизированного автомобиля КАМАЗ подлежат ремонту, то подсистемы РА можно считать восстанавливаемыми

объектами. Функционирование роботизированного автомобиля, как сложной технической системы, происходит таким образом, что отказ одной из подсистем РА ведет к отказу всего автомобиля в целом. В этом случае отказавшие агрегаты и узлы начинают восстанавливать, исключая ограничения на число восстановлений. Функционирование роботизированного автомобиля, как сложной технической системы, представлено в виде ориентированного графа состояний, изображенного на рисунке 3.7:

- 1) состояние X_0 – состояние роботизированного автомобиля, в котором все системы находятся в работоспособном состоянии;
- 2) состояние X_1 – состояние роботизированного автомобиля, когда первая подсистема – двигатель находится в неработоспособном состоянии, остальные работают исправно;
- 3) состояние X_2 – состояние роботизированного автомобиля, когда вторая подсистема – коробка переключения передач находится в неработоспособном состоянии, остальные исправно работают;
- 4) состояние X_3 – состояние роботизированного автомобиля, когда третья подсистема топливная система находится в неработоспособном состоянии, остальные исправно работают;
- 5) состояние X_4 – состояние роботизированного автомобиля, когда четвертая подсистема – тормозная система находится в неработоспособном состоянии, остальные исправно работают;
- 6) состояние X_5 – состояние роботизированного автомобиля, когда пятая подсистема – рулевая система находится в неработоспособном состоянии, остальные исправно работают;
- 7) состояние X_6 – состояние роботизированного автомобиля, когда шестая подсистема – трансмиссия РТС находится в неработоспособном состоянии, остальные исправно работают;

8) состояние $X7$ – состояние роботизированного автомобиля, когда седьмая подсистема – подвеска находится в неработоспособном состоянии, остальные исправно работают.

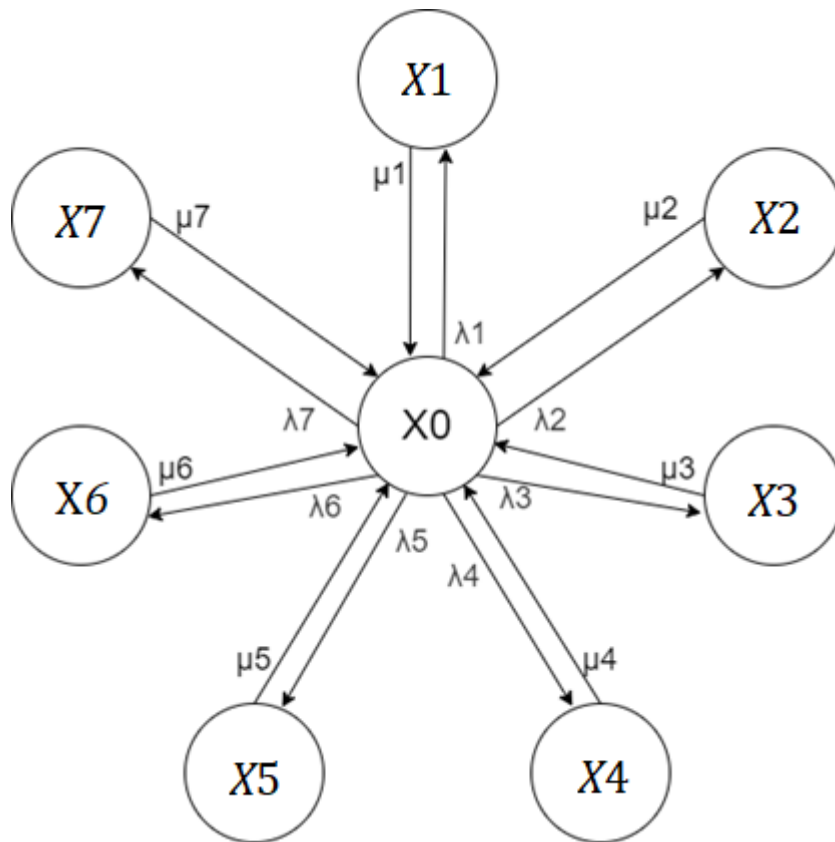


Рисунок 3.7 – Ориентированный граф возможных состояний роботизированного автомобиля КАМАЗ как восстанавливаемой системы

Таким образом, зная интенсивность возникновения отказов вероятность безотказной работы и восстановления подсистем роботизированного автомобиля, можно выявить требуемые коэффициенты законов распределения вероятности для моделирования появления отказов в одной из подсистем роботизированного транспортного средства. Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов, интенсивность отказов подсистем РТС, а также рекомендуемые коэффициенты законов распределения с указанием вида распределения представлены в таблице 3.5. Данные для таблицы представлены в приложениях А, Б.

Таблица 3.5 – Основные показатели надежности для основных подсистем роботизированного автомобиля КАМАЗ с указанием законов распределения вероятности и коэффициентов

Система РА	$P(t)$ на 2500 часов	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Интенсивность восстановления $\mu \cdot 10^{-3}$, 1/час	Закон распределения
Двигатель	0,0002	4255	0,043	Вейбулла
Топливная	0,592	210	0,142	Пуассоновское
Тормозная	0,537	249	0,142	Пуассоновское
КПП	0,0006	2935	0,05	Вейбулла
Трансмиссия	0,777	101	0,147	Нормальное
Рулевая	0,475	298	0,125	Пуассоновское
Подвеска	0,506	272	0,166	Нормальное

Для интеграции случайных законов в имитационную модель работы роботизированного транспортного средства на стохастических временных иерархических раскрашенных сетях Петри будем использовать вложенные сети Петри для блоков технического обслуживания и ремонта, а также блока возникновения отказов. В блоке возникновения отказов имитируются вероятностные законы отказов для агрегатов внутренних систем автомобиля: тормозной, топливной, двигатель, коробка передач, трансмиссии и т.д. Блок ремонта связан с блоком возникновения отказов при помощи соответствующих переходов. Так как от типа моделируемой подсистемы в блоке возникновения отказа зависит коэффициент восстановления, обратно пропорциональный времени восстановления/ремонта определенного агрегата.

В общем случае модель технического обслуживания включает в себя имитацию множества факторов, связанных с эксплуатацией роботизированных автомобилей, которые можно разделить на 4 основные группы:

- 1) факторы по планированию технологических операций и их назначение;
- 2) факторы роботизированного автомобиля: режимы отказа автомобиля, логика отказа РА и переходы его состояний: годен или негоден для выполнения технологический операций;
- 3) факторы подсистем и агрегатов: логика отказа подсистем, с указанными связями между отказами агрегатов, а также характеристики отказов агрегатов;
- 4) факторы технического обслуживания и ремонта с учетом политик ТОиР, управление ресурсами для их проведения.

Модель обслуживания парка роботизированных автомобилей, включающая все эти факторы, может затем использоваться для анализа влияния применяемой стратегий обслуживания на производительность и надежность парка автомобилей. Модель может использоваться для расчета таких показателей, как:

- показатель готовности к выполнению технологического процесса;
- частота прерывания технологических задач;
- среднее время ремонта (оценка среднего времени восстановления автомобиля до состояния «годен к эксплуатации»);
- среднее время между отказами (оценка среднего времени между отказами автомобилей).

Исходя из этого, структурная схема модуля ТОиР роботизированного автомобиля будет выглядеть следующим образом (рисунок 3.8).

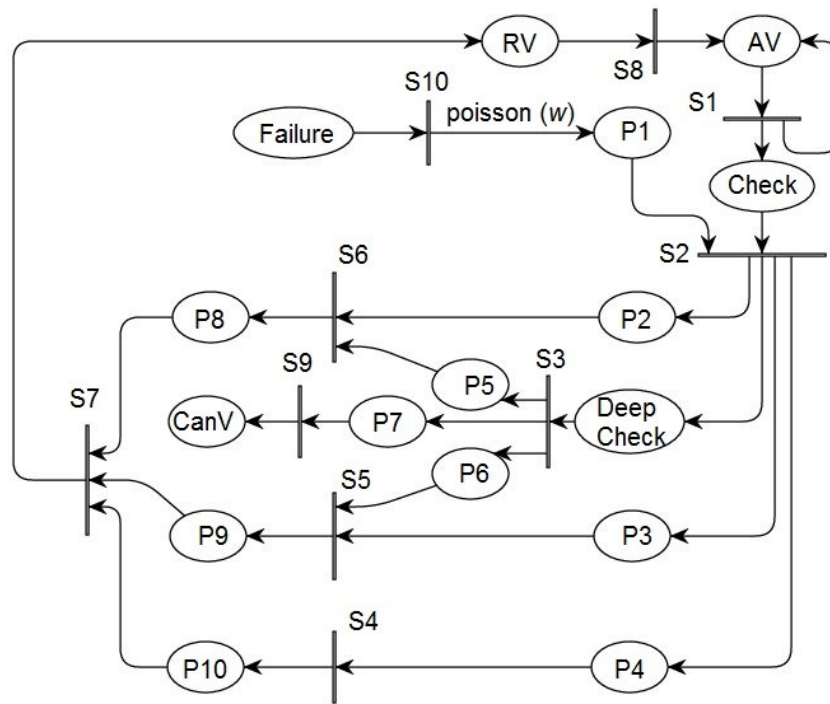


Рисунок 3.8 – Модуль имитации технического обслуживания и ремонта

В модуле имитации ТОиР роботизированного автомобиля присутствуют следующие позиции:

- 1) позиция AV – мультимножество активных роботизированных автомобилей, готовых к эксплуатации;
- 2) позиции RV – множество резервных автомобилей;
- 3) позиция Check – маркеры роботизированных автомобилей, требующих общую диагностику перед допуском к эксплуатации;
- 4) позиция Deep Check – маркеры роботизированных автомобилей, требующих углубленную диагностику перед допуском к эксплуатации;
- 5) CanV – роботизированные автомобили, предназначенные для каннибализации.

Операции в модуле ТОиР роботизированного автомобиля выполняются на переходах модели S1 – S10, содержание их действий приведено в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Интерпретация переходов в имитационной модели ТОиР

Переходы	Значение и события
<i>S1</i>	Ежедневное обслуживание
<i>S2</i>	Общая диагностика (Check)
<i>S3</i>	Детальная диагностика (Deer Check)
<i>S4</i>	Профилактическое обслуживание
<i>S5</i>	Текущий ремонт
<i>S6</i>	Капитальный ремонт
<i>S7</i>	Проверка работоспособности после ТО или ремонта и перевод маркера РА в позицию RV резерва
<i>S8</i>	Перевод маркера РА в активное состояние AV
<i>S9</i>	Переход к стратегии каннибализации (снятие запчастей с исправного РА)
<i>S10</i>	Генерация случайных событий вида «отказ» или «старение элемента»

В представленной модели ТОиР на сети Петри все переходы кроме *S7*, *S8*, *S10* являются подстановочными и, соответственно, реализуются фрагментами также в виде сетей Петри. Срабатывания перехода *S10* происходят случайно, имитируя пуассоновский поток отказов агрегатов транспортного средства с интенсивностью λ .

3.6 Применение стратегии каннибализации для технического обслуживания автопарка роботизированных автомобилей сельскохозяйственного назначения

Удаленное использование роботизированных транспортных средств с применением дистанционного управления приводит к стратегии технического обслуживания, именуемой «каннибализация» [96]. Согласно определению, каннибализация является деятельностью по техническому обслуживанию, которая включающей в себя удаление исправных элементов с

одной платформы для замены вышедших из строя элементов на других, когда необходимые запасные части недоступны. В случае применения такая стратегия восстанавливает платформы за короткое время до состояния, пригодного для выполнения требуемых задач, когда парк запасных частей не может удовлетворить спрос на запасные части [138]. Изначально данная стратегия использовалась в авиационной военной промышленности. В парке самолетов, как правило, предусматривался один каннибализируемый самолет, который не использовался для выполнения задач, даже если находился в полностью рабочем состоянии. Затем, по истечении определенного промежутка времени, каннибализируемому самолету возвращался статус летного, его восстанавливали, выбирая другой самолет в качестве каннибализируемого. В статье [86] была предложена имитационная модель на уровне изучения программы по истреблению самолетов ВВС США. Модель показывала уменьшение степени полезности самолета-каннибалиста по времени его пребывания на земле, не учитывая доступности необходимых компонентов. Также были проведены исследования с реальными данными производительности парка самолетов в соответствии со стратегией каннибализации, однако, математической модели реализации стратегии представлено не было. В рамках разработки математической модели реализации стратегии каннибализма авторы Sheng и Prescott построили цветную модель сети Петри для процесса неограниченной каннибализации парка с учетом множества факторов обслуживания парка, включая запасные части, ремонт, логику отказа платформы и организацию очередей платформ перед их восстановлением для выполнения задач [138]. Однако, данная модель не относится к модели каннибализации роботизированных транспортных средств.

Процесс технического обслуживания автопарка роботизированных автомобилей представляет собой сложную систему, которая включает в себя различные виды деятельности, политику технического обслуживания, организации технического обслуживания и управление ресурсами

технического обслуживания, многие из которых могут повлиять на желательность технического обслуживания с применением стратегии каннибализации. В данном случае каннибализация необходима для повышения эффективности организации технического обслуживания автопарка, а также сокращения времени простоя транспортных средств, связанных с условиями дефицита запасных частей и сроков их поставки.

Для решения задачи повышения эффективности технического обслуживания и ремонта была разработана модель для системы роботизированных агротехнических автомобилей в рамках проекта с ПАО «КАМАЗ» [74], построенная на базе сетей Петри, с применением стратегии каннибализации.

Для построения модели использовались стохастические временные раскрашенные сети Петри STCPN [109], так как такая конфигурация сетей позволяет имитировать вероятностные законы возникновения событий и описывать задержки по времени в сети. Модель технического обслуживания на основе стохастических временных раскрашенных сетей Петри имеет иерархическую структуру. В такой сети на верхнем уровне присутствуют подстановочные переходы, позволяющие затем заменять их вложенными сетями Петри нижнего уровня, чтобы осуществлять проектирование модели «сверху вниз». Общая структура модели технического обслуживания роботизированного автомобиля с применением стратегии каннибализации приведена на рисунке 3.9 [14].

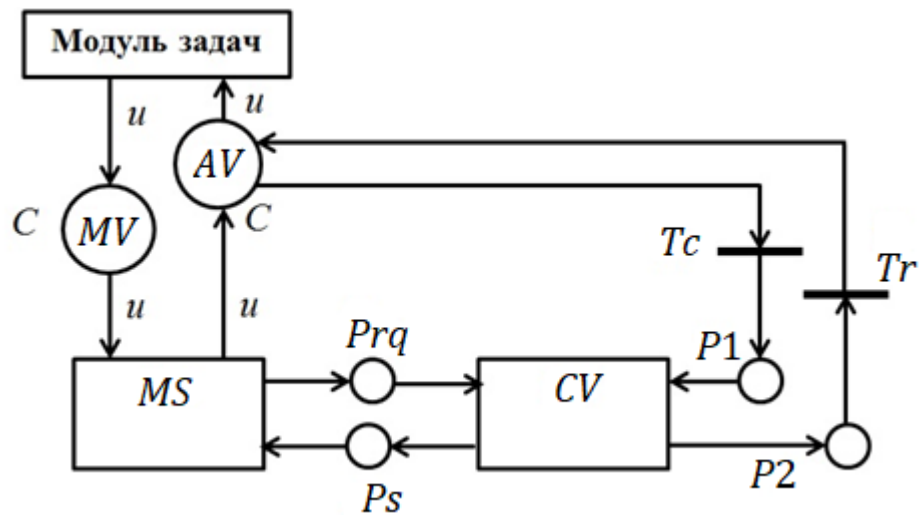


Рисунок 3.9 – Структура модулей иерархической модели технического обслуживания роботизированного автомобиля с применением стратегии каннибализации

Для данной иерархической сети подстановочными переходами, которые принадлежат верхнему уровню, являются блоки: «Модуль задач», *MS* – мобильный сервис технического обслуживания, и *CV* – модуль каннибализируемых автомобилей. В блок «Модуль задач» входит имитация движения роботизированного автомобиля по маршруту при выполнении определенных производственных задач.

Модуль *MS* моделирует процесс технического обслуживания роботизированного автомобиля непосредственно на маршруте или вблизи его. Модуль *CV* описывает действия по снятию запасных частей для передачи в мобильный сервис *MS*.

Описание позиций иерархической модели технического обслуживания РТС представлено в таблице 3.7.

Как говорилось выше, при использовании стратегии каннибализации необходимо также учитывать периодическое восстановление каннибализируемого автомобиля и перевод его в состояние эксплуатируемого, данное действие осуществляется при помощи перехода *Tr*. Соответственно, для постоянного наличия каннибализируемого

автомобиля, необходимо выполнить обратный переход эксплуатируемого автомобиля для каннибализации (переход Tc).

Таблица 3.7 – Позиции сети Петри иерархической модели технического обслуживания роботизированного автомобиля

Позиция	Значение позиции
AV	Множество РА в состоянии «Активный», которые участвуют в выполнении задач производственного процесса
MV	Автомобили в состоянии «Обслуживаемый», которые выведены из эксплуатации на время осуществления технического обслуживания
Prq	Запрос для запасной части от каннибализируемого РА
Ps	Готовность запасной части для установки на РА, который находится в состоянии «обслуживаемый»
$P1$	Готовность РА для перевода в модуль канибализируемых автомобилей CV
$P2$	Готовность РА для перевода из состояния CV в состояние «Активный»

Описание роботизированного автомобиля с помощью мультимножеств, представляющих кортеж основных параметров каждого автомобиля, можно производить, используя раскрашенную сеть Петри. Каждому РА, в этом случае, в позициях сети Петри соответствует свой цвет маркеров.

В таблице 3.8 представлено описание набора цветов S для рассматриваемой модели.

Таблица 3.8 – Набор цветов раскрашенной сети Петри модели технического обслуживания РТС

Множество цветов	Переменные цветов	Значение
N	n	Индивидуальный номер роботизированного автомобиля
$Mark$	mk	Марка РА, {КАМАЗ, МАЗ, Вольво}
$Model$	md	Модификация из модельного ряда РА
Mil	ml	Пробег роботизированного автомобиля, км
RL	rl	Значение остаточного ресурса РА, час

В результате каждое роботизированное транспортное средство представлено в модели составным цветом согласно таблице 3.8:

$$C = \langle N, Mark, Model, Mil, RL \rangle.$$

Дугам позиций активных РА AV и РА, находящихся на обслуживании, MV назначается переменная перехода u :

$$u = \{n, mk, md, ml, rl\}.$$

Структура сети Петри «Модуль задач» представлена на рисунке 3.10.

На модели «Модуль задач» движение по заданному маршруту к точке выполнения операция в переходе $T3$ имитирует переход $T1$. Имитацию возвращения по маршруту к месту парковки выполняет переход $T5$.

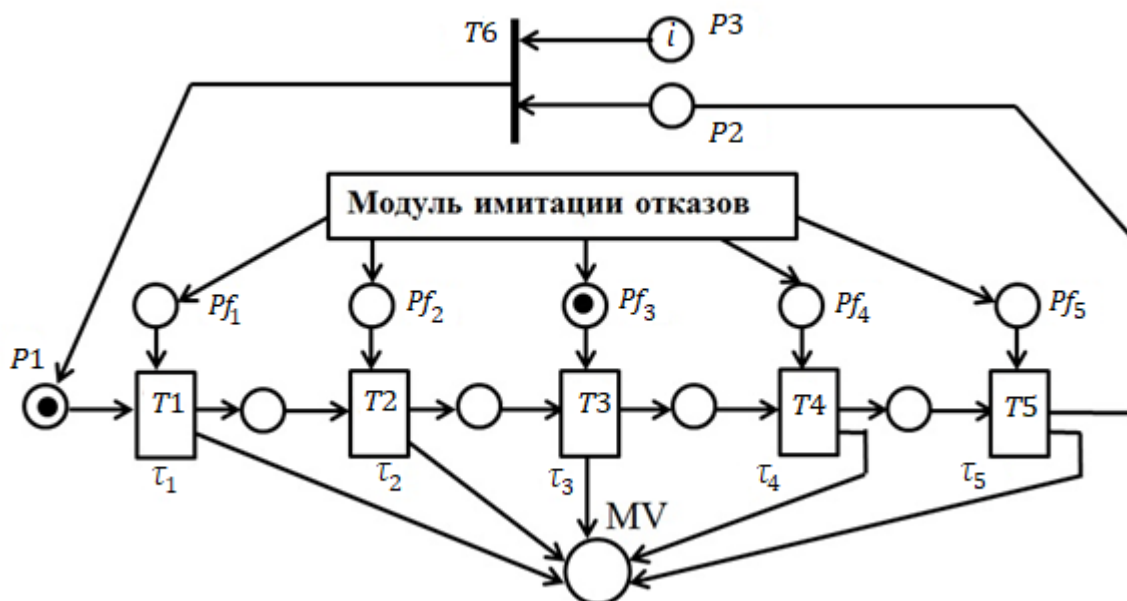


Рисунок 3.10 – Модель на раскрашенной сети Петри «Модуль задач»

Маневрирование роботизированного автомобиля для выполнения технологических операций представляют переходы $T2$ и $T4$. Повторение производственного логистического цикла осуществляется i раз (это отражено при помощи позиции $P3$ и перехода $T6$). Каждому переходу во временной раскрашенной сети Петри приписывается длительность его выполнения, длительности обозначены значениями $\tau_1, \dots, \tau_5$. Маркеры появления отказов роботизированного автомобиля на различных этапах работы содержатся в позициях $Pf_1, \dots, Pf_5$.

Модель «Модуль имитации отказов» также является подстановочным и строился на базе стохастической сети Петри при помощи средств программной системы CPN Tools для задания вероятностных законов распределения отказов в роботизированном автомобиле. В случае отказа компонента РА маркер из соответствующей позиции Pf передается в позицию MV на техническое обслуживание. На рисунке 3.10 присутствие маркера в позиции Pf_3 показывает произошедший отказ в роботизированном автомобиле при выполнении технологической операции в переходе $T3$.

На иерархической модели технического обслуживания роботизированного автомобиля с применением стратегии каннибализации можно производить оценку следующих параметров:

- 1) необходимое число каннибализируемых РА при заданном количестве активных РА;
- 2) время восстановления активных РА в модуле MS;
- 3) время использования РА в качестве каннибализируемого автомобиля;
- 4) сравнение времени технического обслуживания с каннибализацией и без каннибализации;
- 5) коэффициент полезной загрузки K_W роботизированного транспортного средства [108].

При этом коэффициент полезной загрузки K_W определяется по формуле.

$$K_{Wj} = \frac{T_j}{T_{cj}}, j = \{1, \dots, J\}, \quad (3.9)$$

где T_j – время нахождения j -го РА в состоянии «Активный», T_{cj} – общее время работы j -го РА, J – количество РА.

Пример оценки параметров приведен на рисунке 3.11, где показан график, построенный по данным имитационного эксперимента, который отражает зависимость коэффициента полезной загрузки от временных параметров стратегии каннибализации. Для данного эксперимента задавались следующие данные: общее количество РА равно 10, число каннибализируемых РА равно 3, время T_{can} технического обслуживания РА с применением стратегии каннибализации – от 4 до 12 часов, время T_m между периодическим обслуживанием РА – от 100 до 400 часов. Заданный уровень загрузки K_W кузовов автомобилей равен 75%. Статистический эксперимент проводился с использованием закона Вейбулла для генерации событий отказов РА. Приняв допустимый уровень полезной загрузки, равный 75%, формируются требования к режиму обслуживания роботизированных автомобилей.

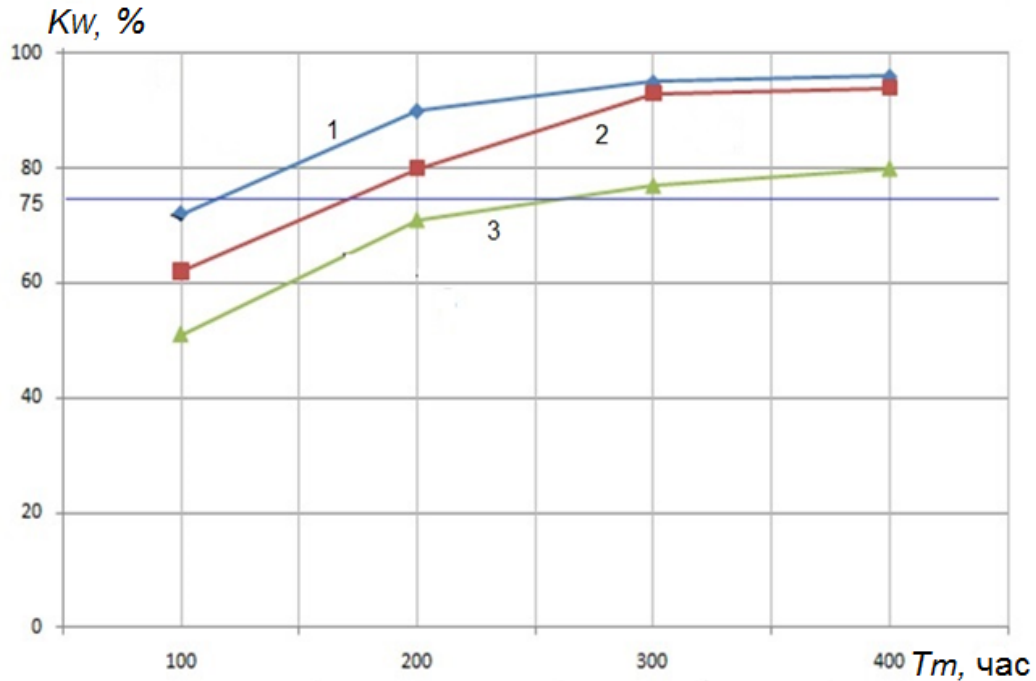


Рисунок 3.11 – График коэффициента K_W полезной загрузки РА для 3 различных случаев: 1 – $T_{can} = 4$ часа; 2 – $T_{can} = 8$ часов; 3 – $T_{can} = 12$ часов

Выводы

1. Системная имитационная модель процессов эксплуатации роботизированных транспортных средств описывает жизненный цикл эксплуатации РТС при виртуальном вводе в эксплуатацию. Применение иерархических временных раскрашенных сетей Петри для моделирования позволяет интегрировать различные факторы в процесс виртуального ввода в эксплуатацию, включая вероятностные законы возникновения отказов в агрегатах и подсистемах роботизированного автомобиля в процесс его эксплуатации, а также применить современные стратегии использования автопарка роботизированных транспортных средств.

2. В результате системного анализа процесса виртуальных испытаний построена иерархическая модель на базе сетей Петри. Модель имеет ярко выраженную гибкую модульную структуру. Такой подход обеспечивает разные уровни детализации изучаемых систем и процессов. В частности, позволяет описывать и исследовать каждую транспортную единицу в общей системе.

3. Выявлена взаимосвязь агрегатов в подсистемах роботизированного автомобиля и рассчитаны интенсивность отказов и интенсивность восстановления отдельных подсистем роботизированного автомобиля при помощи методики «Дерева отказов» для дальнейшей интеграции в имитационные раскрашенные стохастические сети Петри, что позволяет определить стратегию технического обслуживания и ремонта. Сделаны выводы о коэффициенте сдвига сроков завершения цикла производственных задач, времени выполнения задач, требуемом количестве резервных роботизированных автомобилей, необходимых для их минимизации при выполнении задач ТОиР.

4. Рассмотрено применение модели стратегии каннибализации для сокращения времени простоя роботизированных автомобилей при выполнении процедур ТОиР. Проведен имитационный эксперимент, отражающий зависимость загрузки автомобиля от параметров стратегии каннибализации.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРКОМ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

4.1 Области использования результатов диссертационного исследования

Разработанные алгоритмы и системные модели могут использоваться в отраслях промышленности, где активно применяются роботизированные транспортные средства, особенно в отраслях с труднодоступными и рассредоточенными объектами, где осуществляется применение транспортировки грузов, а также осуществление погрузочно-разгрузочных работ. Примерами таких отраслей может служить агропромышленные комплексы, горно-добывающая и нефтяная промышленности, военная промышленность.

В целом, предлагаемые методика виртуальных испытаний роботизированных транспортных средств и системные модели носят общий характер. При их использовании можно проводить виртуальные испытания роботизированных транспортных средств, решая задачу оптимизации распределения транспортных средств, и на основании полученных результатов минимизировать время простоя автомобилей и обеспечить наиболее рациональное выполнение, как производственных задач, так и процессов технического обслуживания и ремонта.

Результаты диссертационного исследования использовались в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме НИР «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления». Полученные в рамках диссертационного исследования результаты применялись для создания имитационных моделей роботизированных автомобилей КАМАЗ на

базе стохастических временных раскрашенных сетях Петри. В результате были определены сроки технического обслуживания роботизированных транспортных средств на базе семейства грузовых автомобилей КАМАЗ.

4.2 Использование системных моделей и методики управления виртуальными испытаниями роботизированных транспортных средств сельскохозяйственного назначения

Экспериментальное исследование предлагаемой методики проводилось для парка сельскохозяйственных роботизированных автомобилей, выполняющих технологические задачи по погрузке, транспортировке и выгрузке зерна в зернохранилище.

4.2.1 Решение задачи оптимального распределения парка роботизированных транспортных средств

На этапе экспериментов проводилось решение оптимизационной задачи назначения роботизированных автомобилей на основе сформулированных целевой функции (2.4) и ограничений (2.5)–(2.11) для одного из сельскохозяйственных предприятий, в котором проводились испытания разрабатываемых роботизированных автомобилей КАМАЗ [142].

Задача решалась при следующих исходных данных:

- а) число полей $K=5$;
- б) количество комбайнов $I=5$;
- в) количество роботизированных автомобилей $N=15$.

Согласно исходным данным, производственно-логистическая система для рассматриваемого предприятия представлена на рисунке 4.1, где показаны

- парк беспилотных комбайнов $U = \{u_1, \dots, u_5\}$;
- парк роботизированных автомобилей на базе шасси КАМАЗ $A = \{a_1, \dots, a_{15}\}$;
- множество полей для сбора зерна $P = \{p_1, \dots, p_5\}$;

– множество маршрутов между зернохранилищем и полями $\{L_1, \dots, L_5\}$.

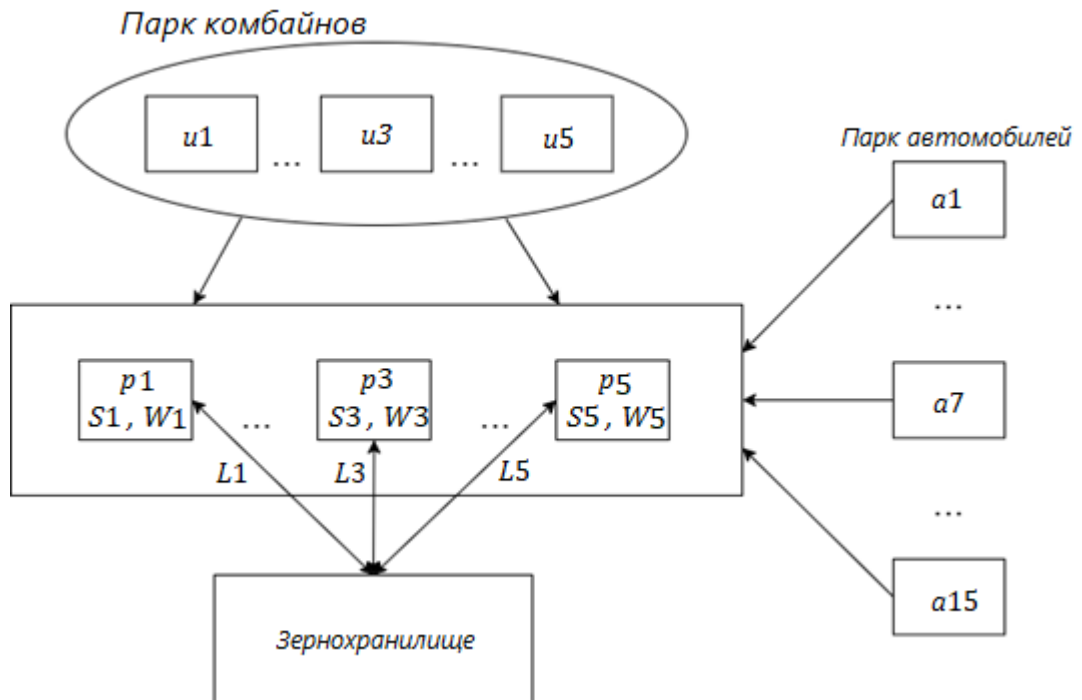


Рисунок 4.1 – Структура производственно-логистическая система для агропромышленного комплекса: S_k – площадь поля k , W_k – урожайность зерна на поле k , L_k – расстояние от поля k до зернохранилища

Рассматривая парк роботизированных автомобилей A , можно определить, что он включает в себя три основные группы:

- 1) множество активных автомобилей A^A , которые находятся в эксплуатации и выполняют конкретные виды деятельности на полях;
- 2) множество резервных автомобилей A^R , которые прошли процедуры ремонта или технического ремонта, находясь в режиме готовности к эксплуатации;
- 3) множество каннибализируемых автомобили A^C , которые предназначены для снятия с них рабочих агрегатов и узлов для последующей установки на активные автомобили.

Для парка роботизированных автомобилей на базе автомобилей КАМАЗ необходимо выполнение следующего условия:

$$A = A^A \cup A^R \cup A^C, A^R \cap A^C = \emptyset \quad (4.1)$$

В данном случае задача назначения нескольких беспилотных комбайнов на поля не решается, а используется условие, что на одно поле для уборки зерна назначается только один конкретный комбайн. Но, следует отметить, что описанная методика по решению задачи назначения роботизированных транспортных средств для выполнения производственных операций является применимой и к решению задачи назначения комбайнов для уборки урожая на полях.

Для решения значения задачи назначения вводятся обозначения переменных и параметров:

- 1) S_k – площадь поля k , га;
- 2) W_k – урожайность зерна на поле k , ц/га;
- 3) Pf_i – производительность комбайна i , назначенного на поле k , т/час, которая зависит от урожайности зерна на поле k средней скорости комбайна и ширины жатки;
- 4) T_k – заданное время уборки поля k , час;
- 5) L_k – расстояние от поля k до зернохранилища, км;
- 6) v_{cn} – средняя скорость роботизированного автомобиля n при передвижении по маршруту «Поле k – Зернохранилище», км/час;
- 7) V_n^A – объем кузова автомобиля n , м³;
- 8) V_i^U – объем бункера комбайна i , м³;
- 9) β – коэффициент пересчета объема зерна определенного сорта в тонны, т/м³;
- 10) B_A – количество автомобилей, готовых к эксплуатации и доступных к назначению на поля, при этом $B_A = |A| - |A^R| - |A^C|$, где A – множество роботизированных автомобилей, A^R и A^C – множества резервных и каннибализируемых автомобилей соответственно.

В ходе решения задачи необходимо определить основные соотношения, которые связывают параметры процессов уборки зерна с характеристиками комбайнов, выполняющих уборку зерна и грузовых роботизированных автомобилей.

1. Масса зерна, выращенная на поле k площадью S_k с учетом коэффициента допустимых потерь δ при уборке, т:

$$M_k = (1 - \delta)S_k w_k / 10. \quad (4.2)$$

2. Масса зерна на поле k , которую убирает комбайн i за время, т

$$M_{ki}(T_k) = P f_i \times T_k. \quad (4.3)$$

3. Время T_{ki} , которое требуется для полной уборки комбайном i поля k , определяется как

$$T_{ki} = (1 - \delta)S_k w_k / 10 P f_i. \quad (4.4)$$

4. Максимальное количество циклов движения одного автомобиля n к комбайну i на поле k за период T_k

$$\eta_{kn} = [T_k / (2L_k / v_{sn}) + T_b], \quad (4.5)$$

где T_b – время выгрузки зерна в зернохранилище, а $2L_k / v_{sn}$ – время цикла на маршруте вида «Загрузка на поле – Выгрузка в зернохранилище – Возврат на поле» одного автомобиля n для поля k .

5. Масса зерна, вывозимого за период T_k одним автомобилем n с поля k

$$M_{kn} = \beta \eta_{kn} V_n^A. \quad (4.6)$$

В ходе решения задачи рассматривается процесс минимизации стоимости эксплуатации работы автомобилей в агропромышленной системе. Булева переменная для оптимизационной задачи определяется следующим образом:

$$x_{kin} = \begin{cases} 1, & \text{если для выполнения работы на поле } k \\ & \text{назначены } i \text{ комбайн и } n \text{ автомобиль,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Будем считать, что задача назначения комбайнов решена и получена функция соответствия $i = \theta(k)$, то есть на одно поле k назначается только

один комбайн. Далее решаем задачу оптимального назначения автомобилей для совместной работы с комбайнами на полях.

В этом случае, целевая функция C представляет собой общую стоимость эксплуатации роботизированных автомобилей при выполнении работ на заданном множестве полей:

$$C = \min\{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{kn} x_{kn}\}, \quad (4.7)$$

где $c_{kn} = 2\eta_k L_k (c_{kn}^b + q\varphi_n)$ – суммарная стоимость выполнения производственных операций автономным автомобилем n на поле p_k , c_{kn}^b – удельные затраты на ТО, руб/км, φ_n – расход топлива автомобилем n , л/км, q – стоимость топлива, руб/л.

Для данной задачи имеются ограничения следующего вида.

1. Первый вариант: назначение каждого роботизированного автомобиля a_n возможно на одно и только одно поле p_k

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, \quad n = \overline{1, N}. \quad (4.8)$$

Второй вариант: назначение роботизированного автомобиля допускается не более чем на одно поле (в этом случае, возможно отсутствие назначения, то есть автомобиль находится в резерве или в режиме каннибализируемого)

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \leq 1, \quad n = \overline{1, N}. \quad (4.9)$$

2. Назначение на каждое поле p_k не менее одного роботизированного автомобиля

$$\sum_{n=1}^N x_{kn} \leq 1, \quad k = \overline{1, K}. \quad (4.10)$$

3. Назначение на все поля не более доступного количества автомобилей B_A

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{kn} \leq B_A. \quad (4.11)$$

4. Масса зерна, выгружаемого комбайном i из бункера в автомобили, работающие на поле k за период T_k , должна быть не больше суммарной массы, которую могут вывезти эти грузовые автомобили за этот период

$$\sum_{n=1}^N \eta_{kn} \beta (V_n^A - V_i^U) x_{kn} \geq 0, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \theta(k), \quad (4.12)$$

где θ – функция соответствия номера назначенного комбайна i заданному полю k , η_{kn} – число циклов поездок, выполняемых каждым автомобилем за время T_k .

5. Масса зерна, которую могут вывезти автомобили с поля k за период T_k , должна быть не меньше массы зерна, обработанного комбайном i за этот период

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \geq 1, k = \overline{1, K}, i = \theta(k). \quad (4.13)$$

6. Максимальная масса зерна, которую могут перевезти за время T_k назначенные на поле k автомобили, не должна превышать массу убранных зерна более, чем в α раз, где коэффициент α показывает степень суммарной недогруженности автомобилей:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \geq \alpha, \alpha > 1, k = \overline{1, K}. \quad (4.14)$$

В результате решения оптимизационной задачи с требуемыми ограничениями (4.8)–(4.14) получаем булеву матрицу X назначений автономных автомобилей на производственные работы, которые задаются календарно-сетевым графиком G .

Для решения задачи по оптимальному распределению автопарка роботизированных автомобилей на начальном этапе необходимо определить типы используемых комбайнов и грузовых автомобилей для осуществления производственных работ. Исходя из этого, предполагалось, что имеются два типа комбайнов и три типа автомобилей. Тип и основные характеристики комбайнов представлены в таблице 4.1 [67, 89].

Таблица 4.1 – Комбайны, используемые для уборки зерновых культур на полях

Тип	Марка	Производительность, Pf_i , т/час	Объем бункера, V_i^U , м ³	Кол-во	ИНК, индивидуальный номер комбайна
1	TORUM 785	20	12,3	2	1,2
2	CLAAS LEXION 580	16	10,5	3	3,4,5

В таблице 4.2 приведены характеристики полей и распределение комбайнов по данным полям.

Таблица 4.2 – Параметры полей для производства зерноуборочных работ с указанием индивидуального номера привязанного комбайна

№ поля, k	Площадь S_k , га	Урожайность w_k , ц/га	Длина маршрута L_k , км	Масса убираемого зерна M_k , т	Время уборки T_k , ч	ИНК
1	122	22	12,5	263	16,5	3
2	250	19,2	5	470	29,4	4
3	360	25,4	8,8	900	45	1
4	480	16,8	10,4	790	39,5	2
5	320	21,3	6,8	668	42,3	5

Как уже говорилось выше, для решения задачи принимается условие, что на одном поле работы выполняются только одним комбайном. При выполнении расчетов массы убираемого зерна и требуемого времени уборки принимаем значения коэффициента пересчета объема зерна в тонны $\beta = 0,77$ т/м³ и коэффициента допустимых потерь $\delta = 2\%$. Время уборки поля

включает в себя также время выгрузки из роботизированного автомобиля в зернохранилище, что составляет $T_b = 0,5$ часа.

Также представлены три различные модели грузовых роботизированных автомобилей, которые используются при назначении на поля:

- 1) КАМАЗ марки 6520-49 с индивидуальными номерами автомобилей {1;2;3;4;5};
- 2) КАМАЗ марки 65115-42 с индивидуальными номерами автомобилей {6;7;8;9;10};
- 3) КАМАЗ марки 65111-48 с индивидуальными номерами автомобилей {10;11;12;13;14;15}.

В таблице 4.3 приведены параметры используемых роботизированных автомобилей на базе шасси КАМАЗ.

Таблица 4.3 – Параметры грузовых автомобилей, предназначенных для процесса транспортировки зерновых культур

Модель	ИН, индивиду- альный номер	Объем кузова V_n^A , м ³	Средняя скорость v_n , км/час	Расход топлива, л/км	Удельная стоимость ТО, руб/км
КАМАЗ 6520	1;2;3;4;5	20	27	0,29	8,1
КАМАЗ 65115	6;7;8;9;10	10	30	0,26	6,9
КАМАЗ 65111	11;12;13;14;15	8,2	30	0,25	5,7

В зависимости от номера и характеристик поля, на которое назначается роботизированное транспортное средство, будет меняться количество циклов поездок роботизированных автомобилей, и, как следствие, его расход топлива и общая сумма эксплуатационных расходов. Исходя из этого, в таблице 4.4 представлены значения эксплуатационных издержек C_{kn} (руб.) для различных моделей РА в зависимости от назначения на конкретное поле.

Таблица 4.3 – Эксплуатационные расходы при использовании автономных автомобилей на различных полях, (руб)

Модель	Поле p_1		Поле p_2		Поле p_3		Поле p_4		Поле p_5	
	η_1	C_{1n}	η_2	C_{2n}	η_3	C_{3n}	η_4	C_{4n}	η_5	C_{5n}
КАМАЗ 6520	11	5895	33	7075	31	14716	31	13824	24	13970
КАМАЗ 65115	12	5658	35	6601	33	13609	33	12945	27	13850
КАМАЗ 65111	12	5160	35	6020	33	12411	33	11806	27	12630

Для решения задачи в программном пакете Lpsolve 5.5 [119] выполняется преобразование двухмерной матрицы значений искомых булевых переменных x_{kn} в одномерный массив x_j . При $k=5$ и $n=15$ получим одномерный вектор искомых переменных $(x_1, x_2, \dots, x_{75})$. Тогда целевая функция задачи назначения имеет следующий вид:

$$C_{min} = \min \sum_{j=1}^{75} C_j x_j, \quad (4.15)$$

где C_j – суммарные эксплуатационные затраты для j -го назначения автомобиля.

Ограничения для (4.8)–(4.14) также приводятся к одномерной форме для записи в программном пакете Lpsolve 5.5.

Таким образом, задача имеет 75 неизвестных булевых переменных и 35 ограничений. Значение коэффициента недогруженности автомобилей было принято $\alpha = 1,2$. Это обусловлено тем, что при уменьшении значения коэффициента недогруженности α до 1,19 не выполняется ограничение (4.6), так как происходит превышение количества зерна, убираемого комбайнами, над количеством зерна, вывозимом автомобилем. При увеличении коэффициента α до 1,4 обеспечивается только 70% загрузки кузова,

что приводит к не эффективному использованию РА при транспортировке зерновых культур.

В результате решения задачи в программном пакете Lpsolve 5.5 получаем вектор $X = (x_3, x_{12}, x_{29}, x_{31}, x_{36}, x_{41}, x_{47}, x_{54}, x_{60}, x_{67}, x_{68}, x_{73})$ булевых переменных, равных единице. Для данного решения минимум эксплуатационных затрат соответствует значению 136 015 руб. Результаты решения по назначению автомобилей представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Решение задачи оптимального распределения автомобилей по полям

Номер поля	Комбайны	Автомобили $C_{\min}=135015$ руб			
		x_j	x_{kn}	Номер автомобиля	Модель
1	CLAAS LEXION 580	x_3	$x_{1,3}$	3	КАМАЗ 6520
		x_{12}	$x_{1,12}$	12	КАМАЗ 65111
2	CLAAS LEXION 580	x_{29}	$x_{2,14}$	14	КАМАЗ 65111
3	TORUM 785	x_{31}	$x_{3,1}$	1	КАМАЗ 6520
		x_{36}	$x_{3,6}$	6	КАМАЗ 65115
		x_{41}	$x_{3,11}$	11	КАМАЗ 65111
4	TORUM 785	x_{47}	$x_{4,2}$	2	КАМАЗ 6520
		x_{54}	$x_{4,9}$	9	КАМАЗ 65115
		x_{60}	$x_{4,15}$	15	КАМАЗ 65111
5	CLAAS LEXION 580	x_{67}	$x_{5,7}$	7	КАМАЗ 65115
		x_{68}	$x_{5,8}$	8	КАМАЗ 65115
		x_{73}	$x_{5,14}$	13	КАМАЗ 65111

Согласно полученному решению для выполнения работ по транспортировке и сбору зерновых культур будут эксплуатироваться 12 автомобилей из 15. Оставшиеся 3 автомобиля могут использоваться одним из следующих способов:

- 1) направление всех автомобилей в резерв.
- 2) часть автомобилей используется для каннибализации, а другая часть – в резерв.

При существующей практике назначение транспортных средств на поля производится без учета ограничений на их параметры, характеристик посевных площадей, структуры дорожной сети. Формирование задач назначения ведется по мере наличия транспортных средств в автопарке в ручном режиме.

В таблице 4.6 представлен пример такого распределения роботизированных автомобилей по полям для выполнения уборки зерна, которое было выполнено в 2021 году в рассматриваемом сельскохозяйственном предприятии без применения разработанной в диссертации методики.

На основании этого, можно сделать вывод, что эксплуатационные затраты на уборку зерновых культур роботизированными автомобилями при назначении на задачи по разработанной методике оптимизации на 11% меньше затрат, рассчитанных на основании распределения автомобилей КАМАЗ в 2021 году, когда решения принимались без учета оптимизации. Положительный эффект достигнут за счет рационального распределения автомобилей, а также сокращения времени их простоя при выполнении производственных задач.

Таблица 4.6 – Распределение автомобилей по полям для выполнения задач в 2021 году

Номер поля	Комбайны	Автомобили	
		$C_{\min}$ =151742 руб	
		Номер автомобиля	Модель
1	CLAAS	11	КАМАЗ 65111
	LEXION 580	6	КАМАЗ 65115
2	CLAAS	1	КАМАЗ 6520
	LEXION 580	7	КАМАЗ 65115
3	TORUM 785	2	КАМАЗ 6520
		3	КАМАЗ 6520
		8	КАМАЗ 65115
4	TORUM 785	4	КАМАЗ 6520
		12	КАМАЗ 65111
		13	КАМАЗ 65111
5	CLAAS LEXION 580	5	КАМАЗ 6520
		9	КАМАЗ 65115
		14	КАМАЗ 65111
Резерв: КАМАЗ 65111, КАМАЗ 65115			

Полученное решение задачи по оптимальному распределению автопарка роботизированных автомобилей помогает определить структуру работ и выполнить статистическое распределение ресурсов. Однако, оно не описывает динамическое протекание процессов в режиме эксплуатации РА в условиях неопределённости внешней среды и не отражает вероятностного характера параметров технических состояний узлов и агрегатов роботизированных автомобилей. Эти исследования проводятся на имитационных моделях на сетях Петри, описанных в пункте 4.2.2.

проводимом на модуле ARL, в позициях UM и UF появляются маркеры, показывающие перевод РА на техническое обслуживание или ремонт вследствие отказа.

Исследования на комплексе системных моделей проводились для трех сценариев:

- 1) сценарий 1 – нормальные условия эксплуатации БТС;
- 2) сценарий 2 – условия эксплуатации повышенной сложности (часть дорожного покрытия имеет повреждения, осадки);
- 3) сценарий 3 – сложные условия эксплуатации (большая часть дорог имеет повреждения, плохие погодные условия).

Парк беспилотных транспортных средств формируется из беспилотных зерноуборочных комбайнов модели TORUM 785 с объемом бункера 12 000 л и автономных автомобилей на базе шасси КАМАЗ 65119 с объемом кузова от 10 000 л до 18 000 л.

Анализ надежности беспилотных транспортных средств выполнялся путем имитации появления отказов в агрегатах в процессе эксперимента с использованием метода Монте-Карло. Программа CPN Tools позволяет задавать вероятностные законы с различными распределениями: нормальное, экспоненциальное, Вейбулла, гамма-распределение и др.

В частности, для каждого роботизированного автомобиля A_j определялся коэффициент использования E_j :

$$E_j = \left(\frac{\sum_k t_{jk}}{\sum_k t_k} \right) \times 100\%, k \in I_j, \quad (4.15)$$

где t_k – время выполнения операции по уборке зерна z_k , t_{jk} – время работы A_j при выполнении z_k , и I_j – индексное множество операций, для выполнения которых был назначен A_j .

В качестве примера на рисунках 4.3 и 4.4 показаны графики коэффициентов использования E_1 и E_2 для двух автономных автомобилей, которые были получены в результате имитационного эксперимента на сети Петри.

При этом в целом на иерархической имитационной модели исследовался парк из 30 автономных автомобилей КАМАЗ и 15 беспилотных зерноуборочных комбайнов TORUM.

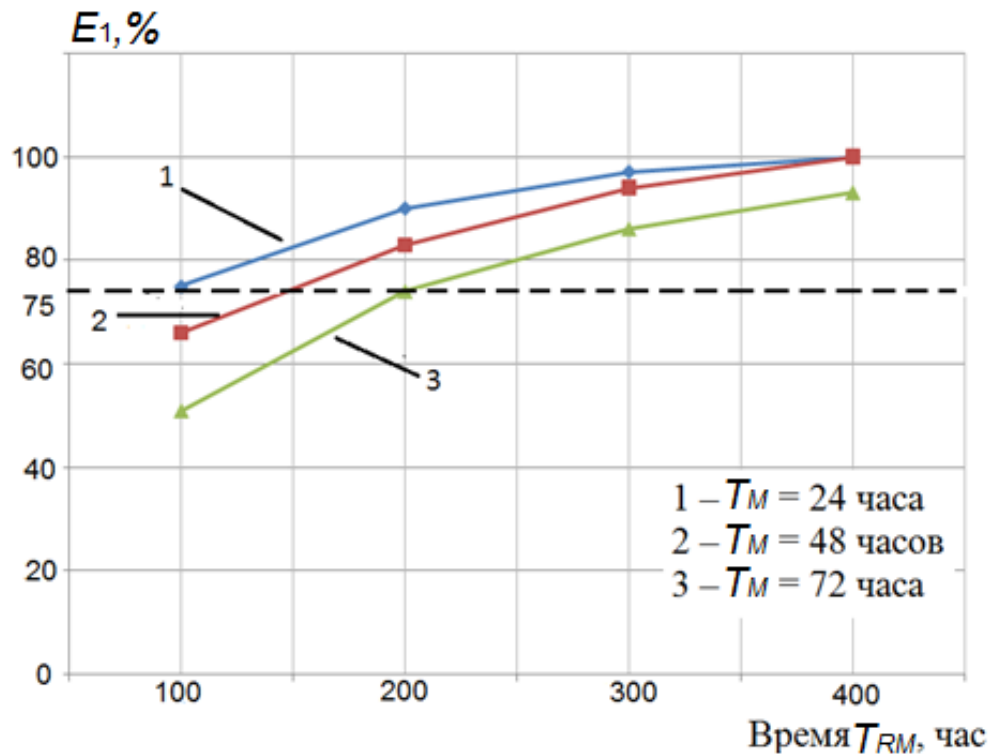


Рисунок 4.3 – Графики коэффициента использования E_1 для автомобиля A_1

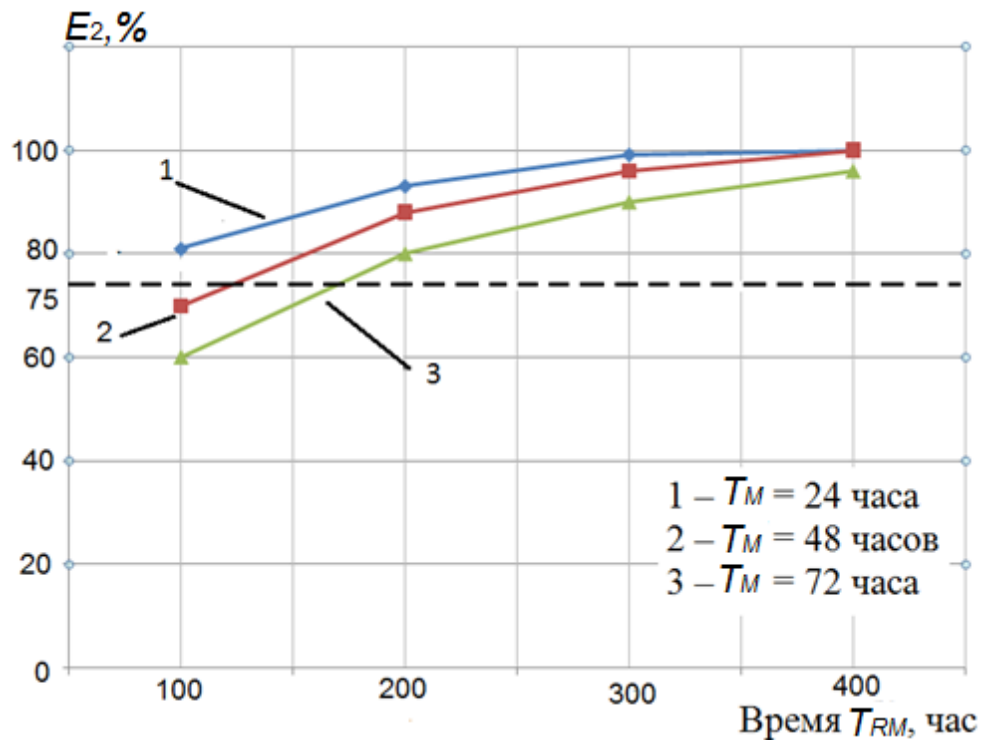


Рисунок 4.4 – Графики коэффициента использования E_2 для автомобиля A_2

Установим минимальный уровень коэффициента использования, равный 75% (пунктирная линия на рис. 4.3 и 4.4). Тогда можно определить допустимое время T_M на выполнение технического обслуживания автономного автомобиля и границы оставшегося времени T_{RM} до проведения профилактического технического обслуживания.

Выполнение статистического эксперимента на предлагаемых моделях позволяет оценить стоимость затрат и производительность транспортной системы при различных сценариях эксплуатации и обслуживания беспилотных транспортных средств. В процессе имитационного эксперимента на раскрашенной сети Петри значения переменных цветов в мультимножествах изменяются в соответствии с выполняемыми операциями и событиями в производственно-логистической системе. Анализируя параметры мультимножеств сети Петри, можно получить характеристики надежности транспортных средств: наработку на отказ, остаточный ресурс, ремонтпригодность, вероятность появления различных отказов и т.д.

4.3 Практическое использование результатов диссертационного исследования

4.3.1 Проект по созданию роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей КАМАЗ

Разработанные системные модели и методика управления виртуальными испытаниями использованы при выполнении НИР в проекте Минобрнауки РФ «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления». Задачей НИР в целом являлась разработка системы роботизированных автомобилей КАМАЗ, включая обслуживающую инфраструктуру. В связи с этим результаты диссертации были применены в рамках НИР при проектировании

системы сервисных центров и выработки рекомендаций по техническому обслуживанию.

Виртуальные испытания комплекса РТС моделей КАМАЗ, проведенные на иерархической имитационной модели, позволили сократить на 15% плановый срок проектирования системы обслуживания для роботизированного автомобиля КАМАЗ.

Испытания экспериментального образца системы роботизированных автомобилей проводились на полигоне НТЦ ПАО КАМАЗ. При выполнении тестового набора производственных заданий для автомобилей КАМАЗ производилось решение оптимизационной задачи назначений по разработанной в диссертации методике. Также выполнялось имитационное моделирование заданных производственных операций, выполняемых РА для оценки эффективности системы технического обслуживания.

Полученные результаты подтвердили достоверность и корректность разработанных цифровых моделей.

4.3.2 Внедрение результатов исследований на промышленных предприятиях

1. Цифровые модели, разработанные в диссертации, использованы на предприятии АО «ПМК-402», г. Самара. Компания «ПМК-402» – крупнейшая в Волжском регионе строительная организация по прокладке линий связи, строительству распределительных сетей, монтажу телефонных станций. Компания «ПМК-402» имеет опыт строительно-монтажных и пусконаладочных работ на линейных и распределенных объектах связи, водоснабжения, газоснабжения. Протяженность объектов строительства и удаленность от мест обслуживания техники приводила к чрезмерно высоким затратам на эксплуатацию и ТОиР. Парк транспортных средств «ПМК-402» включает как грузовые автомобили, так и специальную строительную передвижную технику (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Парк транспортных средств "ПМК-402"

№ пп	Типы и модели техники	Кол-во
Грузовые транспортные средства		
1	ГАЗ-33021	3
2	Урал-4320	3
3	КамАЗ-4310	2
4	КамАЗ-53212	1
5	КамАЗ-5511	1
6	ЗИЛ-441510	1
7	КамАЗ-5410	3
8	VOLVO	1
9	Седельный тягач Freightliner FLB	2
Спецтехника для производства строительно-монтажных работ		
1	Виброкабелеукладчик Delta 240-С	2
2	Фургон ЗИЛ-131	4
3	Фургон Урал-4320	3
4	Установка горизонтально-направленного бурения ГНБ	5
5	Самопогрузчик Nissan Diesel	4
6	Самопогрузчик Урал-43201	5
Дорожно-строительная техника		
1	Бульдозер ДЗ-171	2
2	Трактор Т-170	8
3	Цепной траншейный экскаватор МТЗ-80 ЭТЦ-165	7
4	Экскаватор ЭО-2621 МТЗ	15

Для планирования работ транспортных средств в 2023 году были использованы:

- цифровая модель на основе решения оптимизационной задачи назначения автомобилей и специальной техники на производственные работы по заданному календарно-сетевому графику и с учетом логистической структуры;
- цифровая имитационная модель на сетях Петри для проверки различных сценариев функционирования групп транспортных средств.

В результате были сокращены эксплуатационные затраты в среднем на 8% и уменьшено время простоя транспортных средств по сравнению с данными за 2021 – 2022 годы.

2. Методика планирования на основе разработанных цифровых моделей использована также на предприятии АО «Челно-Вершинский машиностроительный завод», Самарская область.

Основные направления деятельности этого предприятия – производство, установка и наладка:

- оборудования для животноводческих ферм;
- запасных и комплектующих частей к оборудованию для животноводческих ферм;
- комплектующих изделий для железнодорожного транспорта.

Применялась методика оптимального планирования распределения транспортных средств на погрузочно-разгрузочные операции и транспортные работы. В результате стоимость эксплуатации транспортных средств уменьшена в среднем на 10%, время простоя при техническом обслуживании и ремонте транспортных средств снижено в среднем на 12% относительно прошлых периодов.

Документы по использованию результатов диссертации, приведены в Приложении Г.

Выводы

1. Экспериментальные исследования при решении задачи оптимального назначения роботизированных автомобилей КАМАЗ для работы на полях испытательного полигона показали, что обеспечивается экономия в среднем на 11% средств, затрачиваемых на эксплуатацию РТС.

2. Имитационное моделирование на иерархической модели, проведенное с помощью метода Монте-Карло показало, что достигается:

- а) сокращение времени простоя РТС на техническом обслуживании и ремонте в среднем на 12 %;
- б) снижение задержек сроков производственных работ в среднем до уровня 6% по сравнению с 10% в предыдущие годы.

3. Разработанные имитационные модели позволяют изучать широкий спектр случайных факторов и учитывать неопределенности в процессе эксплуатации РТС.

4. Практическое использование результатов диссертационного исследования на промышленных предприятиях подтвердило обоснованность и достоверность методики управления, моделей и выводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все поставленные в диссертации, задачи исследований были выполнены.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Проведен системный анализ существующих методов управления при виртуальном вводе в эксплуатацию, в том числе, при применении систем роботизированных автомобилей для агротехнической промышленности. В рамках проведенного анализа были выявлены недостатки, связанные с недостаточным учетом сложных условий эксплуатации роботизированных транспортных средств при решении вопросов технического обслуживания и ремонта.

2. Предложена методика управления виртуальными испытаниями с использованием системных моделей. Данный комплекс системных моделей включает в себя решение задачи составления расписания работ, задачи назначения РТС и имитационное моделирование производственных процессов. Этот комплекс моделей может служить основой для разработки системы поддержки и принятия решений.

3. Поставлена и решена задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными назначения роботизированных транспортных средств, которая позволяет получить оптимальное распределение с учетом ограничений на технические характеристики и на параметры производственных процессов. Использование оптимального распределения РТС при планировании работ в агропромышленном предприятии обеспечило снижение эксплуатационных затрат на 11% по сравнению со стоимостью аналогичных работ в предыдущие периоды времени.

4. Разработана новая иерархическая имитационная модель на стохастических временных раскрашенных сетях Петри для анализа динамики процесса эксплуатации РТС. Модель обладает гибкой структурой и построена по модульному принципу. Она позволяет учитывать вероятности

появления отказов в системах, агрегатах и узлах роботизированного транспортного средства для реализации прогнозного технического обслуживания. Использование системной имитационной модели обеспечило сокращение времени простоя РТС на техническом обслуживании и ремонте в среднем на 12%; снижение задержек сроков производственных работ в среднем до уровня 6% по сравнению с 10% в предыдущие годы.

5. Использование результатов диссертации позволило уменьшить сроки проектирования обслуживающей инфраструктуры для роботизированных автомобилей при выполнении научно-исследовательских работ в рамках проекта Минобрнауки «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления» по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

АА – автономный (беспилотный) автомобиль;

БД – база данных;

ИМ - имитационная модель;

ИИМ – иерархическая имитационная модель;

ИТ – информационные технологии;

ОН – оптимизационная задача назначений;

РТС – роботизированное транспортное средство;

РА – роботизированный сельскохозяйственный автомобиль;

РССА – система роботизированных сельскохозяйственных автомобилей;

СППР – система поддержки принятия решений;

ТО и Р – техническое обслуживание и ремонт;

ТС – транспортное средство;

ЦД – цифровой двойник;

CPN – Colored Petri Net – раскрашенные сети Петри;

HPN – Hierarchical Petri Net – иерархические сети Петри;

PN – Petri Net – сети Петри;

TCPN – Timed Colored Petri Net –временные раскрашенные сети Петри;

SCPN – Stochastic Colored Petri Net – стохастические раскрашенные сети Петри.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акинфиев В.К., Цвиркун А.Д. Оптимизационно-имитационные методы в задачах управления развитием крупномасштабных систем // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 5690-5696.
2. Акинфиев В.К., Цвиркун А.Д. Оптимизационно-имитационные методы выбора инвестиционных решений в крупномасштабных системах / Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2017): материалы X международной конференции. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова; Российская академия наук; Под общей редакцией Васильева С.Н., Цвиркуна А.Д. М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва), 2017. С. 12-17.
3. Балакирев В.С., Большаков А.А. Надежность и диагностика автоматизированных систем: Учебное пособие для вузов / СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 144 с.
4. Белокуров В.П., Кучув К.А., Бусарии Э.Н. Оценка показателей надежности лесовозных автотранспортных средств// Научный журнал КубГАУ. 2012. №77(03).
5. Бокучава И.Т., Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К., Орлов С.П., Георгобиани З.Г. Оптимизация функционирования и структурного построения сложных систем / Тбилиси: «Мецниереба», 1989. – 72 с.
6. Большаков А.А., Слободянюк Л.А., Шашихина О.Е., Ковальчук Я.А. Системный анализ, математическое моделирование и оптимизация процесса формирования производственного расписания обработки металлоконструкций//Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24. № 7. С. 84-92.

7. Боровков А.И. и др. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии». Результаты и перспективы // Журнал «Инновации». 2019. №11 (253). С. 89-104.
8. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами/ Под ред. чл.-корр. РАН Новикова Д.А. – М.: Либроком, 2009. 264 с.
9. Бурков В.Н., Ириков В.А. Модели и методы управления организационными системами / М.: Наука, 1994. 270 с.
10. Бурковский В.Л., Кравец О.Я., Подвальный С.Л. Основы моделирования в среде GPSS: Учеб. пособие / Воронеж: ВГТУ, 1994. 80с.
11. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теории и практика: учебное пособие / М.: Радиотехника, 2009. 392с
12. Волхонская Е.Е., Орлов С. П. Системные модели парка автономных транспортных средств для виртуальных испытаний при организации технического обслуживания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 3. С. 7-16 // DOI: 10.24143/2072-9502-2023-3-7-16
13. Волхонская Е.Е., Орлов С.П. Моделирование системы автономных транспортных средств в процессе виртуального запуска в эксплуатацию//Математические методы в технологиях и технике. 2022. №1. С. 97-103// DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_1_97
14. Волхонская Е.Е., Орлов С.П. Модель стратегии каннибализации при техническом обслуживании роботизированных автомобилей //Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия

Естественные и технические науки. 2023. № 1. С. 52-56 // DOI: 10.37882/2223-2966.2023.01.05

15. Воронин А.А., Губко М.В., Мишин С.П., Новиков Д.А. Математические модели организаций: Учебное пособие / М.: ЛЕНАНД, 2008. 360 с.

16. Воропаев Г.В., Киселев В.Г., Пряжинская В.Т. и др. Методы системного анализа в проблемах рационального использования водных ресурсов. Т. 2 / Под ред. Моисеева. Н.Н. 1976. 502 с.

17. Гольдштейн Е.Г., Юдин Д.Г. Задачи линейного программирования транспортного типа. М.: Наука, 1969. 382 с.

18. Гончар Д.Р. Параллельный алгоритм планирования групп вычислительных работ на основе метода ветвей и границ//Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020): материалы XIII международной конференции. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова; Российская академия наук; Под общей редакцией Васильева С.Н., Цвиркуна А.Д. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). 2020. С. 12-17.

19. Горбатов В.А. Теория частично упорядоченных систем. М.: Сов. радио, 1976. 336 с.

20. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Издательское оформление. М.: Стандартинформ, 2017.

21. ГОСТ Р 27.303-2021 (МЭК 60812:2018) Надежность в технике. анализ видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2022.

22. ГОСТ Р 27.606-2013 «Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность». М.: Стандартинформ, 2014.

23. ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения». М. Стандартиформ, 2022.
24. ГОСТ Р МЭК 62337-2016. Ввод в эксплуатацию электрооборудования, систем контроля и управления предприятий обрабатывающей промышленности. Типовые стадии и этапы. Введ.: 01.04.2017. Официальное издание. Москва. 2016. 32 с.
25. Грищенко М.А., Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Разработка диагностических интеллектуальных систем на основе онтологий//Онтология проектирования. 2018. Т. 8. №. 2(28). С. 265-284.
26. Губанов Н.Г., Михеев Ю.В., Одинцов В.П., Ахтямов Р.Н., Морев А.С. Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства//Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной конференции. Самара: Офорт. 2019. С.171-174.
27. Губко М.В. Математические модели оптимизации иерархических структур / М.: ЛЕНАНД, 2006. 264 с.
28. Губко М.В. Построение комплексных механизмов управления организационным поведением / Проблемы управления. М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). 2020. №3. С. 14–25.
29. Долинина О.Н., Кушников В.А. Методы и технологии обеспечения качества интеллектуальных систем принятия решения / Программная инженерия. 2021. Т. 12. № 4. С. 189-199.
30. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Использование онтологических шаблонов содержания при построении баз знаний для

технического обслуживания и ремонта авиационной техники /
Онтология проектирования. 2022. Т.12. № 2(44). С.158-171.

31. Задиран К.С., Щербаков М.В., Сай Ван Квонг. Прогнозирование
остаточного ресурса оборудования в условиях малой выборки данных /
Управление большими системами: сборник трудов. 2023.
№ 102. С. 99-113

32. Зайцев Д.А., Шмелева Т.Р. Моделирование телекоммуникационных
систем в CPN Tools: учебное пособие. Одесса: Одесская национальная
академия связи, 2006. 60 с.

33. Землянухин М.Г., Чернышева Г.Д. Задача составления
оптимального графика работ / Вестник Воронежского
государственного университета. 2014. № 1. С. 117-119.

34. Ириков В.А., Тренев В.Н, Распределенные системы принятия
решений / М.: Наука, 1999.

35. Ковалев С.П., Небера А.А., Губко М.В. Цифровая платформа для
реализации автоматизированных систем управления распределенными
энергоресурсами / Проблемы управления. М.: Издательство: Институт
проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва).
2020. №6. С. 57-70.

36. Кульба, Красицкий П.В., Красицкая Л.М. В.В. Модели и методы
информационной поддержки принятия управленческих решений на
различных этапах жизненного цикла малого предприятия / М.: ИПУ
РАН, 2007. 63 с.

37. Липаев, В.В. Распределение ресурсов в вычислительных системах /
М.: Статистика, 1979. 247 с.

38. Лянденбургский В.В., Тарасов А.И., Судьев В.В. Макетный образец
встроенной системы диагностирования / Интернет-журнал
«НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Т.7. №1.

<http://naukovedenie.ru/PDF/23TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/23TVN115

39. Мазур И.И., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г. Управление проектами: Учебное пособие / Под общ. ред. И.И. Мазура. 2-е изд. М.: Омега-Л, 2004. 664 с.
40. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем: Пер. с англ. / Под ред. Шахнова И.Ф. Предисл. чл.-корр. АН СССР Г.С. Поспелова. М.: Мир, 1973. 344 с.
41. Моисеев Н.Н., Гермейер Ю.Б. Введение в теорию иерархических систем управления / Math. Operationsforsch. und Statist. 1973. V. 4. №2. Р. 133-154.
42. Национальная технологическая инициатива. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nti2035.ru/> (дата обращения: 26.06.2023).
43. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд / М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. 184 с.
44. Новиков, Д.А., Губко М.В. Методы оптимизации структуры иерархических систем / Управление развитием крупномасштабных систем. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). 2015. С. 359-370.
45. Новиков, Д.А. Сетевые структуры и организационные системы / М.: ИПУ РАН (научное издание), 2003. 102 с.
46. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / М.: МПСИ, 2005. 584 с.
47. Харин О. «В 2019 году предполагается построение «цифровых двойников» и интеллектуальных прогнозных моделей». [Электронный ресурс]. URL: https://www.gudok.ru/science_education/?ID=1447521 (дата обращения: 26.05.2023).

48. Орлов С.П. Алгебраическая модель системы диагностирования с переменной структурой / Техническая диагностика. Тезисы докладов VI Всесоюзн. совещания. М.: ИПУ РАН, 1987. С. 8-10.
49. Орлов С.П. Моделирование агрегатов роботизированного грузового автомобиля с помощью цифровых двойников / Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2023. №5. С.88-92.
50. Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля / Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». 2021. Т. 29(1). С. 46-57. / DOI: 10.14498/tech.2021.1.4
51. Орлов С.П., Синтез структур и оптимизация параметров систем обработки информации. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 152 с.
52. Орлов С.П., Сусарев С.В. Имитационные модели на сетях Петри для анализа процессов обслуживания и ремонта сложных технических систем / Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2022. Т. 30. № 4. С. 49-75.
53. Орлов С.П., Сусарев С.В. Система поддержки принятия решений при управлении техническим обслуживанием автономных транспортных средств / Онтология проектирования. 2023. Т.13. №3(49). С.424-436.
54. Орлов С.П., Учайкин Р. А. Автоматизированное управление использованием средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии / Материалы конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ». Саратов, 2019. С. 81-87.

55. Орлов, С.П. Оптимизационно-имитационное моделирование при структурном синтезе управляющих вычислительных систем / Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 1994. Вып. 1. С.56–65.
56. Отчет о прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления по теме: «Теоретическое исследование поставленных задач. функциональное проектирование программных и аппаратных средств роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления (промежуточный) этап 2». ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», 2019 год [Электронный ресурс] // Самарский политех. Опорный университет // URL: <https://samgtu.ru/science/science-soglashenie-14-577-21-0286-etap-1>
57. Офицеров В.П., Смирнов С.В Оптимизация при ограничении числа проектных переменных / Онтология проектирования. 2021. Т.11. №2(40). С. 227–238.
58. Плескунов М.А. Задачи сетевого планирования: учебное пособие / Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 92 с.
59. Помогаев В.М. Концепция развития интегрированной информационной поддержки жизненного цикла сельскохозяйственных машин на этапе технического обслуживания и ремонта//Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022. № 3 (47). С. 87-96
60. Помогаев В.М. Мониторинг технического состояния сельскохозяйственных машин и качества выполнения технологических

операций//Вестник Омского государственного аграрного университета. 2023. № 2 (50). С. 143-152

61. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление / М.: «Сов.радио», 1976. 404с.

62. Поспелов Г.С., Ириков В.А., Курилов А.Е. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ / М.: Наука, 1985. 424 с.

63. Прангишвили И.В. Системный подход и повышение эффективности управления / М.: Издательство «Наука», 2005. 422 с.

64. Ростсельмаш. Зерноуборочные комбайны TORUM 785. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785/> (дата обращения 20.4.2023).

65. Рыбаков В.Н., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3(27). С. 326-331.

66. Семенова В.А., Сирнов С.В. Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограничений существования свойств предметной области / Онтология проектирования. 2020. Т.10. №3(37). С.361-379.

67. Смирнов, С.В. Применение информационной системы для мониторинга и поддержки принятия решений / Труды Международной научно-методической конференции «Проблемы управления качеством образования».– СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. С. 48-52.

68. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://sntr-rf.ru/> (дата обращения: 30.06.2023).

69. Сусарев С.В. Модели оценки эффективности технического обслуживания роботизированных транспортных средств// Вестник

Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020.С. 62-76

70. Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)». 2021. Вып. № 58(84). С. 98-104// DOI: 10.36807/1998-9849-2021-58-84-98-104

71. Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко Ю.В. Принципы построения систем управления роботизированными транспортными средствами с автономным и дистанционным режимом управления// В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. Самара. 2019. С. 107-110.

72. Трахтенгерц Э.А. Компьютерные методы реализации экономических и информационных управленческих решений. В 2-х томах. Том 1. Методы и средства / М.: СИНТЕГ, 2009. 172 с.

73. Хелдман К. Профессиональное управление проектом [Электронный ресурс] / Пер. с англ. Шаврина. А.В. 5-е изд. (электронное). М.: Бином. Лаб. знаний, 2012. 728 с.

74. Цветков А.В. Условия оптимальности согласованных механизмов функционирования при неопределенности / Неопределенность, риск, динамика в организационных системах. М.: ИПУ РАН, 1984. С. 73-81.

75. Цвиркун А.Д., Чурсин А.А., Ерешко Ф.И. Задачи стратегического управления в крупномасштабных проектах (на примере ракетно-космической отрасли) / Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): материалы IX международной конференции. Под общей редакцией Васильева С.Н., Цвиркуна. А.Д. М.: Издательство:

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва), 2016. С. 130-138.

76. Цифровой двойник: экспериментируя с будущим [Электронный ресурс]. URL: <https://rostec.ru/news/tsifrovoy-dvoynik-eksperimentiruya-s-budushchim/> (дата обращения: 05.06.2023).

77. Щербаков М.В., Сай Ван К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы. 2020. № 2. С. 186-194.

78. Bechar A., Edan Y. Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots// Industrial Robot-an International Journal, 30 (5) (2003), pp. 432-436.

79. Gongal A., Amatya S., Karkee M., Zhang Q., Lewis K. Sensors and systems for fruit detection and localization: a review Comput. Electron// Agric., 116 (2015), pp. 8-19.

80. Bechar A., Vigneault C., Agricultural robots for field operations: Concepts and components, Biosystems Engineering, Volume 149, 2016, pp. 94-111.

81. Baruwa O.T., Piera M.A. A coloured Petri net-based hybrid heuristic search approach to simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles. Int. J. Prod. Res. 2016, 54, pp. 4773–4792.

82. Bazhanov A., Vashchenko R., Rubanov V., Bazhanova O. Development of an automated system for monitoring and diagnostics a guided robotic vehicle// In: Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing, Cham. 2020. Vol. 259. P. 93-107.

83. Bengochea-Guevara J.M., Conesa-Muñoz J., Andújar D., Ribeiro A. Merge fuzzy visual servoing and GPS-based planning to obtain a proper

navigation behavior for a small crop-inspection robot *Sensors* (Switzerland). 2016. 16 (3).

84. Bernhardt R., Schreck, G., Willnow C. Realistic robot simulation, *Computing & Control Engineering Journal*, 6, 4. 1995. P. 174-176.

85. Boukreda D., Maamri R., Aknine S, A Timed Colored Petri-Net-based Modeling for Contract Net Protocol with Temporal Aspects. In *Proceedings of the International Conference on Computing in the Global Information Technology, ICCGI*, Venice, Italy, 24–29 June 2012; pp. 40-44.

86. Cassady C.R., Mason S.J., Yeung T.G. Quantifying the impact of aircraft cannibalization //Wright-Patterson Air Force Base: Air Force Research Laboratory. 2006.

87. Ceres R., Pons F.L., Jimenez A.R., Martin F.M., Calderon L. Design and implementation of an aided fruit-harvesting robot (Agribot)// *Industrial Robot*, 1998, Vol. 25 (5), pp. 337-346.

88. Charnes A., Coper W.W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units / *Europ. J. of Operational Research*. 1978. №2. P. 429-444.

89. CLAAS. Зерноуборочные комбайны LEXION. - URL:<https://www.claas.ru/produktsiya/zyernouborochnyye-kombajny/lexion-8700-7600#lexion-8000> (дата обращения 20.04.2023).

90. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software / (Springer –Verlag US), 2007. 492 p.

91. Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J. Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. *Handbook on Data Envelopment Analysis* / Boston, MA.: Springer, 2011. P. 1–39.

92. Del Foyo P. M. G., Silva J. R. Improving the Verification of Real-Time Systems Using Time Petri Nets// *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2017. Vol. 28(6). P. 774–784.

93. Del Foyo P.M.G., Silva J.R. Improving the Verification of Real-Time Systems Using Time Petri Nets// Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2017. Vol. 28(6). P. 774–784. DOI: 10.1007/s40313-017-0343-x.
94. Eizicovits D., Berman S. Efficient sensory-grounded grasp pose quality mapping for gripper design and online grasp planning//Robotics and Autonomous Systems, 62 (8) (2014), pp. 1208-1219.
95. Eversheim W., Steinfatt E. Moderne Produktionstechnik — Aufgabe und Herausforderung für die Betriebswirtschaft. In: Adam, D., Backhaus, K., Meffert, H., Wagner, H. (eds) Integration und Flexibilität. Gabler Verlag. 1990. P. 18–23.
96. Fisher W.W. Issues and Models in Maintenance Systems Incorporating Cannibalization: A Review// Information Systems and Operational Research. 1990. Vol. 28(1). P. 154-164.
97. Glaessgen E., Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles// 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. 2012, P. 1818.
98. Gockel B. et al. Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles //53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA,2012, P. 1813.
99. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins // Complex Systems Engineering: Theory and Practice. 2019. P.175-200.
100. Grinshpun G., Cichon T., Dipika D., Rossmann J. From Virtual Testbeds to Real Lightweight Robots: Development and deployment of control algorithms for soft robots, with particular reference to // Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics. 2016. P. 1-7.

101. Guo Z., Zhang Y., Zhao X., Song X A Timed Colored Petri Net Simulation-Based Self-Adaptive Collaboration Method for Production-Logistics Systems//Appl. Sci. 2017. Vol. 7, 235.
102. Hague T., Marchant J.A., Tillett N.D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles// Computers and Electronics in Agriculture, 25 (1–2) (2000), pp. 11-28.
103. Hamroun A., Labadi K., Lazri M. Modelling and Performance Analysis of Electric Car-Sharing Systems Using Petri Nets. E3S Web Conf. 2020. Vol. 170, 03001.
104. Hansen J., Silva E., Bilberg A., Bro C. Design and development of Automation Equipment based on Digital Twins and Virtual Commissioning // Procedia CIRP. 2021. P. 1167-1172.
105. Henten E.J., Bac C.W., Hemming J., Edan Y. Robotics in protected cultivation// IFAC Proceedings Volumes. 2013. 46 18 , pp. 170-177.
106. Hoffman P. On Virtual Commissioning of Manufacturing Systems. PhD Thesis. 2016. P. 278.
107. Holland S.W., Nof S.Y. Emerging trends and industry needs handbook of industrial robotics//John Wiley & Sons, Inc. 2007. P. 31-40.
108. INCOSE. Systems Engineering Handbook V. 3.2.2 - A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, San Diego, CA, USA, International Council on Systems Engineering (INCOSE). 2011. P. 386.
109. Jensen K., Kristensen L.M. Colored Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems / Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2009. 382 p.
110. Kerzner H. Project management: a system approach to planning, scheduling, and controlling / 10th ed. – Hoboken, NJ.: J. Wiley, cop., 2009. 1094 p.

111. Kizim A.V., Kravets A.G. Software and information support of process of technical maintenance and repair of industrial equipment// SPb.: 2019. Vol. 2. P. 130-139.
112. Kizim A.V., Kravets A.G. On Systemological approach to intelligent decision-making support in industrial cyber-physical systems// In: Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges. Studies in Systems, Decision and Control. Springer Nature Switzerland. 2020. Vol. 260. P. 167-183.
113. Klir G.J. Uncertainty and Information. Foundations of Generalized Information Theory / Hoboken, NJ.: John Wiley, 2005. 499 p.
114. Krause D., Schwede LN., Dambietz F.M., Hanna M. Model-Based Systems Engineering: Discovering Potentials for 692 Methodical Modular / Design Methodology for Future Products. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany. 2022. P. 265-285.
115. Kucera E., Haffner O., Drahoš P., Leskovský R., Cigánek J. PetriNet Editor + PetriNet Engine: New Software Tool. Appl. Sci. 2020, 10, 7662.
116. Le B., Andrews J. Petri net modelling of bridge asset management using maintenance-related state conditions// Structure and Infrastructure Engineering. 2016. Vol. 12. Issue 6. P.730-751.
117. Le B., Andrews J., Fecarotti C. A Petri net model for railway bridge maintenance//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2017. Vol. 231(3). P. 306–323.
118. Lee C., Park S. Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems// Journal of Computational Design and Engineering Vol. 1, No.3 (2014) P. 213–222 .
119. Lpsolver. Introduction to lp_solve 5.5.2.11 [Электронный ресурс]// Lpsolver // URL: <https://lpsolve.sourceforge.net/5.5> (дата 12.10.23).

120. Mann M., Zion B., Shmulevich I., Rubinstein D. Determination of robotic melon harvesting efficiency: A probabilistic approach// International Journal of Production Research, 2016, 54 (11), pp. 3216-3228.
121. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems — Transportation system case study //22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. P. 1-4.
122. Orlov S.P., Susarev S.V. Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919. 052056.
123. Orlov S.P., Susarev S.V., Gubanov N.G., Sidorenko K.V., Morev A.S. Intelligent Model-Based Diagnostic System for an Agricultural Robotic Vehicle System//In: Proc. of the 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019) (Tomsk, Russia). Tomsk: TPU Publishing House. 2019. P. 469-474.
124. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Kravets O.Ya. Simulation of the automated motion of a robotic agricultural vehicle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol.862, 042004.
125. Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A. Application of hierarchical colored petri nets for technological facilities' maintenance process evaluation//Applied Sciences, MDPI , Basel, Switzerland, 2021. Vol. 11, N.11, 5100.
126. Orlov S.P., Susarev S.V., Pugachev A. Intelligent Diagnostic System of KAMAZ Robotic Vehicle Units //Proceedings - 2019 21st International Conference;Complex Systems: Control and Modeling Problems, CSCMP 2019. IEEE Xplore, 2020. P. 307-310.
127. Peterson J.L. Petri Net Theory and the Modeling of Systems; Prentice-Hall: Bergen County, NJ, USA, 1981.

128. Phanden R., Sharma P., Dubey A. A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics // *Materials Today: Proceedings* 2021. P. 174-178.
129. Pla A., Gay P., Melendez J., Lopez B. Petri net-based process monitoring. A Workflow management system for process modeling and monitoring// *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014. Vol. 25. P. 539-554.
130. Planas, A.P.; Gay, P.; Meléndez, J.; López, B. Petri net-based process monitoring: A workflow management system for process modelling and monitoring. *J. Intell. Manuf.* 2012, 25, 539–554, doi:10.1007/s10845-012-0704-z.
131. PlanWIZARD [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wizardsoft.ru/product/planwizard> (дата обращения: 25.05.2023).
132. Reifsnider K., Majumdar P. Multiphysics stimulated simulation digital twin methods for fleet management //54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013. P. 1578.
133. Riascos, L.A.M., Moscato, L.A., Miyagi, P. Detection and treatment of faults in manufacturing systems based on Petri Nets. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2004, 26, pp. 280–289, doi:10.1590/s1678-58782004000300004.
134. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. P. 567-572.
135. Rundong Y. Enhancing the Performance of Automated Guided Vehicles Through Reliability, Operation and Maintenance Assessment // *Doctoral thesis*. 2020. P. 283.
136. Sang G. M., Xu L., Vrieze P., Bai Y., Pan F. Predictive Maintenance in Industry 4.0 // *Proceedings of the 10th International Conference on Information Systems and Technologies (ICIST' 2020)*. Lecce, Italy, 2020.

URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/237394312.pdf> (дата обращения: 23.01.2023).

137. Schluse M., Rossmann. J. From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems // Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics 2016. P. 1-6.

138. Sheng J., Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalisation// Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67–88.

139. Sheng, J., Prescott, D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2017, 168, pp. 290-305.

140. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multi-agent systems: algorithmic, game-theoretic and logical bases / Publishing house of the Cambridge University, 2009. 496 p.

141. Smarslok B., Culler A., Mahadevan S. Error quantification and confidence assessment of aerothermal model predictions for hypersonic aircraft //53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. P. 1817.

142. Susarev S., Orlov S., Bizyukova E., Uchaikin R. The Models for Predictive Maintenance of Robotic Agricultural Vehicles// Cyber-Physical Systems: Intelligent Models and Algorithms. Studies in Systems, Decision and Control, vol 417. Springer, Cham. 2022 . P.157-168. DOI: 10.1007/978-3-030-95116-0_13.

143. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Kłodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems

- // Proceedings of 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. P. 1-9.
144. Tuegel E. The airframe digital twin: some challenges to realization //53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA. 2012. P. 1812.
145. Utstumo T., Berge T.W., Gravdahl. J.T. Non-linear model predictive control for constrained robot navigation in row crops// Paper presented at the industrial technology (ICIT), 2015 IEEE international conference. 2015.
146. Vasilyev S., Tsvirkun A. Problems of managing the development of large-scale systems in modern conditions / Proc. of 2017 10th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). 2017
147. Wang H. K. et al. The use of high-performance fatigue mechanics and the extended Kalman/particle filters, for diagnostics and prognostics of aircraft structures //CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2015. P. 1-24.
148. Wang J. Time Petri Nets. //In: Timed Petri Nets. The Kluwer International Series on Discrete Event Dynamic Systems. Springer, Boston, MA. 1998. Vol. 9.
149. Yan H.S., Wang N.S., Zhang J.G., Cui, X.Y Modelling, scheduling and simulation of flexible manufacturing systems using extended stochastic high-level evaluation Petri nets. Robot. Comput. Manuf. 1998 Vol. 14. P. 121–140.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНЫХ ПОДСИСТЕМ
РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ

Таблица ПА.1 – Основные показатели надежности тормозной системы
 EBS Wabco PA КАМАЗ с реальным значением времени наработки до
 предотказного состояния элемента

№	Элемент тормозной системы	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
1	Соленоид модулятора передней оси	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 24,7 \cdot 10^{-6}$	40 500
2	Тормозной барабан	$P(t) = 0,91$ $\lambda(t) = 35,8 \cdot 10^{-6}$	27 900
3	Тормозная колодка	$P(t) = 0,91$ $\lambda(t) = 38,7 \cdot 10^{-6}$	25 800
4	Пневмоцилиндр	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 24,7 \cdot 10^{-6}$	40 500
5	Клапан тормозного крана	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 10,5 \cdot 10^{-6}$	95 000
6	Клапан ресивера	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 24,1 \cdot 10^{-6}$	41 500
7	Клапан компрессора	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 23,8 \cdot 10^{-6}$	42 000
8	Шестерня компрессора	$P(t) = 0,96$ $\lambda(t) = 15,7 \cdot 10^{-6}$	63 750
9	Поршень компрессора	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 23,3 \cdot 10^{-6}$	43 000

№	Элемент тормозной системы	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
10	Ускорительный клапан	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11,8 \cdot 10^{-6}$	85 000
11	Соленоид модулятора средней и задней оси	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 21,7 \cdot 10^{-6}$	46 000

Таблица ПА.2 – Основные показатели надежности трансмиссии РА КАМАЗ с реальным значением времени наработки до предотказного состояния элемента

№	Элемент трансмиссии	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
1	Подшипник первичного вала раздаточной коробки	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 14 \cdot 10^{-6}$	71 200
2	Шестерня первичного вала раздаточной коробки	$P(t) = 0,96$ $\lambda(t) = 15,7 \cdot 10^{-6}$	63 750
3	Подшипник промежуточного вала раздаточной коробки	$P(t) = 0,974$ $\lambda(t) = 24,1 \cdot 10^{-6}$	41 500
4	Шестерня промежуточного вала раздаточной коробки	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 22,2 \cdot 10^{-6}$	45 000
5	Пневмомеханизм включения передач	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 16,5 \cdot 10^{-6}$	60 750

№	Элемент трансмиссии	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
6	Механизм привода переднего моста	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11,7 \cdot 10^{-6}$	85 000
7	Механизм привода заднего моста	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11,1 \cdot 10^{-6}$	90 000
10	Кран включения дифференциала	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11,3 \cdot 10^{-6}$	89 000
11	Шестерня главной передачи	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 22,5 \cdot 10^{-6}$	44 500
12	Шестерня карданной передачи	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 24 \cdot 10^{-6}$	41 500

Таблица ПА.3 – Основные показатели надежности подвески РА
КАМАЗ с реальным значением времени наработки до предотказного
состояния элемента

№	Элемент подвески	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
1	Хомут передней рессоры	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 23,8 \cdot 10^{-6}$	42 000
2	Стремянка передней рессоры	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 22 \cdot 10^{-6}$	45 500

№	Элемент подвески	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
3	Передняя рессора	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11,8 \cdot 10^{-6}$	85 000
4	Стойка амортизатора	$P(t) = 0,91$ $\lambda(t) = 37,4 \cdot 10^{-6}$	26 700
5	Буфер передней рессоры	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 19,8 \cdot 10^{-6}$	50 400
6	Задняя рессора	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11,6 \cdot 10^{-6}$	86 000
7	Буфер задней рессоры	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 19,4 \cdot 10^{-6}$	51 600
8	Шарнир рычага задней подвески	$P(t) = 0,91$ $\lambda(t) = 36,2 \cdot 10^{-6}$	27 600
9	Шарнир тяги задней подвески	$P(t) = 0,91$ $\lambda(t) = 37,9 \cdot 10^{-6}$	26 400
10	Хомут задней рессоры	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 24,1 \cdot 10^{-6}$	41 500
11	Ось балансира	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 10,5 \cdot 10^{-6}$	95 000

Таблица ПА.4 – Основные показатели надежности рулевой системы
Bosch PA КАМАЗ с реальным значением времени наработки до
предотказного состояния элемента

№	Элемент рулевой системы	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
1	Шестерня насоса ГУР	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 21,3 \cdot 10^{-6}$	47 000
2	Подшипник насоса ГУР	$P(t) = 0,91$ $\lambda(t) = 41,2 \cdot 10^{-6}$	24 300
3	Вал рулевой колонки	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	93 000
4	Вилка вала рулевой колонки	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 23,8 \cdot 10^{-6}$	42 000
5	Шестерня углового редуктора	$P(t) = 0,95$ $\lambda(t) = 22,8 \cdot 10^{-6}$	44 000
6	Клапан ГУР	$P(t) = 0,953$ $\lambda(t) = 27,8 \cdot 10^{-6}$	36 000
7	Винт рулевого механизма	$P(t) = 0,97$ $\lambda(t) = 11 \cdot 10^{-6}$	91 000
8	Шарнир рулевой тяги	$P(t) = 0,951$ $\lambda(t) = 37,9 \cdot 10^{-6}$	26 400
9	Винт рулевого механизма	$P(t) = 0,93$ $\lambda(t) = 11 \cdot 10^{-6}$	91 000
10	Продольная рулевая тяга	$P(t) = 0,9$ $\lambda(t) = 41,2 \cdot 10^{-6}$	24 300
11	Поперечная рулевая тяга	$P(t) = 0,9$ $\lambda(t) = 40,6 \cdot 10^{-6}$	24 600

№	Элемент рулевой системы	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
12	Шарнир рулевой тяги	$P(t) = 0,9$ $\lambda(t) = 37,9 \cdot 10^{-6}$	26 400

Таблица ПА.5 – Основные показатели надежности топливной системы
РА КАМАЗ с реальным значением времени наработки до предотказного
состояния элемента

№	Элемент тормозной системы	Вероятность безотказной работы $P(t)$ на 2500 часов и интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/час	Наработка до предотказного состояния, час
1	Топливный бак	$P(t) = 0,96$ $\lambda(t) = 13,2 \cdot 10^{-6}$	76 000
2	Форсунка топливная	$P(t) = 0,94$ $\lambda(t) = 25 \cdot 10^{-6}$	40 000
3	Топливные трубки	$P(t) = 0,96$ $\lambda(t) = 16,5 \cdot 10^{-6}$	60 750
4	Насос топливopодкачивающий низкого давления	$P(t) = 0,96$ $\lambda(t) = 15,9 \cdot 10^{-6}$	63 000
7	Датчик давления топлива	$P(t) = 0,89$ $\lambda(t) = 48,2 \cdot 10^{-6}$	20 750
8	Датчик температуры топлива	$P(t) = 0,89$ $\lambda(t) = 45,5 \cdot 10^{-6}$	22 000
9	Привод топливного насоса	$P(t) = 0,9$ $\lambda(t) = 38,3 \cdot 10^{-6}$	26 100

Таблица ПА.6 – Основные показатели проведения технического обслуживания РА КАМАЗ с реальным значением времени наработки до замены

№	Элемент системы	Вид подсистемы	Время наработки до замены, час
1	Фильтр воздушный	Двигатель	492
2	Фильтр масляный	Двигатель	486
3	Фильтр грубой очистки топлива	Топливная	522
4	Фильтр тонкой очистки топлива	Топливная	498
5	Моторное масло	Топливная	486
6	Масло РКПП	КПП	7 280
7	Смазка для редукторов	Трансмиссия	12 450

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ДЕРЕВЬЯ ОТКАЗОВ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ПОДСИСТЕМ
РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ

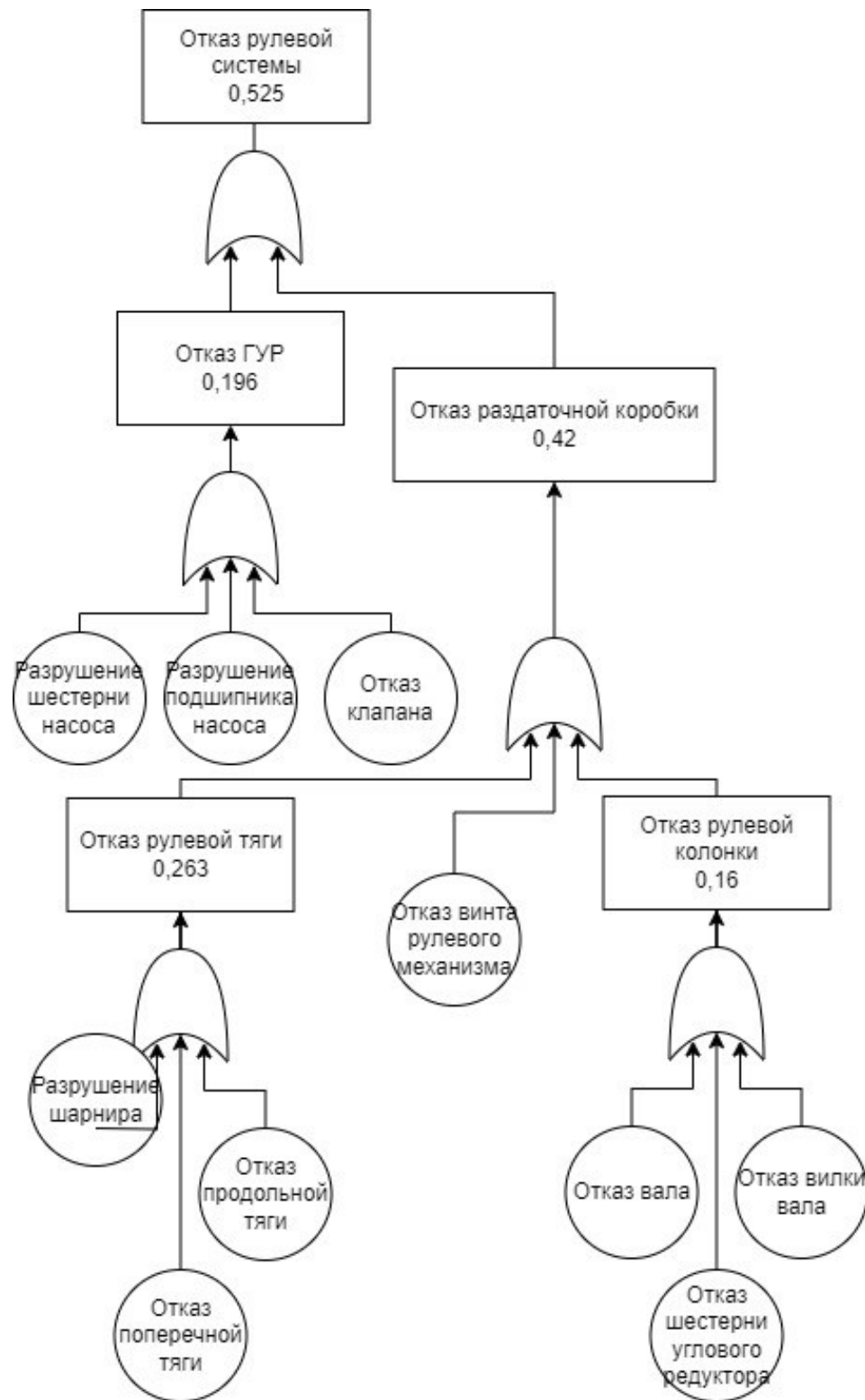


Рисунок ПБ.1 – Дерево отказов для рулевой системы Bosch
 роботизированного автомобиля КАМАЗ

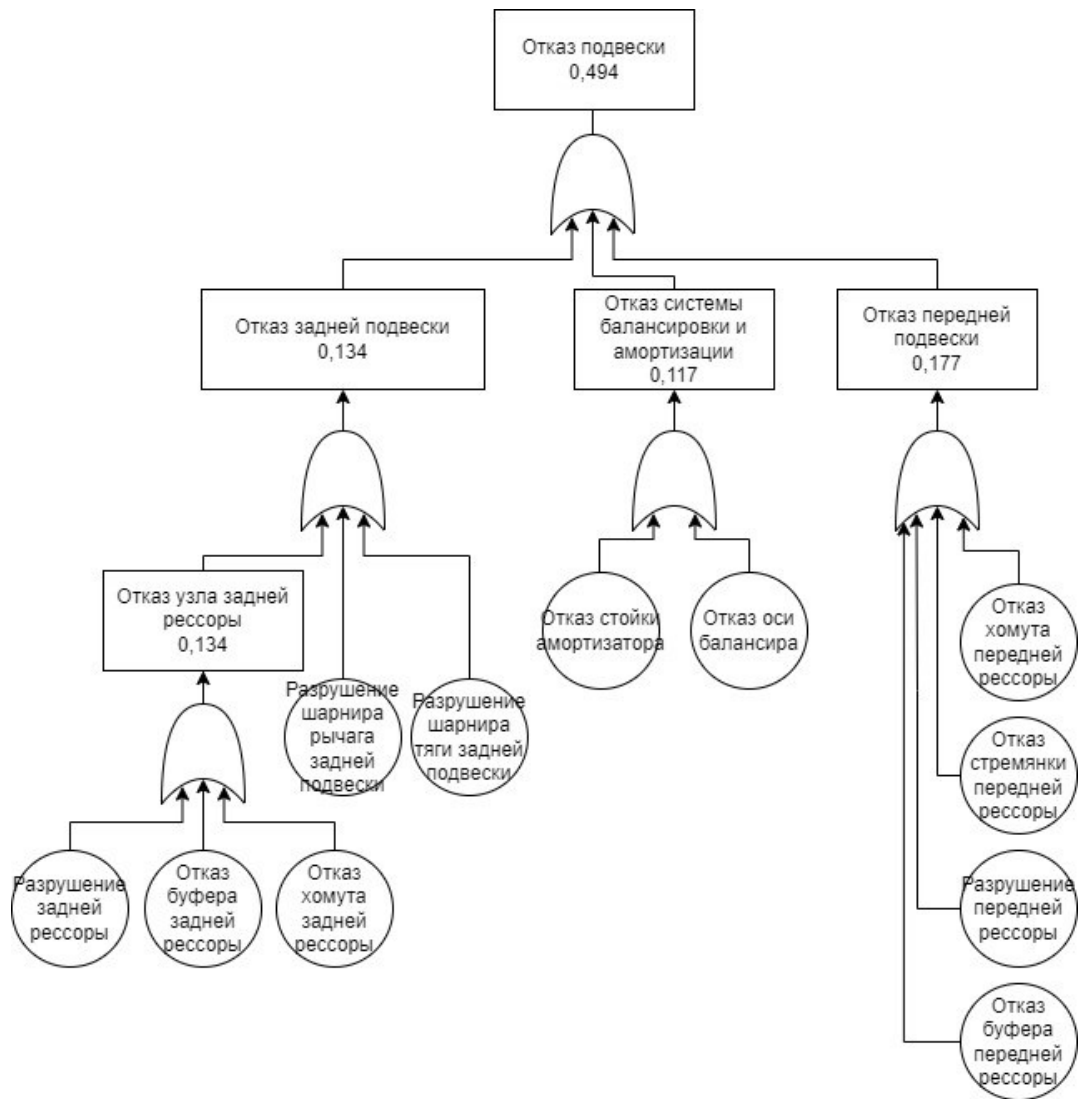


Рисунок ПБ.2 – Дерево отказов для подвески роботизированного автомобиля
КАМАЗ

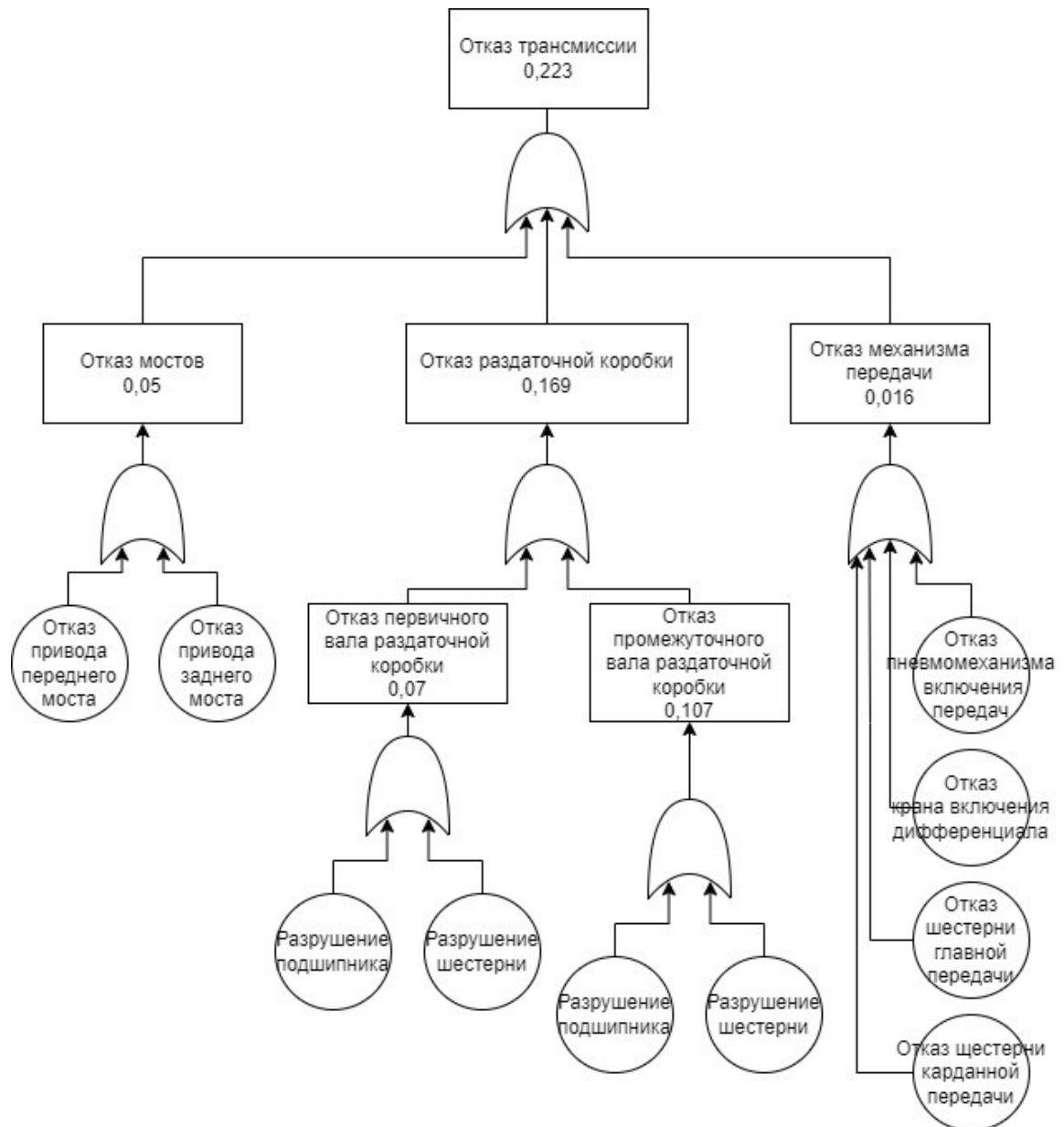


Рисунок ПБ.3 – Дерево отказов для трансмиссии роботизированного автомобиля КАМАЗ

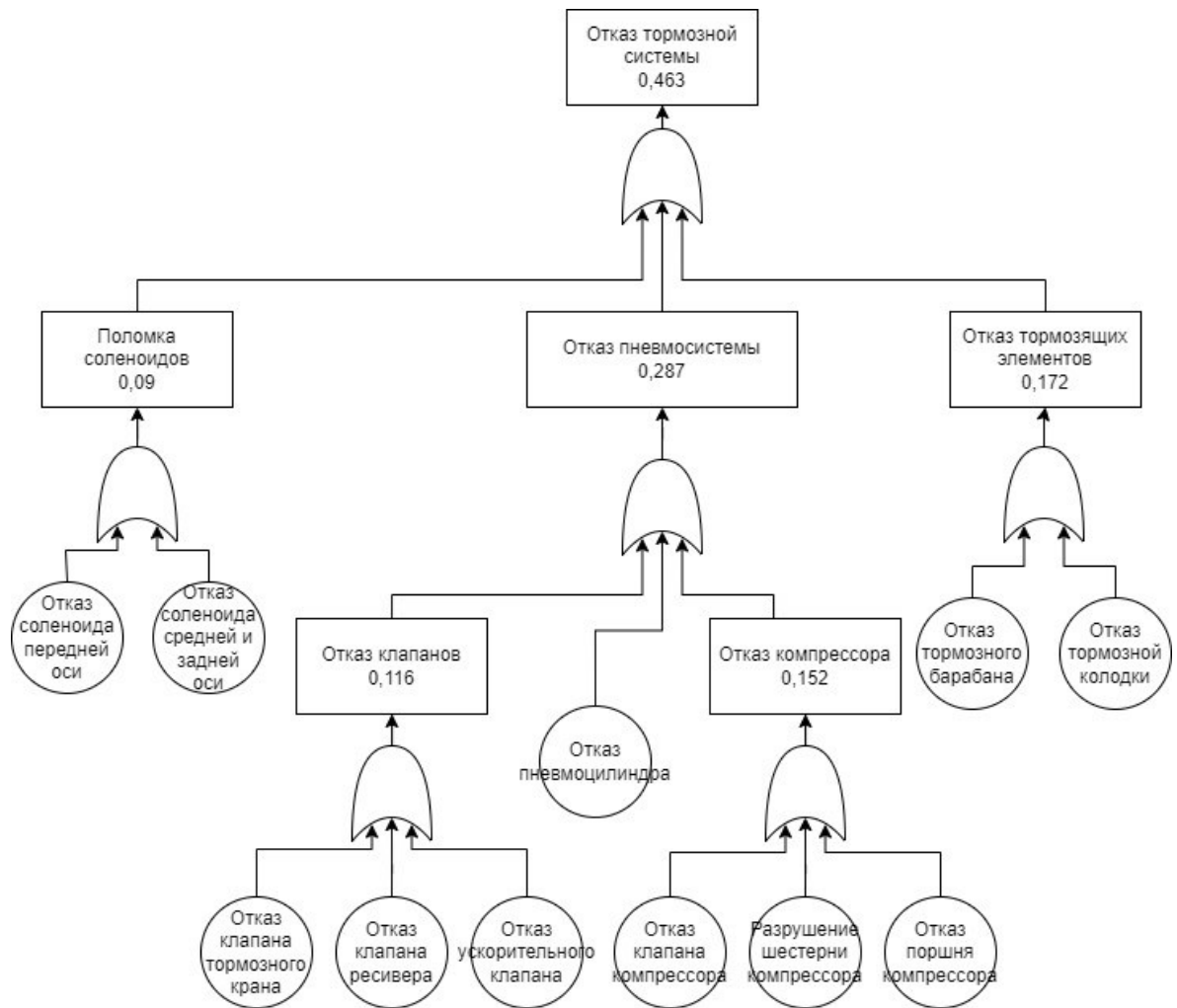


Рисунок ПБ.4 – Дерево отказов для тормозной системы EBS Wabco роботизированного автомобиля КАМАЗ

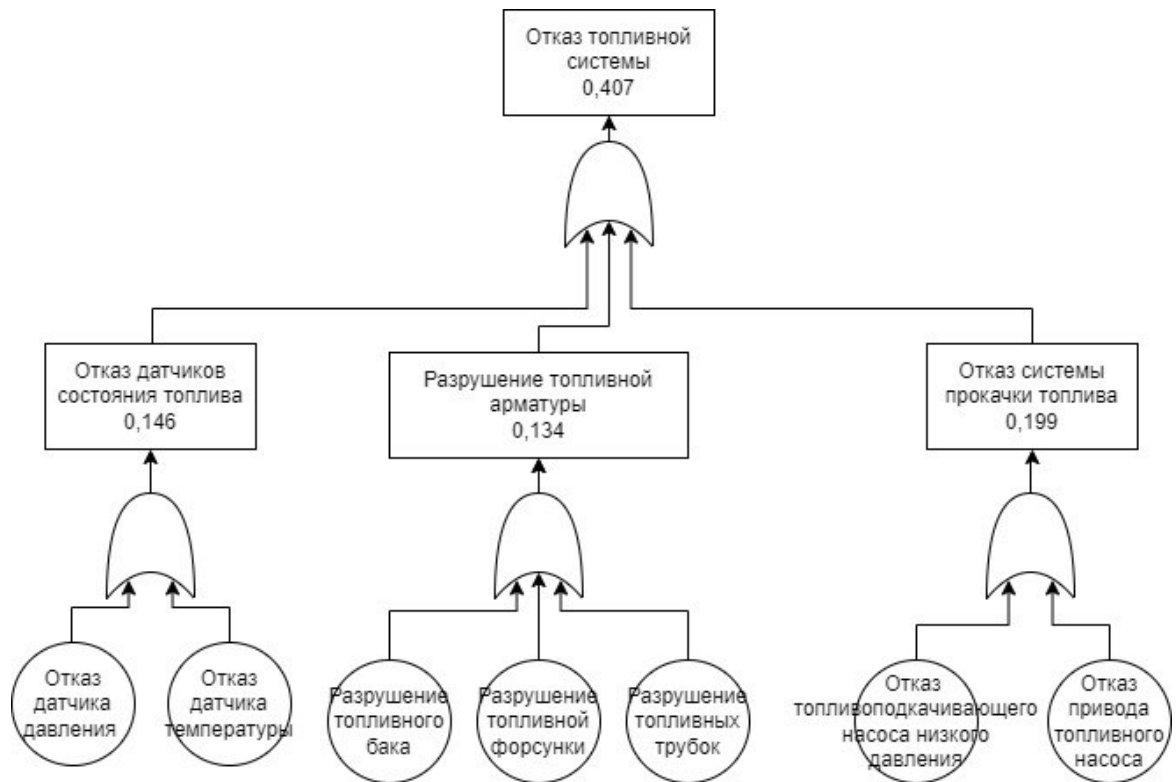


Рисунок ПБ.5 – Дерево отказов для топливной системы роботизированного автомобиля КАМАЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В НИР



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО 02068396, ОГРН 1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», д.т.н., профессор

М.В. Ненашев
« 28 » 01 2024 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Волхонской Елизаветы
Евгеньевны «Управление распределением и техническим обслуживанием
роботизированных транспортных средств на основе цифровых моделей»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе директора института автоматизации и информационных технологий д.т.н., доцента Савельева К.В., заведующего кафедрой «Автоматизация и управления технологическими процессами» к.т.н., доцента Сусарева С.В. и о. заведующего кафедрой «Вычислительная техника» к.х.н., доцента Чувакова А.В. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Волхонской Е.Е. использованы в проекте Минобрнауки РФ «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления», уникальный ID номер RFMEFI157718X0286, выполненном ФГБОУ ВО «СамГТУ» по соглашению № 075-02-2018-225 в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы».

Разработанные Волхонской Е.Е. цифровые модели и методика виртуальных испытаний использованы на этапе виртуального ввода в производство при проектировании системы технического обслуживания роботизированных автомобилей на базе шасси КАМАЗ.

1. Решение задачи оптимального назначения роботизированных автомобилей позволяет находить рациональное распределение ресурсов при выполнении работ в производственно-логистической системе.

2. Комплекс цифровых имитационных моделей на сетях Петри обеспечивает анализ множества сценариев выполнения заданных работ в различных условиях эксплуатации роботизированных автомобилей при учете вероятностных характеристик отказов агрегатов автомобилей.

В результате обеспечивается принятие обоснованных проектных решений, направленных на повышение надежности и качества эксплуатации роботизированных автомобилей. Использование результатов кандидатской диссертации Волхонской Е.Е. позволило на 15% сократить в рамках выполняемой НИР сроки проектирования обслуживающей инфраструктуры для роботизированных автомобилей КАМАЗ.

И. о. директора ИАИТ, д.т.н., доцент



К.В. Савельев

Зав. кафедрой АУТП
к.т.н., доцент



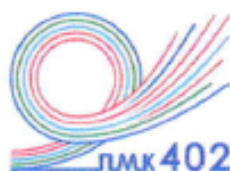
С.В. Сусарев

И. о. зав. кафедрой ВТ
к.х.н., доцент



А.В. Чуваков

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ПЕРЕДВИЖНАЯ МЕХАНИЗИРОВАННАЯ КОЛОННА-402»

АО «ПМК-402» • Россия, 443099, г. Самара, ул. Чапаевская, 114
тел.: +7 (846) 330-10-35, 330-10-70
• e-mail: info@pmk402.ru

Иск. № 6/н от 19.02.2024 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Волхонской Елизаветы Евгеньевны «Управление распределением и техническим обслуживанием роботизированных транспортных средств на основе цифровых моделей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Материалы диссертации Волхонской Е.Е. были использованы на предприятии АО «ПМК-402» при планировании работы транспортных средств: автомобилей, тракторов и специализированной техники при прокладке магистральных волоконно-оптических линий связи:

1. Метод оптимального распределения транспортных средств по производственным работам, использующий задачу оптимизации назначения с учетом ограничений на технические характеристики транспортных средств.

2. Цифровая модель имитации случайных потоков отказов в агрегатах транспортных средств для прогнозирования моментов начала технического обслуживания.

Указанные результаты диссертации позволили сократить эксплуатационные затраты в среднем на 8% и снизить время простоя транспортных средств.

Генеральный директор
АО «ПМК-402»



Иванов О.Г.



АО «ЧЕЛНО-ВЕРШИНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»

ИНН 6385001612, КПП 631201001
 443109, Самарская область, г. Самара,
 Зубчаниновское шоссе, дом 128/2, литер А А1 16, комната 58
 Тел.: 8(846) 931-00-69, 931-06-65,
 р/с 40702810054260100225 Поволжский банк ПАО «Сбербанк России» г. Самара
 к/с 30101810200000000607, БИК 043601607
 Адрес производства: 446840, Самарская область, Челно-Вершинский р-н,
 с. Челно-Вершины, ул. Заводская, д. 24 Тел. 8 (84651) 2-16-65
www.chvmz.ru

Утверждаю

Генеральный директор

Эйвазов Т.С.

 «Челно-Вершинский
 машиностроительный
 завод» 03.04.2024 г.
 общество
 с ограниченной
 ответственностью
 г. Самара

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Волхонской Елизаветы Евгеньевны «Управление распределением и техническим обслуживанием роботизированных транспортных средств на основе цифровых моделей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе заместителя генерального директора по финансам Гармаша А.В. и коммерческого директора Шашкина Е.В. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Волхонской Е.Е. использованы в процессе производственной деятельности предприятия.

Разработанная методика оптимального распределения транспортных средств применялась при планировании назначений автопарка предприятия на погрузочно-разгрузочные и транспортные работы. В результате стоимость эксплуатации транспортных средств уменьшена в среднем на 10% за счет учета состояния и технических характеристик автомобилей.

Планирование технического обслуживания и ремонта транспортных средств с помощью цифровой имитационной модели эксплуатации позволила снизить простой в период ТОиР в среднем на 12 %.

Заместитель генерального директора по финансам

Гармаш А.В.

Коммерческий директор

Шашкин Е.В.

Акт об использовании в учебном процессе

Утверждаю:

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
профессор
Юсупова О.В.
08 2024 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Волхонской Елизаветы Евгеньевны

«Управление распределением и техническим обслуживанием роботизированных транспортных средств на основе цифровых моделей» в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Комиссия в составе начальника учебного управления к.э.н., доцента Алонцевой Е.А., и.о. директора Института автоматизации и информационных технологий д.т.н., доцента Савельева К.В., зав. кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами» к.т.н., доцента Сусарева С.В. составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в рамках диссертационной работы Волхонской Е.Е., использованы в учебном процессе на кафедре «Автоматизация и управление технологическими процессами» СамГТУ при подготовке магистров по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Результаты научных исследований, полученные в виде методики виртуальных испытаний технологического оборудования на цифровых моделях, использованы при чтении лекционного курса и проведении практических занятий по дисциплине «Математическое моделирование».

Реализация полученных автором результатов исследований позволила повысить эффективность и качество учебного процесса.

Начальник учебного управления
СамГТУ, к.э.н. доцент

Е.А. Алонцева

И.о. директора ИАИТ д.т.н.

К.В. Савельев

Зав. кафедрой «Автоматизация и
управление технологическими
процессами», к.т.н., доцент

С.В. Сусарев

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
БАЗЫ ДАННЫХ

22/
21

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2021621970

**База данных системы мониторинга качества вождения и
эффективности движения транспортного средства**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Самарский
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Морев Артем Сергеевич (RU), Сусарев Сергей Васильевич
(RU), Орлов Сергей Павлович (RU), Яковлева Анастасия
Евгеньевна (RU), Бизюкова Елизавета Евгеньевна (RU), Макеев
Павел Анатольевич (RU), Короблев Сергей Андреевич (KZ),
Григорьев Роман Алексеевич (RU)*



Заявка № **2021621473**

Дата поступления **09 июля 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных **15 сентября 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael