

На правах рукописи



Волхонская Елизавета Евгеньевна

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

Специальность: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Научный руководитель: **Орлов Сергей Павлович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Официальные оппоненты: **Лачин Вячеслав Иванович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Щербаков Максим Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита состоится «13» декабря 2024 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. 200.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ФГБОУ ВО «СамГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02. Тел. (846) 337-04-43, e-mail: 24237702@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» и на сайте диссертационного совета 24.2.377.02 <https://d24237702.samgtu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.377.02
к.ф.-м.н., доцент



М.Н. Саушкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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, и зарубежных исследователей К. Jensen, К. Heldman, Н. Kerzner, G.J. Klir, L. Kristensen, Y. Shoham, K. Leyton-Brown, M. Mesarovic, Y. Takahara.

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. Задачи управления крупномасштабными системами с переменной структурой решались в Институте проблем управления РАН РФ (А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфеев, В.В. Кульба).

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 [1, 5, 8]; решение задачи оптимального назначения роботизированных транспортных средств для выполнения производственных операций агропромышленного комплекса [4, 8]; разработка цифровой иерархической имитационной модели на стохастических временных раскрашенных сетях Петри [2, 3, 6, 7, 9].

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи исследования, характеризуется научная новизна полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнен системный анализ функционирования комплекса роботизированных транспортных средств и организации технического обслуживания и ремонта. Показано, что при создании систем роботизированных автомобилей необходимо опираться на модели-ориентированное системное проектирование. Рассмотрено применение концепции виртуального ввода в эксплуатацию и использования цифровых двойников при проектировании сложных робототехнических систем. Раскрыта проблема организации эффективного технического обслуживания и ремонта роботизированных транспортных средств.

Предложена методика управления виртуальными испытаниями для анализа различных сценариев производственных работ и стратегий технического обслуживания и ремонта РТС. Методика опирается на

разработанные цифровые модели и реализуется в виде итерации следующих этапов.

1. Формирование множества сценариев эксплуатации РТС и принятие в модели Γ решений по расписанию G работ для заданного сценария.
2. Управление распределением РТС на работы с помощью решения оптимизационной задачи назначений (ОН) с соответствующими ограничениями, что позволяет получить первое приближение Ψ_H варианта распределения РТС в производственно-логистической системе.
3. Формирование цифровой 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 G 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.

Схема управления виртуальными испытаниями (ВИ) по разработанной методике представлена на рисунке 1.

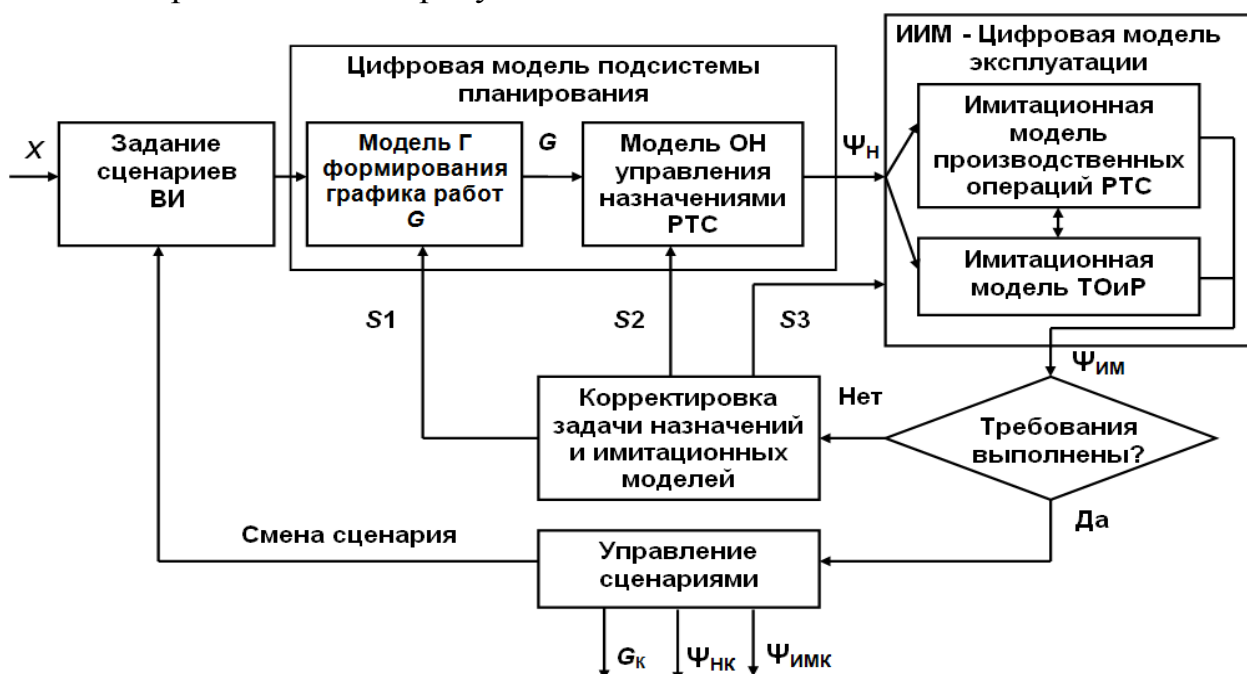


Рисунок 1 – Управление цифровыми моделями при виртуальных испытаниях РТС

На рисунке 1 входной вектор X – исходные данные для моделей Γ , ОН и ИИМ, выходные переменные: G_K – окончательный график работ, Ψ_{HK} – выходная булева матрица назначений РТС, $\Psi_{ИМК}$ – вектор выходных параметров ИИМ.

Корректирующие воздействия $S1, S2, S3$ – это векторы, элементы которых используются для изменения настроек соответствующих цифровых 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 на маршруте и т.п.) и задает параметры вероятностных законов износа агрегатов и событий отказов транспортных средств.

Во втором разделе выполнена постановка и решение оптимизационной задачи для назначения роботизированных транспортных средств на производственные работы. Задача назначения носит обобщенный характер и в диссертации решается на примере производственно-логистической системы агропромышленного предприятия, включающей следующие компоненты (рисунок 2): а) $U = \{u_i\}, i = \overline{1, I}$ – парк беспилотных комбайнов, предназначенных для уборки зерна; б) $A = \{a_n\}, n = \overline{1, N}$ – парк роботизированных автомобилей (РА); в) $P = \{p_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество полей, предназначенных для работ по уборке урожая; г) $Z = \{z_k\}, k = \overline{1, K}$ – множество работ по уборке K полей с зерновыми культурами; д) G – календарно-сетевой график работ Z .

Парк роботизированных автомобилей A состоит из множества активных автомобилей A^A ; множества резервных автомобилей A^R и множества каннибализируемых автомобилей A^C для снятия агрегатов и узлов и дальнейшей установки на активные автомобили. Парк зерноуборочных комбайнов U организован аналогично парку автономных автомобилей и состоит из групп комбайнов: активных эксплуатируемых U^A , резервных U^R и каннибализируемых U^C .

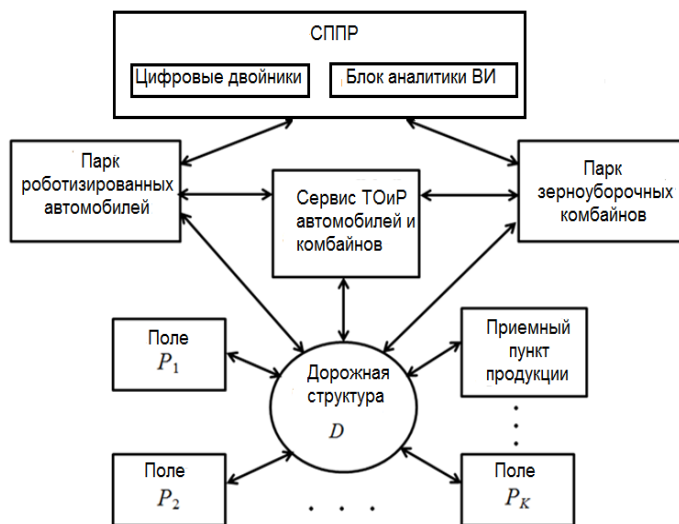


Рисунок 2 – Структура производственно-логистической системы агропромышленного предприятия зерновых культур

Производственно-логистическая структура на рисунке 2 включает также дорожную сеть маршрутов граф D , связывающих поля p_k , приемный пункт продукции и места базирования комбайнов, автономных автомобилей и сервисных центров. Система поддержки принятия решений СППР по

организации работ, распределения РТС и их технического обслуживания базируется на цифровых двойниках РТС и блоке аналитики виртуальных испытаний.

В диссертации решена задача оптимального назначения комбайнов U и роботизированных автомобилей A для выполнения работ на полях P в соответствии с графиком G . Рассматривается минимизация стоимости работ в производственно-логистической системе. Булева переменная оптимизационной задачи определяется, как:

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

Целевая функция задается формулой

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

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 :

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N x_{kin} \geq \beta_k, \forall n; k = \overline{1, K}; \quad (2)$$

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

$$|t_{ik}^R - t_{nk}^A| \leq t_w, \forall i, n, k; k = \overline{1, K}, \quad (3)$$

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:

$$V_i^U \leq V_n^A, \exists(i, n)(x_{kin} = 1), k = \overline{1, K} \quad (4)$$

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

г) технические характеристики (q_1, \dots, q_M) комбайнов и роботизированных автомобилей должны лежать в допустимых границах:

$$q_m^{\min} \leq q_m \leq q_m^{\max}, m = \overline{1, M}; \quad (5)$$

д) ограничения на доступные ресурсы:

$$\sum_{i=1}^I x_{kin} \leq B_U, \forall k, n, \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N x_{kin} \leq B_A, \forall k, i, \quad (8)$$

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.

В результате решения оптимизационной задачи (1)–(8) определяется булева матрица назначений $\Psi_{нк}$ роботизированных автомобилей и беспилотных комбайнов на работы, которые задаются календарно-сетевым

графиком G . Полученное решение определяет структуру работ и первоначальное распределение ресурсов РТС, но не описывает динамику процессов в режиме эксплуатации в условиях значительной неопределённости внешней среды и вероятностного характера технических состояний транспортных средств.

В третьем разделе разработана и исследована цифровая иерархическая имитационная модель на стохастической временной раскрашенной сети Петри для исследования процессов технического обслуживания и ремонта роботизированных транспортных средств (рисунок 3). Сети Петри такого типа выбраны для имитационного моделирования в связи с удобством задания временных и вероятностных характеристик, описания наборов параметров РТС, хорошей визуализацией решений и реализации статистических экспериментов по методу Монте-Карло.

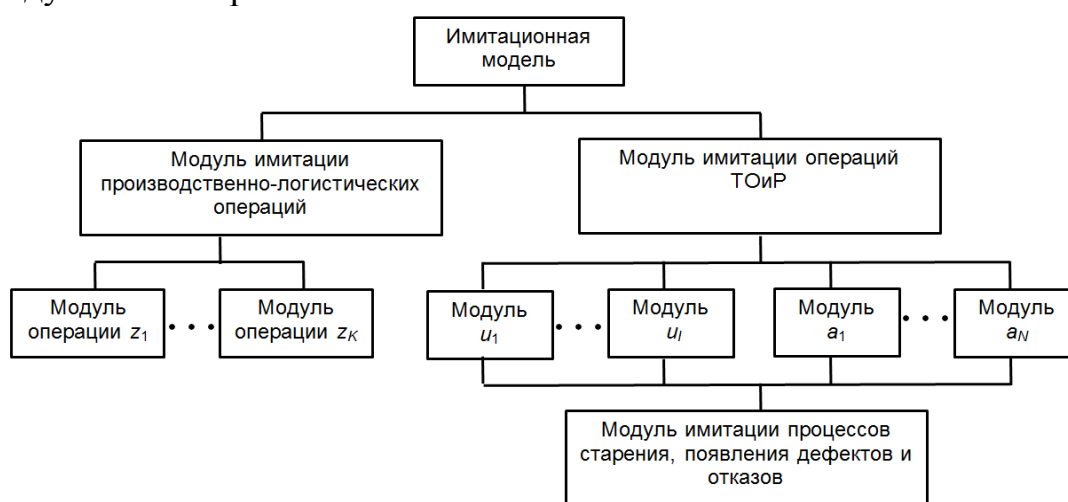


Рисунок 3 – Иерархическая имитационная модель для виртуальных испытаний

Иерархия модели на рисунке 3 напрямую связана с детализацией технологического процесса. На верхних уровнях выполняется имитация производственно-логистических операций, а именно, уборка зерна на полях, передвижение роботизированных автомобилей по назначенным маршрутам. На нижних уровнях в модели представлены модули:

- описывающие производственные задачи z_1, \dots, z_K и работу 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.

В общем виде модуль на сети Петри представлен на рисунке 4. 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, 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.

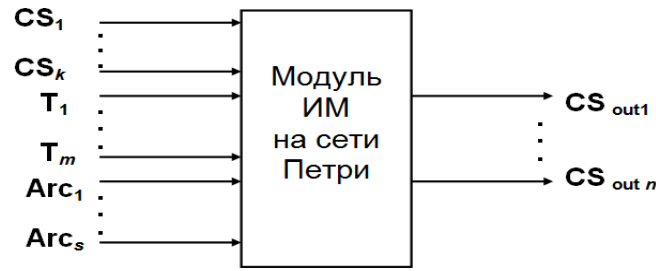


Рисунок 4 – Типовая структура входов и выходов модуля имитационной модели

Ниже в выражении (9) приведено формальное описание параметров ТООР роботизированного автомобиля РА в виде мультимножества цветов сети Петри, которое применяется в большинстве разработанных в диссертации имитационных моделях:

$$CS_j = (id_j, md_j, mdf_j, MN_j, RUL_j, tra_j, b_j, tv_j), j = 1, \dots, J, \quad (9)$$

где J – число РА; id_j – индивидуальный номер j -го 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.

Разработан модуль SM_{nm} имитационной модели на стохастической временной раскрашенной сети Петри для исследования процессов ТООР РТС. Здесь n – число работ одной производственной задачи и m – количество используемых РТС.

На рисунке 5 приведен модуль SM_{13} для группы из трех роботизированных автомобилей КАМАЗ, где один автомобиль выполняет работы $Z_1 - Z_5$, а два других находятся в резерве. При этом на дуге из перехода t_F задается пуассоновский закон событий отказов (Failure). На дуге из перехода t_Q имитируются запросы на техническое обслуживание (Maintenance), которые задаются равномерным распределением в определенном временном диапазоне.

Для оценки качества функционирования роботизированных транспортных средств использовались следующие показатели:

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

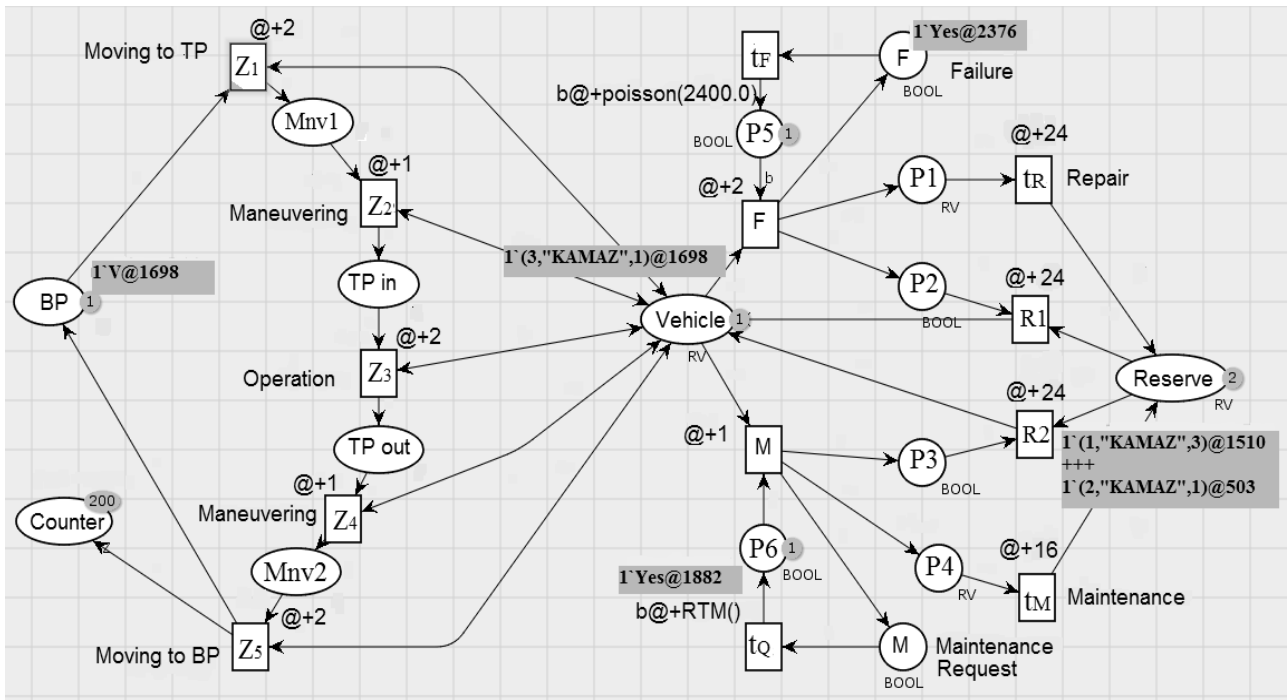


Рисунок 5 – Модуль SM_{13} имитационной модели для исследования процессов ТОиР группы роботизированных автомобилей при выполнении пяти производственных работ.
 Модельное время: 1 такт = 0,5 часа

Проводилось 500 запусков имитационной модели SM_{13} при интенсивности отказов РТС $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-3}$ 1/час и среднем времени до технического обслуживания $T_{mo} = 360$ ч. Измерения времени выполнения работ T_{SM} проводились по временному параметру в позиции ВР, оценивалось среднее значение T_{SM} . Полученные результаты эксперимента приведены в таблице 1 и на рисунке 6. Для проведения эксперимента использовалось два варианта заданного времени T_{SI} задачи: 800 и 1600 часов.

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования на SM_{13}

Число циклов	Время цикла, ч	T_{SI} , ч	T_{SM} , ч	K_Z	Превышение планового срока выполнения задачи Δ (среднее значение), ч	Резерв РТС, 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

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

В работе были определены вероятностные показатели надежности работы агрегатов роботизированного автомобиля, приведенные в таблице 2. Проведена интеграция случайных законов появления неисправностей в параметры имитационной модели на стохастических временных сетях Петри.

Исследована возможность применения стратегии каннибализации для ускорения технического обслуживания РТС. С этой целью разработана имитационная модель на сети Петри для ТОиР РТС с использованием каннибализации (рисунок 7). Переходами сети Петри, которые принадлежат верхнему уровню модели, являются блоки: «Модуль задач», *MS* – мобильный сервис технического обслуживания, и *CV* – модуль каннибализуемых автомобилей. В блок «Модуль задач» входит имитация движения роботизированного автомобиля по маршруту при выполнении определенных производственных задач.

Таблица 2 – Основные показатели надежности для подсистем роботизированного автомобиля КАМАЗ

Система РТС	$P(t)$ 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
Рулевая	0.475	298	0.125	Пуассоновское

Модуль *MS* имитирует 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*. В результате имитационного моделирования был получен график зависимости коэффициента полезной загрузки K_w автомобиля от временных параметров стратегии каннибализации (рисунок 8).

Для эксперимента задавались следующие данные: общее количество РТС равно 10, число каннибализуемых РТС равно 3, время T_{can} технического обслуживания РТС с применением стратегии каннибализации в диапазоне от 4 до 12 часов, время T_m между периодическим ТО в диапазоне от 100 до 400 часов. Заданный уровень полезной загрузки K_w РТС принят равным 75%.

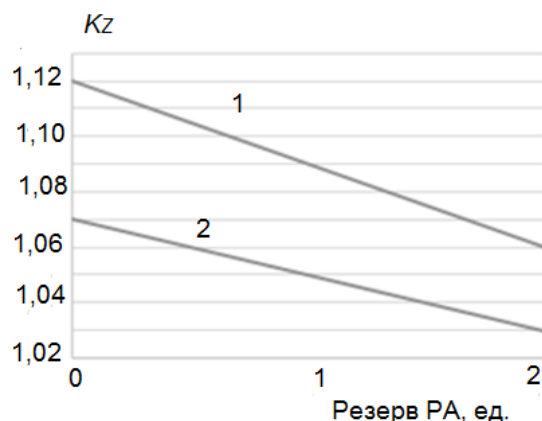


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента сдвига срока от количества резервных автомобилей:

1 – $T_{Sl} = 800$ часов; 2 – $T_{Sl} = 1600$ часов

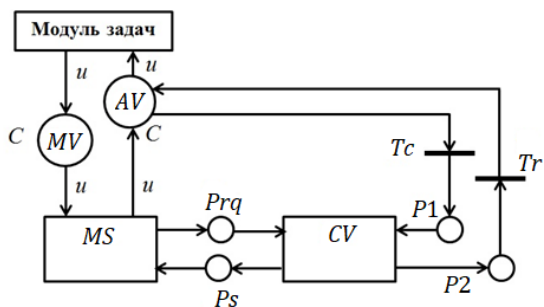


Рисунок 7 – Структура модулей имитационной модели ТОиР РТС с применением стратегии каннибализации

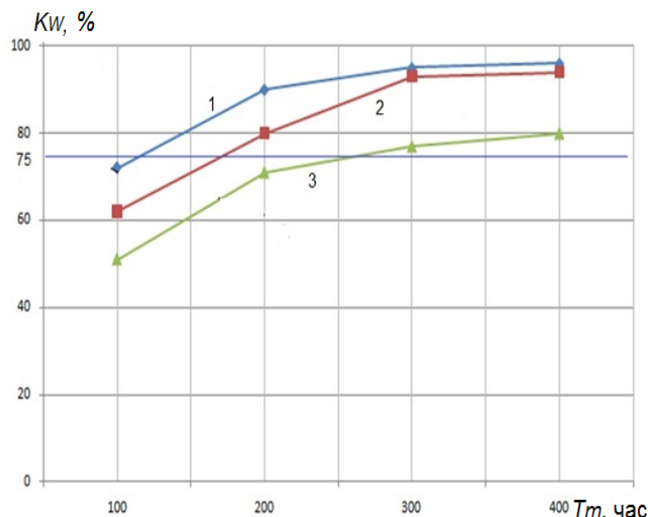


Рисунок 8 – График коэффициента K_w полезной загрузки РТС: 1 - $T_{can} = 4$ часа; 2 - $T_{can} = 8$ часов; 3 - $T_{can} = 12$ часов

В четвертом разделе описаны экспериментальные исследования при использовании цифровых моделей и методики виртуальных испытаний. Как пример, приведено решение задачи назначения роботизированных автомобилей в агропромышленной производственно-логической системе на основе поставленной во втором разделе оптимизационной задачи.

Задача решалась при следующих исходных данных: а) число полей $K = 5$; б) количество комбайнов $I = 5$; в) количество роботизированных автомобилей $N = 15$. Для решения значения задачи назначения вводятся следующие обозначения переменных и параметров: S_k – площадь поля k , га; W_k – урожайность зерна на поле k , ц/га; Pf_i – производительность комбайна i , назначенного на поле k , т/час; T_k – заданное время уборки поля k , час; L_k – расстояние от поля k до зернохранилища, км; v_{cn} – средняя скорость роботизированного автомобиля n при передвижении по маршруту «Поле k – Зернохранилище», км/час; V_n^A – объем кузова автомобиля n , м³; V_i^U – объем бункера комбайна i , м³; β – коэффициент пересчета объема зерна определенного сорта в тонны, т/м³; B_A – количество автомобилей, готовых к эксплуатации и доступных к назначению на поля.

Определены основные соотношения, которые связывают параметры процессов уборки зерна с характеристиками комбайнов и грузовых роботизированных автомобилей:

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

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

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

$$T_{ki} = (1 - \delta)S_k w_k / 10 Pf_i.$$

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

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

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 .

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

$$M_{kn} = \beta \eta_{kn} V_n^A.$$

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

$$x_{kn} = \begin{cases} 1, & \text{если для выполнения работы на поле } k \\ & \text{назначен автомобиль } a_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Целевая функция C представляет собой общую стоимость эксплуатации роботизированных автомобилей при выполнении работ на заданном множестве полей:

$$C = \min\{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N c_{kn} x_{kn}\}, \quad (10)$$

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 приняты следующие ограничения.

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

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} = 1, n = \overline{1, N}. \quad (11)$$

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 каннибализации)

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \leq 1, n = \overline{1, N}. \quad (12)$$

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

$$\sum_{k=1}^K x_{kn} \leq 1, k = \overline{1, K}. \quad (13)$$

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

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N x_{kn} \leq B_A. \quad (14)$$

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

$$\sum_{n=1}^N \eta_{kn} \beta (V_n^A - V_i^U) x_{kn} \geq 0, k = \overline{1, K}, i = \theta(k), \quad (15)$$

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:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \geq 1, k = \overline{1, K}, i = \theta(k). \quad (16)$$

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

$$\sum_{n=1}^N \frac{\beta}{T_k P f_i} \eta_{kn} V_n^A x_{kn} \geq \alpha, \alpha > 1, k = \overline{1, K}. \quad (17)$$

Результат решения оптимизационной задачи (10)–(17) приведен в таблице 3. 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 решения задачи оптимизации.

Таблица 3 – Распределение автомобилей по полям для выполнения задач

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

Проведены имитационные эксперименты с использованием разработанного модуля ARL на сети Петри (рисунок 9) в составе общей иерархической модели для анализа остаточного ресурса РА.

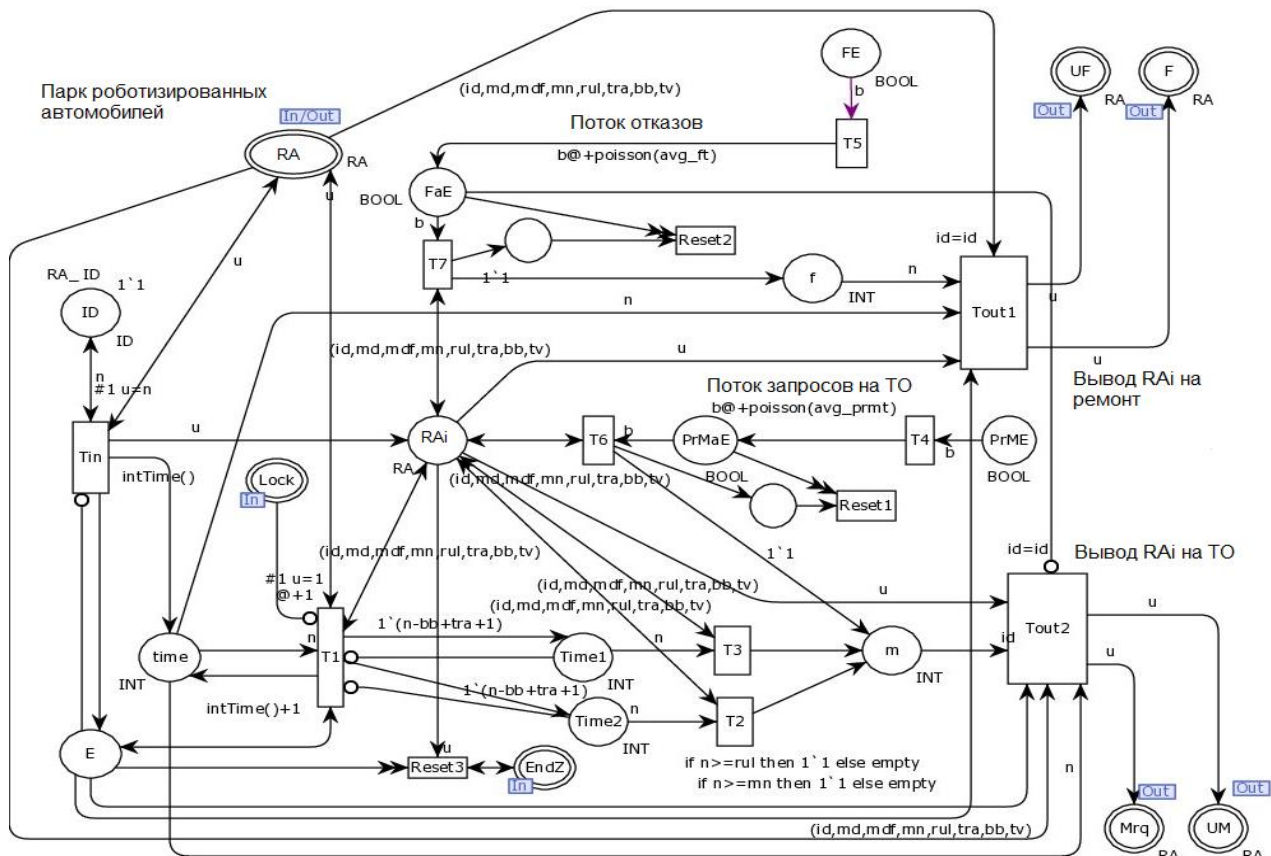


Рисунок 9 – Модуль ARL анализатора остаточного ресурса работы РТС

На рисунках 10 и 11 показаны графики, характеризующие полезное использование роботизированных транспортных средств.

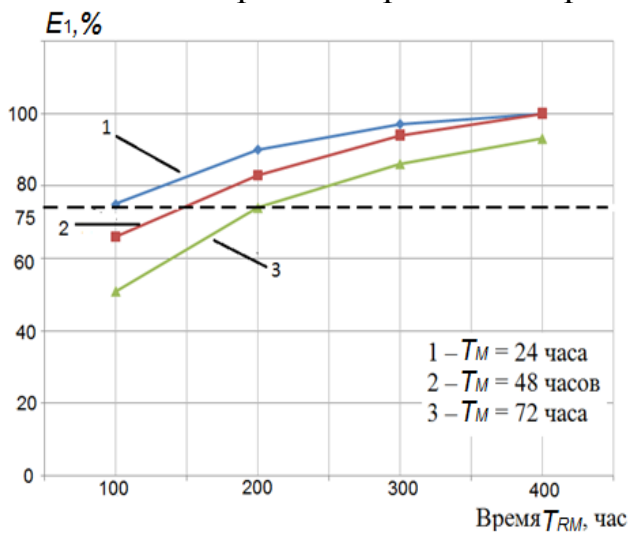


Рисунок 10 – Графики коэффициента использования E_1 для автомобиля A_1

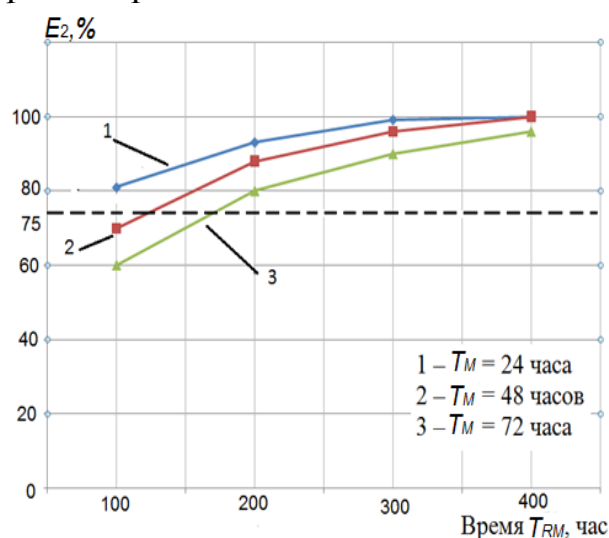


Рисунок 11 – Графики коэффициента использования E_2 для автомобиля A_2

При установленном минимальном уровне коэффициента использования в 75% можно определить допустимое время T_M на выполнение технического обслуживания автономного автомобиля и границы оставшегося времени T_{RM} до проведения профилактического технического обслуживания.

Применение иерархической имитационной модели при виртуальных испытаниях обеспечивает сокращение времени простоя РТС на техническом обслуживании и ремонте в среднем на 12 %; снижение задержек сроков производственных работ в среднем до уровня 6%.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в работе:

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.

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, построена по модульному принципу и позволяет учитывать вероятности появления отказов 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 НИР в рамках проекта Минобрнауки «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления».

**Научные публикации по теме диссертации
Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ**

1. Орлов С.П., Бизюкова (Волхонская) Е.Е., Яковлева А.Е. Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля// Вестник

Самарского государственного технического университета. Сер. Техн. науки. 2021. № 1(29). С. 46–57.

2. 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 СПб ГТИ (ТУ). 2021. №58(84). С. 98–104.

3. **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.

4. **Волхонская Е.Е.** Задача оптимального назначения автономных транспортных средств в производственно-логистической системе//Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Техн. науки. 2023. № 2 (31). С. 20–30.

5. **Волхонская Е.Е.**, Орлов С.П. Системные модели парка автономных транспортных средств для виртуальных испытаний при организации технического обслуживания//Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 3. С. 7–16.

В международных изданиях, индексируемых в Scopus

6. 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

Свидетельство о государственной регистрации базы данных

7. Морев А. С., Сусарев С. В., Орлов С. П., Яковлева А. Е., **Волхонская Е. Е.**, Макеев П. А., Короблёв С. А., Григорьев Р. А. База данных системы мониторинга качества вождения и эффективности движения транспортного средства //Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621970–2021.

Публикации в других изданиях:

8. Сусарев С.В., Орлов С.П., **Бизюкова Е.Е.**, Учайкин Р.А. Моделирование процессов прогнозного технического обслуживания роботизированных агротехнических автомобилей //Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 1. С. 148–153.

9. **Волхонская Е.Е.**, Орлов С.П. Моделирование системы автономных транспортных средств в процессе виртуального запуска в эксплуатацию//Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 1. С. 97–103.

10. **Волхонская Е.Е.**, Орлов С.П. Цифровые двойники на сетях Петри для виртуальных испытаний робототехнических транспортных средств// «Инновационное развитие современной науки: теория, методология, практика». Сб. статей VI Всероссийской научно-практической конференции. 2022. № 1. С. 15–21.

11. **Бизюкова Е.Е.**, Волхонский А.Н. Сенсоры, применяемые для реализации машинного зрения в роботизированных транспортных средствах// Международный студенческий научный вестник. 2021. № 2. С. 1–5.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол № 14 от «б» ноября 2024 г.)

Заказ № _____. Формат 60x84 1/16 Уч. изд. л. 1.25. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета.

Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.