

*На правах рукописи*



ВЫСОЦКАЯ Ирина Алевтиновна

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ТРАНСПОРТНОМ ОСВОЕНИИ  
ЛЕСОСЫРЬЕВЫХ БАЗ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и  
переработки древесины

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ»).

**Научные консультанты:** доктор технических наук, профессор  
**Скрышников Алексей Васильевич**

доктор химических наук, профессор  
**Калач Андрей Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Благодатский Григорий Александрович**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Ижевский государственный технический  
университет имени М.Т. Калашникова», кафедра  
информационных систем, профессор

**Дворецкий Станислав Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, заслуженный  
деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Тамбовский  
государственный технический университет»,  
кафедра технологии и оборудования пищевых и  
химических производств, профессор

**Хахина Анна Михайловна**,  
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого», высшая школа  
программной инженерии, профессор

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский  
технологический университет»

Защита диссертации состоится 27 сентября 2024 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.287.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» и на сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: [www.vsuet.ru](http://www.vsuet.ru)

Автореферат разослан «24» июня 2024 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
24.2.287.01,  
кандидат технических наук



А. В. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Леса современной России составляют более 20% площади лесов мира и представляют собой один из возобновляемых природных ресурсов и удовлетворяют множественные потребности экономики и общества. В настоящее время, проблемы сохранения и использования лесов становятся все более многообразными и сложными: изменяются стандарты управления лесами, которые должны отвечать возросшим международным, социальным, экологическим и экономическим требованиям.

Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года отмечает, что проблемами, сдерживающими развитие лесного комплекса, являются сложность и длительность процедур принятия решений в отношении крупных проектов по переработке лесного сырья и наличие конфликтов, связанных с ужесточением экологических ограничений при освоении лесов; отсутствие в зоне транспортной доступности значительной части фактически осваиваемых и перспективных к освоению лесных ресурсов предприятий.

Отдельно необходимо отметить, что действующая в настоящее время модель управления лесным хозяйством сдерживает развитие транспортной сети лесовозных автомобильных дорог, включающее в себя множество технических и инженерных аспектов, которые представляют собой сложную техническую систему.

Организация и планирование рациональных вариантов лесовозных автомобильных дорог определяется проектными решениями, для достижения которых необходимо создание эффективной, целостной и сбалансированной системы стратегического целеполагания, планирования и прогнозирования в лесном комплексе. Ускорение научно-технического прогресса приводит к непрерывному сокращению сроков проектирования, увеличению числа проектируемых объектов и повышению их сложности.

В связи с этим актуальной является проблема создания современных информационно-интеллектуальных систем, позволяющих ускорить процесс обработки информации, улучшить взаимодействие между различными этапами функционирования сложной технической системы и повысить качество принятых управленческих решений.

Следует отметить, что решению проблем оптимизации и моделированию систем, вопросам управления сложными техническими системами посвящены работы М. Мессаровича (теория иерархических многоуровневых систем), А.С. Гейды (теория потенциала сложных технических систем), Г.Б. Петухова (теория эффективности целенаправленных процессов и функционирования целеустремлённых систем), Лысенко И.В. (исследования операционных свойств систем и процессов их функционирования), Б.С. Флейшмана (теория потенциальной эффективности сложных систем), В.Н. Калинина (теория систем и управления), С.И. Дворецкого, В.Н. Садовского, Д.А. Новикова, А.Н. Павлова (проактивное управление структурной динамикой сложных объектов), В.В. Кульбы (сценарное исследование сложных систем), А. Sen, D. Tease и др.

В области исследований особенностей разработки систем поддержки принятия решений, интеллектуального анализа данных можно выделить работы

Т. Л. Саати (метод анализа иерархий), Г.А. Благодатского (гибридные методы и алгоритмы поддержки принятия решений), А.В. Кизима (интеллектуальная поддержка принятия решений), Д. Холланда (методы генетических алгоритмов в адаптивных системах), Т. Саати и Р. Варгаса (теория принятия решений в иерархических системах), Э. Мюшика и П. Мюллера (методы принятия технических решений), А.В. Полтавского (концепции принятия решений при разработке сложных технических систем) и др.

Решению задач оптимизации процессов реализации проектных решений, оптимизации организации и планирования вариантов лесовозных автомобильных дорог (в том числе с учетом организационно-технологической надежности), структурной организации, календарному планированию посвящены исследования Б.Ф. Белецкого, Б.М. Томаева, Т.В. Бобровой, Д.В. Бурмистрова, В.В. Никитина, А.В. Скрыпникова, А.А. Гусакова, В.Н. Буркова, А.В. Калача, П.Ф. Вайнкофа, И.А. Золотарь, А.Ф. Шклярова, Д. Дрю, О.Н. Бурмистровой, В.А. Афанасьева, Л.В. Россихиной, В.И. Чуева, А.Е. Акау, Т. Krumov, N. Naderializadeh, К.А. Crowe и др. Отечественными и зарубежными учеными выполнялись работы по совершенствованию методов разработки проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз, однако их результатами явились либо чисто качественные рекомендации без применения экономико-математических методов расчетов, либо программы для решения на ЭВМ частных задач.

Среди работ, посвящённых моделированию и информационно-интеллектуальным методам оптимизации параметров проектируемых технических систем транспортного освоения лесосырьевых баз возможно выделить исследования Т. Pentek, J. Tan, A. Weintraub, S. Grigolato, Е.В. Чиркова, П.В. Тихомирова.

Однако в настоящий момент отсутствуют универсальные подходы, позволяющие решать задачи, возникающие на различных этапах формирования и реализации проектных решений при управлении сложными техническими системами, в нечетких условиях, в которых невозможно ориентироваться на средние показатели эффективности решений.

Исходя из сказанного выше, сложилась **проблемная ситуация**, заключающаяся в том, что:

результаты решения отдельных задач с ориентацией на частные критерии оптимальности, зачастую, находятся в противоречие друг с другом и, очевидно, не будут являться оптимальными с точки зрения глобального критерия – экономического эффекта от реализации проектного решения во многих отраслях народнохозяйственного комплекса, в том числе в лесопромышленном комплексе;

принятие управленческих решений на различных стадиях поиска проектных решений зачастую проводится без применения современных информационных технологий, что особенно проявляется, к примеру, при организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог в силу их уникальной специфики;

отсутствует единая система интеллектуальной поддержки принятия допустимых проектных решений при управлении в сложных технических системах, к которым относится транспортное освоение лесосырьевых баз.

Современные подходы к решению задач подобной сложности, со слабоструктурированной проблемной ситуацией требуют применения новых подходов, которые позволяют рассматривать процесс поиска проектных решений как сложную систему, состоящую из взаимосвязанных элементов и подсистем.

В диссертационном исследовании решается актуальная научная проблема синтеза интеллектуальной системы поддержки принятия допустимых проектных решений при управлении сложными техническими системами лесопромышленного комплекса.

**Объект исследования** – специальное математическое и алгоритмическое обеспечение принятия решений в сложных технических системах лесопромышленного комплекса.

**Предмет исследования** – методы и алгоритмы решения задач системного анализа, методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении сложными техническими системами лесопромышленного комплекса.

**Целью работы** является разработка методологии интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении сложными техническими системами лесопромышленного комплекса с использованием методов прескриптивной аналитики при наличии слабо формализованной информации.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. На основе системного подхода исследовать возможности современных методологий интеллектуальной поддержки принятия проектных решений, управление сложными техническими системами лесопромышленного комплекса, определить пути их совершенствования.

2. Определение критерия описания и оценки эффективности принятия проектных решений при организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог с учетом специфики и условий районов лесозаготовки.

3. Разработать алгоритмические средства реализации проектных решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог с использованием подходов к обработке больших данных на основе гетерогенной информации (актуальных и статистических данных) о состоянии дорожно-транспортной инфраструктуры районов лесозаготовки, производственных ресурсов лесозаготовительного предприятия и продолжительности работ.

4. Разработать методологию поиска проектных решений при управлении в сложной технической системе при слабо формализованной информации с учетом специфики транспортного освоения лесосырьевых баз.

5. Разработать технологическое решение реализации отраслевой информационной системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог при освоении лесосырьевых баз.

6. Синтез информационной системы многовариантного анализа проектных решений при наличии слабо формализованной информации для организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог.

7. Провести экспериментальные исследования возможностей разработанных методов и алгоритмов на натуральных и модельных данных, анализ результатов и сравнение с существующими решениями.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методология системного анализа, методы исследования операций, теории графов, теории вероятностей, теории случайных процессов.

**Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования** обеспечивается применением строгого математического аппарата, соответствием данных имитационного и компьютерного моделирования результатам экспериментальных исследований, практическим внедрением и применением результатов диссертации.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложен критерий оценки эффективности принятия проектных решений, отличительной особенностью которого является учет возможных вариантов лесовозных автомобильных дорог, оптимальной продолжительности работ, специфики и условий районов лесозаготовки.

2. Создан метод синтеза имитационной модели реализации проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз, отличающийся обработкой больших данных на основе гетерогенной информации о состоянии дорожно-транспортной инфраструктуры районов лесозаготовки, производственных ресурсов лесозаготовительного предприятия и продолжительности работ, которые агрегируются в правила принятия решений.

3. Разработан адаптированный комплекс условий поиска допустимых проектных решений, отличающийся возможностью оперативного использования в синтезе ближайшего прототипа проектного решения, что позволяет сформировать множество допустимых вариантов функционирования сложной системы.

4. Предложен алгоритмический инструментарий интеллектуальной поддержки поиска проектных решений, отличительной особенностью которого является использование теории графов и методов прескриптивной аналитики при наличии слабо формализованной информации при принятии управленческих решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз.

5. Предложена методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении транспортным освоением лесосырьевых баз, отличающаяся взаимосвязанным определением оптимальной продолжительности работ и обеспечивающих их состава ресурсов, учитывающая требуемое время эксплуатации сложной технической системы.

6. Обоснован прототип проблемно-ориентированной отраслевой системы поддержки принятия проектных решений, отличающийся тем, что благодаря авторскому подходу по интеграции комплекса условий и критерия в единое

технологическое решение, обеспечивается повышение эффективности принятия управленческих решений при реализации проектов освоения лесосырьевых баз посредством организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог.

**Теоретическая значимость** заключается в разработке методологии создания информационно-интеллектуальных систем поддержки принятия решений, ориентированных на обоснования проектных решений и повышение качества принимаемых управленческих решений. Разработанная методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при эксплуатации лесовозных автомобильных дорог вносит значительный вклад в обоснование проектных решений транспортного освоения лесосырьевых баз.

Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре технологии и транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», на кафедре автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет» и на кафедре информационной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

**Практическая значимость** диссертационного исследования определяется экспериментально проверенными результатами, полученными под руководством и с участием автора, при реализации проектных решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог при освоении лесосырьевых баз. На основе предложенной методологии построена система информационно-интеллектуальной поддержки принятия решений, которая позволяет минимизировать сумму затрат на производство работ в проектных решениях по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог. Проведенные исследования позволяют повысить технический уровень возведения, эксплуатационную надежность земляного полотна лесовозных автомобильных дорог, повысить уровень транспортного освоения лесосырьевых баз и обеспечить оптимальное управление в сложных технических системах лесопромышленного комплекса. Рекомендации снабжены алгоритмами, пакетом программ и структурными схемами для практического использования результатов исследований, которые внедрены в предприятия лесозаготовительного комплекса: ООО «Дубрава» (Калужская область, г. Медынь); ООО «Центрлес» (Калужская область, г. Медынь); ООО «Гиперборей» (Воронежская область, г. Воронеж); ООО «СлавСтрой» (Воронежская область, г. Воронеж); ООО «Лестехсервис Регион» (Калужская область, г. Калуга); ООО «Бастион» (Воронежская область, г. Воронеж).

Необходимо отметить, что результаты диссертационного исследования могут быть использованы при построении систем прогнозирования и поиска управленческих решений в практической деятельности организаций лесопромышленного комплекса, в образовательном процессе по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство» (профиль «Автомобильные дороги и аэродромы»); 27.04.03 «Системный анализ и управление»; 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств».

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

1. Критерий поддержки принятия управленческих решений, позволяющий обеспечить максимальный эффект от реализации проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз (п. 3 научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика).

2. Специальное математическое и алгоритмическое обеспечение принятия проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз, позволяющие за счет обработки больших данных на основе гетерогенной информации о состоянии дорожно-транспортной инфраструктуры районов лесозаготовки, производственных ресурсов лесозаготовительного предприятия и продолжительности работ, повысить качество принимаемых управленческих решений (п. 5. научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика).

3. Адаптированный комплекс условий поиска допустимых проектных решений, позволяющий сформировать множество допустимых вариантов функционирования сложной системы (п. 5. научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика).

4. Алгоритмический инструментарий интеллектуальной поддержки поиска проектных решений, включающий совместное использование теории графов и методов прескриптивной аналитики обработки слабо формализованной информации при принятии управленческих решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз (п. 10 научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика).

5. Методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении транспортным освоением лесосырьевых баз, позволяющая обеспечивать выбор рационального варианта проектного решения и учитывать требуемое время эксплуатации сложной технической системы (п. 3 научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика).

6. Прототип проблемно-ориентированной отраслевой системы транспортного освоения лесосырьевых баз, позволяющий за счет интеграции в единое технологическое решение системы интеллектуальной поддержки принятия решений и комплекса факторов организации и планирования вариантов лесовозных автомобильных дорог, обеспечивать эффективность принятия управленческих решений при реализации проектов освоения лесосырьевых баз (п. 8. научной специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины).

**Личный вклад соискателя** состоит в обосновании актуальности темы; разработке концепции и постановке задач исследования; разработке алгоритмов и методов; формулировке цели; обосновании методологии интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении транспортным освоением лесосырьевых баз, оценке воспроизводимости и визуализации результатов, планировании, контроле результатов и координации разработки

компонентов программного и информационного обеспечения; непосредственном участии во внедрении и патентовании результатов исследования.

**Соответствие диссертационного исследования паспорту научной специальности.** Результаты, выносимые на защиту, относятся к:

Паспорт специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

п.3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п.5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

Паспорт специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины:

п. 8. Технология транспортного освоения лесосырьевых баз.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационного исследования доложены, обсуждены на научных конференциях и симпозиумах различного уровня: Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики (город Воронеж, 2018 г.), Современные методы теории функций и смежные проблемы: материалы международной конференции «Воронежская зимняя математическая школа» (город Воронеж, 2019 г.), Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве (город Воронеж, 2020 г.), Современные проблемы в науке и технике. Теория и практика (город Воронеж, 2020 г.), Информатика: проблемы, методы, технологии (город Воронеж, 2020 г.), Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса (город Воронеж, 2021 г.), и др.

Результаты диссертации внедрены, использованы и апробированы в ООО «Дубрава» (Калужская область, город Медынь), ООО «Центрлес» (Калужская область, город Медынь), ООО «Гиперборея» (Воронежская область, город Воронеж), ООО «СлавСтрой» (Воронежская область, город Воронеж), ООО «Лестехсервис Регион» (Калужская область, город Калуга), ООО «Бастион» (Воронежская область, город Воронеж). Разработанные математические модели и программы для ЭВМ, реализующие эти модели, используются в учебном процессе: ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

**Публикации.** Результаты исследований отражены в 70 научных работах, общим объемом 73 п.л. (авторский вклад – 34 п.л.), 21 статье в изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России категории к1, к2 (авторский вклад – 13 п.л.), трех статьях в изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web

of Science (авторский вклад – 1,02 п.л.), трех свидетельствах о регистрации программы для ЭВМ, шести патентах на полезные модели.

**Структура и объём диссертационного исследования.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, библиографического списка из 269 наименований. Диссертации изложена на 290 страницах, содержит 2 таблицы, 28 рисунков и приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложено содержание диссертационной работы, обоснованы актуальность и научная новизна выполненных исследований, их практическая значимость, приведены результаты внедрения, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** «Анализ современного состояния методов принятия управленческих решений при решении частных задач в технических системах» рассмотрены различные варианты методов исследования, применяемых при поиске проектных решений.

В результате анализа математических методов исследования сделаны выводы о том, что метод имитационного моделирования является предпочтительным методом для анализа сложных технических систем, так как он позволяет наиболее корректно по сравнению с другими методами описать объект исследования и, следовательно, получить более точные результаты.

Важное значение имеет обоснованность принятия управленческих решений при проектировании магистральных лесовозных автомобильных дорог в связи с их высокой стоимостью, значительными объемами земляных работ, большой потребностью в материальных ресурсах и высокой интенсивностью их потребления, использованием крупных парков высокопроизводительных и дорогостоящих строительных машин и автотранспортных средств. На основании анализа исследований, сделаны выводы, что для принятия эффективных проектных решений при организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог необходимо применять методы экономико-математического анализа, поскольку использование обобщённых нормативов может негативно сказаться на качестве проектируемых объектов.

В том случае, когда имеется директивная продолжительность реализации проектного решения, регламентированная нормативными документами, естественно при поиске проектного решения, с учетом его вероятностного характера, добиваться совпадения модального значения продолжительности его реализации с директивной. Если же для того, чтобы обеспечить уровень надежности за счет резервирования ресурсов различных видов, придется сдвинуть это модальное значение относительно директивного, то, тем самым, принятые проектные решения фактически будут обеспечивать отличную от директивной продолжительность реализации, т.е. идти в разрез с нормативными документами, что недопустимо. Менять же форму распределения случайной величины продолжительности реализации с тем, чтобы добиться нужного уровня надежности, не сдвигая модального значения, за счет изменения

качественного состава ресурсов, практически невозможно, что также было выяснено в ходе диссертационного исследования.

Однако, для целого ряда объектов не установлены нормы продолжительности реализации их проектных решений в силу того, что эти объекты уникальны. К ним, в частности, относятся и магистральные лесовозные автомобильные дороги. Таким образом, при решении задач организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог использование понятия уровня надежности, в качестве критерия оптимальности или в ограничениях, неэффективно.

Для принятия эффективных проектных решений при организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог необходимо применять методы экономико-математического анализа, поскольку использование обобщённых нормативов может негативно сказаться на качестве проектируемых объектов. Таким образом, обоснована необходимость создания алгоритмов и специализированного программного обеспечения реализации отраслевой информационной системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог.

В качестве инструмента для разработки проектных решений по организации и планировании вариантов лесовозных автомобильных дорог необходимо создание имитационной модели, основанной на взаимосвязанном определении оптимальной продолжительности реализации проектного решения и обеспечивающего его состава ресурсов.

Проведенный в первой главе анализ существующих методов принятия управленческих решений при решении частных задач в технических системах определил преимущества, недостатки и имеющиеся тенденции, которые позволили провести разработку методологии интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении транспортным освоением лесосырьевых баз.

Во **второй главе** «Методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений» представлены обоснование выбора критерия поддержки принятия проектных решений и методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз.

Обоснованный выбор критерия поддержки принятия проектных решений позволяет правильно, с учетом всех существующих факторов, сформулировать проектное решение, которое должно учитывать все возможные будущие состояния проектируемого объекта и определить ключевые условия для этих состояний. Одной из основных задач, возникающих при разработке проектных решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог, является определение продолжительности реализации проектного решения.

В настоящем исследовании за расчетный период, при определении критерия поддержки принятия проектных решений, принят период от начала реализации проектного решения до окончания времени предполагаемой эксплуатации. Под

временем предполагаемой эксплуатации будем понимать время до начала первого капитального ремонта проектируемой лесовозной автомобильной дороги. Продолжительность расчетного периода является нормативной величиной, а само начало первого капитального ремонта означает осуществление новых капитальных вложений, уже не связанных с рассматриваемым проектным решением. Таким образом, учтены затраты на реализацию проектного решения по организации и планированию лесовозной автомобильной дороги, что достаточно полно отражает народнохозяйственный эффект от реализации проектного решения транспортного освоения лесосырьевых баз.

Поэтому в качестве критерия оптимальности принят эффект от реализации проектного решения по организации и планированию лесовозной автомобильной дороги, исчисляемый за период от начала реализации проектного решения до окончания времени предполагаемой эксплуатации

$$\mathcal{E}(T) = D(T) - C(T), \quad (1)$$

где  $T$  – фактическая продолжительность реализации проектного решения;

$D(T)$  – суммарная экономия, получаемая в период эксплуатации лесовозной автомобильной дороги за срок ее службы до первого капитального ремонта, приведенная к моменту начала реализации проектного решения (учитывает эффект от функционирования построенной дороги и затраты на ее эксплуатацию);

$C(T)$  – суммарные затраты на реализации проектного решения по организации и планированию лесовозной автомобильной дороги, приведенные к моменту начала реализации проектного решения.

Величина  $D(T)$  определяется формулой

$$D(T) = \int_T^{T+T_{\text{сл}}} \frac{P(t-T)}{e^{Et}} dt, \quad (2)$$

где  $T_{\text{сл}}$  – срок службы дороги до первого капитального ремонта;

$P(t)$  – темп роста суммарной экономии от функционирования дороги на момент времени  $t$  от начала ее эксплуатации  $t \in [0, T_{\text{сл}}]$ ;

$E$  – коэффициент дисконтирования, определяемый минимально допустимой для народного хозяйства эффективностью капитальных вложений (принят равным 0,1).

Величина  $C(T)$  определяется формулой

$$C(T) = \int_0^T \frac{S(t,T)}{e^{Et}} dt, \quad (3)$$

где  $S(t, T)$  – темп роста суммарных затрат на реализации проектного решения по организации и планированию лесовозной автомобильной дороги на момент времени  $t$  от начала реализации проектного решения,  $t \in [0, T]$ .

Значения функции (2) не превышают значений функции (3), так как проектирование лесовозной автомобильной дороги происходит к участкам вырубки, имеющим установленную доходность, определённую лесозаготовительной организацией.

Реализации проектного решения по организации и планированию лесовозных дорог напрямую зависит от благоприятных в климатическом отношении рабочих дней, вследствие этого не установлены нормы продолжительности реализации. Таким образом, фактическая продолжительность реализации проектного решения  $T$  является непрерывной случайной величиной, определённой на некотором отрезке времени, ограниченным снизу и сверху минимальной и максимальной возможной продолжительностью реализации проектного решения, которую определяет проектировщик. Следовательно, величина эффекта от реализации проектного решения по организации и планированию лесовозной автомобильной дороги  $\mathcal{E}(T)$ , также случайна.

Научная гипотеза данного исследования заключается в том, что функция (1), отражающая корреляционную зависимость эффекта от реализации проектного решения по организации и планированию лесовозной автомобильной дороги от продолжительности его реализации, имеет единственный максимум на области определения этого параметра. При этом вид функции (1) индивидуален для каждой конкретной проектируемой лесовозной автомобильной дороги, что обеспечивает дифференцированный подход к каждому проектируемому объекту.

Для удобства через  $f(T)$  обозначим правую часть равенства (1), а через  $T^*$  оптимальную продолжительность реализации проектного решения, при которой

$$\mathcal{E}(T^*) = \max_T f(T). \quad (4)$$

Эффект от реализации проектного решения (4) напрямую обусловлен принятыми в проекте технологическими решениями, а также качественным составом ресурсов, которым может располагать лесозаготовительная организация для воплощения этих решений. Соответственно, изменение технологических решений или состава технического оснащения, которое может быть предоставлено лесозаготовительной организации, влечёт за собой изменение значения (4) для проектируемой дороги и, как следствие, изменение оптимальной продолжительности реализации проектного решения  $T^*$ . Таким образом проявляется взаимосвязь между оптимальной продолжительностью реализации проектного решения и обеспечивающего его составом ресурсов. Обеспечивающий  $T^*$  состав ресурсов может быть подобран с помощью имитационной модели с учетом наложенных на него ограничений качественного и количественного характера, что послужило теоретической основой методологии интеллектуальной поддержки принятия проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз, которая позволяет обеспечивать выбор рационального варианта проектного

решения и учитывать требуемое время эксплуатации сложной технической системы.

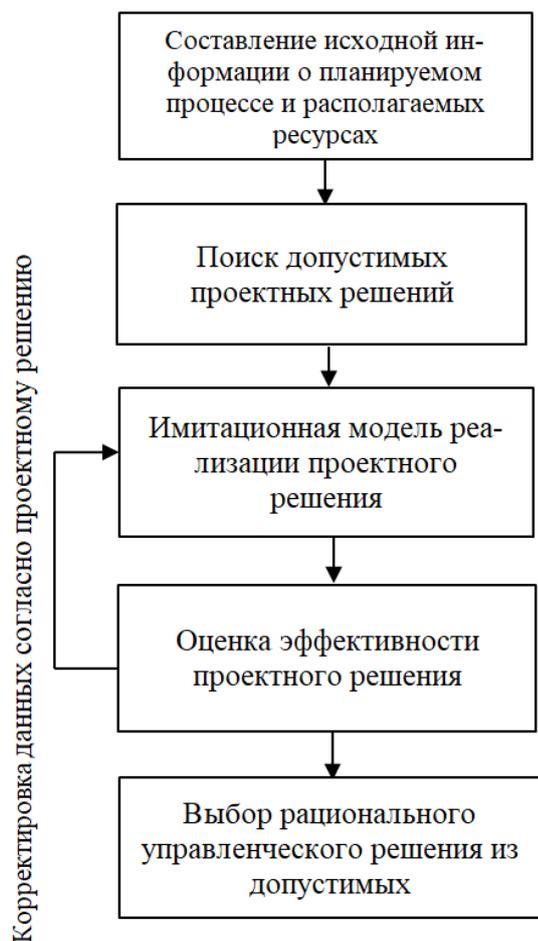


Рисунок 1. Методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений

Методы прескриптивной аналитики помогают определить оптимальные решения для достижения определенных целей на основе анализа данных. На прескриптивном (предписывающем) уровне лица принимающие решения получают варианты решений анализируемой задачи. Реализована такая аналитика может быть как в виде расчетов вероятности тех или иных событий при принятии решений или поиска некоего оптимума, так и в виде интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

В данном исследовании предлагается методология интеллектуальной поддержки при принятии проектных решений, которая представлена на Рисунке 1. Эта система объединяет несколько ключевых компонентов, которые взаимодействуют между собой для обеспечения эффективности принятых решений.

В начале составляется исходная информация о планируемом процессе и располагаемым ресурсам для его реализации. Далее, на основе исходных данных, производится поиск допустимых проектных решений. Одним из методов

прескриптивной аналитики является имитационное моделирование. Имитационная модель реализации процесса базируется на выбранном проектном решении.

Результатом прогона общей имитационной модели является некие качественные и количественные показатели, характеризующие процесс. Необходимые показатели должны быть собраны и проанализированы для каждого прогона, для определения оптимальности выбранного проектного решения. При каждом прогоне имитационной модели реализуется выбранное проектное решение, которое реализуется в симулировании выполнения процесса на основе этих решений, учитывая доступные ресурсы.

Далее осуществляется анализ результатов прогонов имитационной модели. Сравниваются полученные показатели между разными прогонами с учетом выбранного критерия эффективности принятия проектных решений. Важно отметить, что необходимо произвести необходимое количество прогонов имитационной модели, чтобы учесть случайные факторы и получить более

надежные результаты, что позволит выявить общие тенденции и установить стабильные показатели процесса при различных вариантах проектных решений.



Рисунок 2. Методология системы интеллектуальной поддержки принятия проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз

Таким образом, процесс выбора рационального проектного решения включает в себя составление исходной информации, поиск допустимых решений, прогоны имитационной модели, сбор и анализ показателей процесса, а также сравнительный анализ результатов для выбора оптимального решения. Этот подход позволяет принимать рациональные и обоснованные управленческие решения, учитывая имеющиеся ресурсы и цели организации.

Предложенная методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений перенесена на сложную техническую систему транспортного освоения лесосырьевых баз (Рисунок 2).

Проектировщик, имея техническое задание и данные о располагаемых ресурсах лесозаготовительной организации, выбирает структуру технической системы, т.е. выполняет поиск проектных решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог

с использованием информационно-поисковой системы по физическим эффектам. Имитационная модель реализации проектных решений транспортного освоения лесосырьевых баз состоит из двух частей и включает в себя обработку больших исходных данных на основе гетерогенной информации.

Что касается исходных данных, то, прежде всего, необходимо располагать достаточно достоверными данными о законах и параметрах распределения случайных величин производительностей, времени непрерывной работы и времени простоя для землеройных, землеройно-транспортных, уплотняющих машин и автомобилей-самосвалов различных марок, а также машин, входящих в состав комплекта для устройства дорожной одежды, и смесительных установок. При составлении алгоритмов работы обеих частей модели особое внимание было

уделено подробному моделированию рациональной организации ведения работ, как по сооружению земляного полотна, так и по устройству дорожной одежды и осуществляемым перевозкам. Взаимосвязь между обеими частями имитационной модели осуществляется путем учета наличия задела по земляному полотну, а также в силу наличия общего парка автотранспортных средств, которые используются как для перемещения грунта при выполнении земляных работ, так и для транспортировки каменных материалов и готовых смесей при устройстве дорожной одежды. При этом учитывается возможность переключения автотранспортных средств, обслуживающих комплекты машин, занятых на строительстве дорожной одежды, на другую работу в случае их остановки.

Результатом прогона общей имитационной модели является посменная реализация возможного хода процесса возведения земляного полотна в соответствии с заданным вариантом проектного решения и составом используемых ресурсов. Наряду с этим вычисляется значение величины затрат на реализацию проектного решения.

Осуществление достаточного количества прогонов имитационной модели с зафиксированными исходными данными позволяет определить параметры функций распределения случайных величин продолжительности реализации проектного решения, затрат на реализацию и эффекта от реализации проектного решения. Критерий оценки эффективности проектных решений позволяет выбрать решение, учитывающее требуемое время эксплуатации сложной технической системы, что в итоге определяет эффективное управленческое решение.

Реализация элементов методологии интеллектуальной поддержки принятия проектных решений в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз объединена в единое технологическое решение и является прототипом проблемно-ориентированной отраслевой системы поддержки принятия решений при реализации проектов освоения лесосырьевых баз.

Информационно-поисковая система, заключающаяся в поиске физических эффектов, может быть полезным инструментом для инженеров, помогая им принимать решения на физическом уровне, основываясь на обоснованных принципах действия. Предлагается создание информационного фонда по физическим эффектам в виде базы данных, с возможностью обновления данных. База данных физических эффектов вместе с прикладными программами обработки запросов, выступает в качестве инструмента при проектировании технических систем, и, в частности, лесовозных автомобильных дорог. Использование такой базы данных при поиске принципов действия позволит сократить время на поиск необходимой информации, повысит обоснованность принимаемых проектных решений и качество проектируемых технических систем.

База данных по физическим эффектам должна отвечать следующим пунктам:

- 1) иметь возможность изменения структуры базы данных без нарушения работы уже введенных в эксплуатацию задач;

- 2) изолированно решать поставленные задачи;
- 3) иметь диалоговый режим, и соответствующей ему структуру базы данных.

Для выполнения отмеченных условий, предложена реализация базы данных в следующем виде: глобальная база данных, множество локальных баз и программного обеспечения, которое в свою очередь состоит из прикладных программ системы управления базой данных (Рисунок 3).

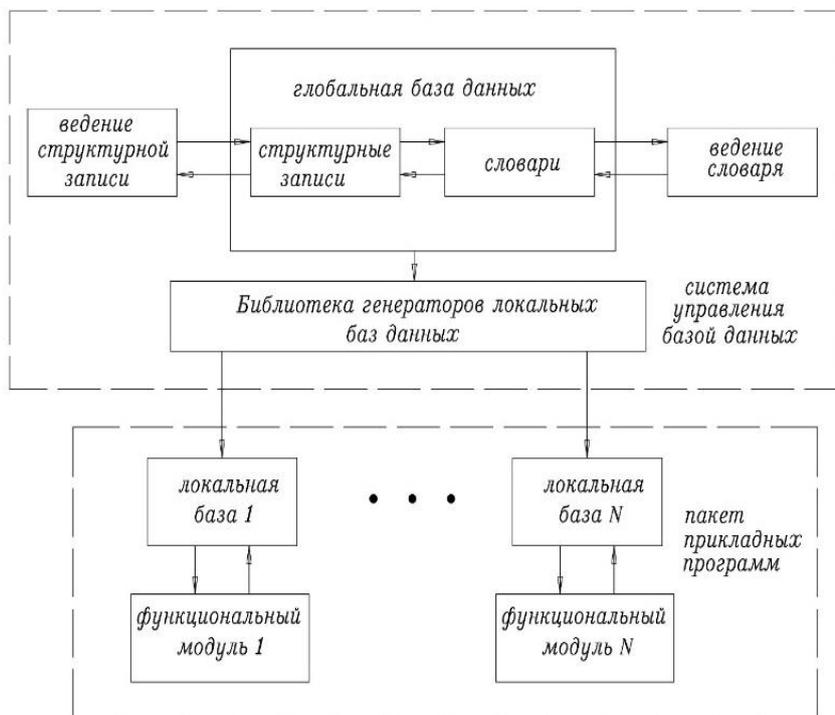


Рисунок 3. Взаимодействие баз данных с проектом прикладных программ

Глобальная база данных по физическим эффектам является основной частью структуры, где объектом выступает описание физического эффекта, в виде записи, состоящей, например, из следующих полей: название эффекта, физический объект, входное воздействие, характеристика воздействия, результат воздействия, характеристика результата воздействия, применение эффекта, физическая сущность эффекта, литература.

Для повышения качества и скорости решения задач требуется создание локальной базы данных, включающей только необходимые сведения. Локальные базы данных используются для записи прикладной программы обработки запросов пользователей, поэтому структура локальной базы должна обеспечивать скорость обработки соответствующего запроса от пользователя.

Рассмотрены основные задачи обработки запросов к базе данных по физическим эффектам.

Техническая задача может быть упрощено представлена в виде трех компонент: начальное состояние, конечный результат, процесс превращения начального состояния в конечный результат. Для каждого вида технической системы возможно сформулировать определенную задачу для поиска принципа действия или модернизации существующей системы. Сформулируем их следующим образом:

1. Требуется описать совокупность физических эффектов, которые отвечают заданному физическому объекту и выходному результату. Решение такой задачи позволяет найти информацию о технической системе или технологическом процессе, которые приведут к появлению заданных эффектов.

Например, результаты могут использоваться для подбора уже функционирующей технической системы, которая обеспечит искомый выходной результат.

2. Требуется описать совокупность вытекающих друг из друга физических эффектов, которые преобразуют заданное входное воздействие в заданный выходной результат. Таким образом, будет сформирована база для проектируемой технической системы.

3. Требуется сформировать множество эффектов, которые имеют заданный физический объект и заданное входное воздействие. Иными словами, стоит задача поиска новой функции известной технической системы или ее нового применения.

4. Требуется описать совокупность физических эффектов, которые имеют заданное входное воздействие.

5. Требуется описать совокупность физических эффектов, которыми обладает часть проектируемой технической системы.

Отметим, что задачи всех типов могут быть реализованы через глобальную базу данных физических эффектов, однако задача второго вида требует использование локальной базы данных, которую необходимо представить в виде графа возможных взаимосвязей эффектов между собой. Найденная последовательность будет представлять собой принцип действия рассматриваемой технической системы.

Если некую техническую систему или объект представить как процесс, переходящий из некоего начального состояния в конечный результат, то физический эффект возможно считать входным воздействием, определяющим процесс. Тогда, физический эффект представим в виде  $\Phi = \{A, B, C\}$ , где  $A$  – входное воздействие;  $B$  – процесс;  $C$  – выходной результат. Заметим, что составляющие  $\Phi$  описываются элементами одного класса.

Пусть справедливо совпадение по входному воздействию и выходному результату эффектов, следующих друг из друга. Это условие представимо в виде  $A_{i+1} = C_i$ ,  $i = \overline{1, k-1}$ , где  $k$  – количество эффектов.

Физический эффект  $\Phi$  может иметь несколько входных воздействий и несколько выходных результатов. В связи с этим, решение задачи обработки запроса 2-го типа может иметь сложную древовидную структуру.

Пусть имеется некоторая совокупность физических эффектов, в соответствие которой сформируем двудольный граф  $G = (x', x'', U)$ , где для  $x'$  сопоставлен физический эффект, а  $x''$  – значения из множеств  $A$  и  $C$ . Дуга  $\vec{u}(x, y) \in U, x \in x'', y \in x'$ , существует если  $x$  соответствует входному воздействию эффекта  $y$ , и соответственно  $\vec{v}(y, x) \in U, x \in x'', y \in x'$ , если  $x$  соответствует выходному результату эффекта  $y$ .

Для любого  $x \in x''$  на паре  $(u, v)$  определим значения функции  $P_x(u, v)$ . Полагаем,  $P_x(u, v) = 1$ , если эффект, из которого выходит дуга  $u$ , совместим с эффектом, в который входит дуга  $v$ . В противном случае  $P_x(u, v) = 0$ . Таким образом, совместимость эффектов отражает значение функции  $P_x(u, v)$ .

Простой путь в графе  $G$   $x_0 u_1 x_1 u_2 x_2 \dots x_i u_i x_{i+1} \dots x_{i+1} u_i x_i$  будем называть правильным, если для всех  $x_i \in x'$ , справедливо условие  $P_{x_i}(u_i, u_{i+1}) = 1$ .

Множество  $F(x_0, y_0)$  – множество всех простых правильных путей, содержащее хотя бы один путь, определяющий решение. Отметим, что если  $x \in x''$  входит в путь определяющий решение, то для всех дуг  $\vec{v}(y, x) \in U, x \in x'', y \in x'$  справедливо условие включения в решение пути начинающегося из вершины корня дерева  $x_0$  и оканчивающийся дугой  $v$ . Таким образом, исходными данными для решения задачи являются помеченные вершины  $x_0$  и  $y_0$  из  $x''$ . Описание множества  $F(x_0, y_0)$  предполагает, что при смене направления дуг, граф представим в виде И-ИЛИ графа.

Возникла задача: в графе  $G$  по заданным вершинам  $x_0, y_0$  найти множество  $F(x_0, y_0)$ . Для ее решения предполагается алгоритм, который строит множество всех решений в виде И-ИЛИ дерева. В корне дерева находится вершина  $y_0$ . Дерево строится через просмотр графа  $G$ , начиная с вершины  $y_0$ , до тех пор, пока всем висячим вершинам не будет соответствовать вершина  $x_0 \in G$ . Вершины дерева, соответствующие вершинам из  $x'$ , являются И-вершинами, остальные – ИЛИ-вершины. В полученном дереве на любом пути из  $y_0$  в висячую вершину  $x_0$ , вершины из  $x'$  встречаются не более одного раза. Это означает, что из решений исключены части цепочек физических эффектов, у которых начальное входное воздействие совпадает с конечным выходным результатом.

Для формирования множества решений  $F(x_0, y_0)$  предлагается следующий алгоритм.

Исходные данные:  $x = y_0$ ;  $k$  – максимальная длина пути в графе  $G$ ;  $\alpha(x)$  – число дуг, входящих в вершину  $x$ ;  $\beta(x)$  – число запрещенных вершин-преемников вершины  $x$ .

1.  $k = k + 1$ .
2. Проверить условие  $k > \alpha(x)$ . Если истина, то перейти к пункту 10.
3.  $y = R(x, k)$ ; ( $R$  функция выбора  $y$ , из всех  $y$  имеющих дугу с номером  $k$  в вершину  $x$ ).
4. Если вершина  $y$  уже встречалась в дереве на пути из корня  $y_0$  в вершину  $x$ , то перейти к пункту 7.
5. Если  $x \in x'$ , то перейти к пункту 8.
6. Если  $P_x(u, v) = 1$ , то перейти к пункту 8.
7. Убрать из рассмотрения вершину  $y$  и перейти к пункту 1.
8. Если выполняется условие  $y = x_0$ , то вершине  $y$  присвоить весовой коэффициент 1 и перейти к пункту 1.
9.  $x = y, k = k + 1$ , перейти к пункту 1.
10. Найти значение  $\beta(x)$ .
11. При  $x \in x'$ , то перейти к пункту 14.
12. Если  $\beta(x) \neq \alpha(x)$ , то присвоить вершине  $x$  весовой коэффициент суммы вершин-преемников  $x$  включенных в рассмотрение. Перейти к пункту 15.
13. Убрать из рассмотрения вершину  $x$  и перейти к пункту 15.
14. При значении  $\beta(x) = 0$ , присвоить вершине  $x$  весовой коэффициент произведения весов вершин-преемников  $x$ .

15. Восстановить по дереву значение  $x$  из  $x'$ , т.е. присвоить  $x$  значение вершины – «отца» вершины  $x$ .

Описание физического эффекта дает возможность задания нескольких функций сочетания и позволяет регулировать ее параметры. Пусть  $(A^1, A^2, A^3, A^4)$  и  $(C^1, C^2, C^3, C^4)$  соответствуют дугам  $u$  и  $v$  графа  $G$ . Определим вектор  $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4)$ , где  $\sigma_i$  принимает значения из множества  $\{0, 1\}$  при  $i = \overline{1, 4}$ . Полагаем, что функция  $P_x^{\sigma_i}(u, v) = 0$ , если  $A^i \neq C^i$  при  $\sigma_i = 1$ ; иначе  $P_x^{\sigma_i}(u, v) = 1$ .

Тогда функция стыковки представима в виде  $P_x^\sigma(u, v) = \prod_{i=1}^4 P_x^{\sigma_i}(u, v)$ .

Количество единиц в векторе  $\sigma$  показывает степень сочетания физических эффектов. Такой подход обеспечивает нахождение искомого варианта с помощью варьирования значениями функции сочетания.

Программа написана в соответствии с концепцией взаимодействия базы данных с прикладными программами. Поэтому реализацию запросов 2-го типа можно считать одним из функциональных модулей пакета прикладных программ поиска принципов действия.

Информационно-поисковая система по физическим эффектам применяется в поиске проектных решений и является одним из элементов предложенной методологии.

В **третьей главе** «Специальное математическое и алгоритмическое обеспечение принятия проектных решений» разработана модель множества проектных решений и формулируется задача поиска допустимых решений. Приводится алгоритм поиска и рассматривается ряд таких вопросов, как формирование определенного технического задания и наиболее рационального решения, поиск «критических» элементов, оценка мощности множества решений, организация архива проектных решений, поиск ближайшего прототипа. Описывается алгоритм работы имитационной модели реализации проектного решения и принятые предположения, и допущения, при ее разработке.

Множество проектных решений некоторого класса удобно описывать с помощью древовидного графа. К вершинам графа соотносят описания элементов проектных решений или их признаков на естественном языке из некоторого конечного множества терминов. Дуги графа отражают либо иерархическую соподчиненность между элементами технической системы и признаками, либо принадлежность признака элементу технической системы. Признаки определяют наличие элементов, взаимную связь элементов и взаимное расположение элементов, их форму, соотношение размеров и характеристику материала, из которого они изготовлены.

Для осуществления возможности доступа к проектным решениям через формулируемое техническое задание строится множество проектных решений путем определения экспертами на некоторых вершинах значений показателей качества функционирования проектируемой технической системы. Построенная с помощью такого алгоритма модель позволяет находить допустимое по техническому заданию множество решений.

Перейдем к описанию модели множества решений. Пусть  $T=(X, U)$  ордеререво, растущее из корня  $X_0 \in X$ . Обозначим через  $K$  множество всех висячих вершин ордеререва  $T$ . Пусть задано разбиение множества  $X/K$  на два подмножества:  $X/K = X_{И} \cup X_{ИЛИ}$ , причем  $X_{И} \cap X_{ИЛИ} = \emptyset$ . Вершины из  $X_{И}$  будем называть И-вершинами: вершины  $X_{ИЛИ}$  – ИЛИ-вершинами. Обозначим через  $F(x)$  множество вершин – сыновей вершины  $x$ , т.е. множество вершин ордеререва  $T$ , в которые входят дуги, исходящие из вершины  $x \in X$ .

Определим множество  $R_T$  – решений на И-ИЛИ дереве  $T$ . Поддерево  $\omega = (X_\omega, U_\omega)$  дерева  $T$  является решением, т.е.  $\omega \in R_T$ , если его возможно построить по следующим правилам:

а) корень  $X_0 \in X_\omega$ ;

б) если  $x \in X_\omega$  является И-вершиной, то в  $X_\omega$  включаются все вершины из  $F(x)$ ;

в) если  $x \in X_\omega$  является ИЛИ-вершиной, то в  $X_\omega$  включается только одна из вершин, исходящих из  $x$ ;

г) в  $U_\omega$  включаются все дуги дерева  $T$ , связывающие вершины из  $X_\omega$ .

Пусть имеется конечный набор фраз естественного языка, т.е. словарь  $\Phi$ , который описывает элементы и признаки некоторого класса технических устройств. Между множеством  $\Phi$  и множеством вершин  $X$  дерева  $T$  установлено однозначное соответствие  $Q: X \rightarrow \Phi$  таким образом, что для любого решения  $\omega \in R_T$  множество фраз естественного языка  $Q(X_\omega)$ , упорядоченное с помощью дерева  $T$ , образует связное описание некоторого проектного решения. При этом корню  $X_0$  дерева  $T$  соответствует наименование класса технических систем, для которого построена модель.

Для осуществления автоматизированного выбора допустимых решений устанавливается соответствие между некоторыми вершинами ордеререва  $T$  и значениями конечного набора показателей качества, которые отражают технические требования, предъявляемые к рассматриваемому классу технических систем в общем и магистральных лесовозных автомобильных дорог в частности. Это соответствие задается отображением  $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ ,  $G: X \rightarrow M^n$ , где  $M = \{0, 1, 2, \dots, L\}$  – множество значений показателей качества  $g_1 (1 \leq i \leq n)$ ;  $n$  – число показателей;  $L$  – натуральное число;  $M^n$  – прямое произведение множеств. Отображение  $G$  задается числовой матрицей  $\bar{G} = \|g_{ix}\|_{i=1, n}^{x \in X}$ , где  $g_{ix} \in M$  – значение показателя  $g_i$  на вершине  $x \in X$ . Матрица  $\bar{G}$  строится экспертными методами при построении модели множества решений.

Таким образом, описание множества проектных решений представляется в виде совокупности пяти компонент

$$Jn(T, Q, G, \Phi, M),$$

где  $T=(X, U)$  – И-ИЛИ дерево, растущее из корня  $X_0 \in X$ ;

$\Phi$  – фиксированный конечный набор фраз естественного языка, который служит для описания элементов и признаков технических устройств;

$Q$  – отображение множества вершин  $x$  в словарь  $\Phi$ , с помощью которого определяются связи И-ИЛИ и соподчиненность между элементами из  $\Phi$ ;

$G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$  – вектор показателей качества функционирования технической системы рассматриваемого класса, определенный на вершинах  $X$ ; предполагается, что каждый показатель  $g_i$  имеет имя и измерен либо в шкале наименований, либо в шкале порядка;

$M$  – множество возможных числовых значений компонент вектора  $G$ .

Отметим, что описание множества решений может служить локальной базой для задачи поиска допустимых проектных решений.

Сформулирована основная задача на модели  $Jn$  – поиск допустимых проектных решений. В процессе поиска решений лицо принимающее решение, может формулировать техническое задание на проектирование, где указываются требования, которым должно удовлетворять искомое проектное решение.

Пусть имеется описание  $Jn$  множества технических устройств определенного класса. Задание на проектирование определим как некоторое подмножество  $S \subset M^n$  допустимых значений показателей качества функционирования технической системы.

Будем говорить, что решение  $\omega \in R_T$  является допустимым относительно задания  $S$ , если для любой вершины  $x \in X_\omega$  значение векторного показателя  $G$  на этой вершине находится в области  $S$ . Проектное решение, соответствующее допустимому решению  $\omega \in R_T$ , будем называть допустимым.

Задача поиска допустимых проектных решений формулируется следующим образом: на множестве  $R_T$  необходимо найти подмножество  $R_T(S) \subset R_T$  такое, что для любого  $\omega \in R_T(S)$  образ  $C(X_\omega) \subset S$ .

Обычно в модели  $Jn$  показатели измерены в шкале наименования и шкале порядка. Поэтому задание множества  $S$  возможно осуществить следующей системой:

$$\begin{cases} g_i = a_i, i \in J_1, \\ g_k > b_k, k \in J_2, \end{cases} \quad (5)$$

где  $J_1$  – множество номеров показателей, участвующих в формулировке задания и измеренных в шкалах наименования;  $J_2$  – соответствующее множество номеров показателей, измеренных в шкалах порядка; при этом предполагается, что большему значению показателя соответствует «лучшее» функционирование устройства;  $a_i, b_k$  – ограничения, заданные на значения  $i$ -ого и  $k$ -го показателей.

Таким образом, для определения задания необходимо задать следующую информацию:  $J_1$  и  $J_2$  – номера показателей, входящих в задание;  $a_i, b_k$  – ограничения на показатели.

*Алгоритм поиска допустимых проектных решений.* Для построения алгоритма поиска необходимо иметь некоторое условие, позволяющее определить наличие хотя бы одного допустимого решения.

Пусть  $\bar{X} \subset X$  – все вершины дерева  $T$  такие, что они допустимы по заданию  $S$ , т.е. для любой вершины  $x \in \bar{X}$ ,  $G(x) \leq S$ . Очевидно, что если  $X = \emptyset$ , то допустимых решений нет, т.е.  $R_m(S) = \emptyset$ , но с другой стороны, не всегда  $R_T(S) \neq \emptyset$ , если  $\bar{X} \neq \emptyset$ .

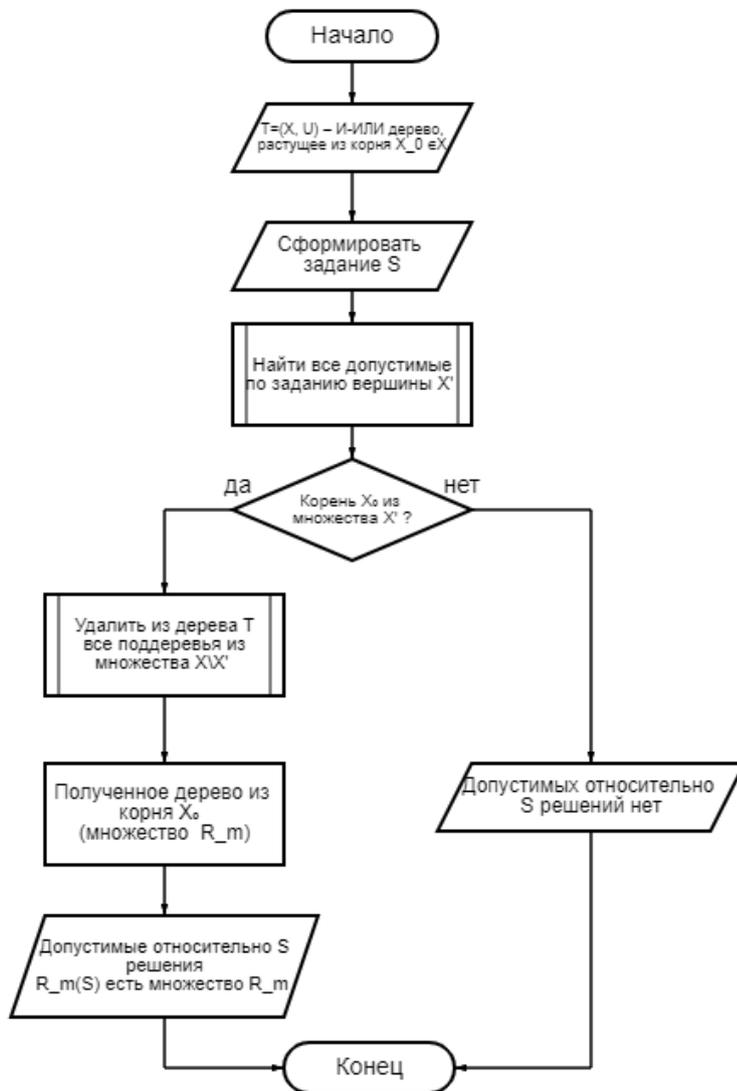


Рисунок 4. Схема обобщенного алгоритма поиска допустимых относительно задания решений

4. Из дерева  $T$  удалить все поддеревья с корнями из множества  $X \setminus \bar{X}$ ; получено множество  $R_T$ .

5.  $R_T(S) = R_T$ ; конец работы алгоритма.

Схема обобщенного алгоритма поиска допустимых относительно задания  $S$  решений из множества  $R_T$  представлен на Рисунке 4.

Если дерево  $T$  представить в виде списка, то алгоритм нахождения множества  $R_T(S)$  легко реализуется на ЭВМ. Для формулировки некоторого решения необходимо вершины некоторого решения  $\omega$  заменить соответствующими фразами естественного языка из словаря  $\Phi$ , используя отображение  $Q: X \rightarrow \Phi$ .

Построим множество  $\bar{X} \subset X$  по следующим правилам:

а)  $X_0 \in \bar{X}$ ;

б) если  $x \in X_{И}$  и  $F(x) \subset \bar{X}$ , то  $x \in \bar{X}$ ;

в) если  $x \in X_{ИЛИ}$  и  $F(x) \cap \bar{X} \neq \emptyset$ , то  $x \in \bar{X}$ .

*Утверждение 1.* Множество  $R_T(S) \neq \emptyset$  тогда и только тогда, когда  $X_0 \in \bar{X}$ .

Это утверждение (необходимое и достаточное условие существования допустимого проектного решения) возможно использовать в алгоритме поиска допустимых относительно  $S$  решений из множества  $R_T$ . Для нахождения множества  $R_T(S)$  сформулируем алгоритм.

Алгоритм.

1. Описать множество  $X$ .

2. Описать множество  $\bar{X}$ .

3. Если корень  $X_0 \notin \bar{X}$ , то допустимых решений нет; конец работы алгоритма.

Таким образом, алгоритм решает следующую задачу: по заданному  $S$ , в виде (5), найти множество допустимых решений  $R_T(S)$ . Отметим, что область  $S$  в виде ограничений (5) однозначно определяется вектором  $(a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_r}, b_{j_1}, \dots, b_{j_i})$ , где  $\{i_1, i_2, \dots, i_r\} = J_1$  и  $\{j_1, j_2, \dots, j_r\} = J_2$ .

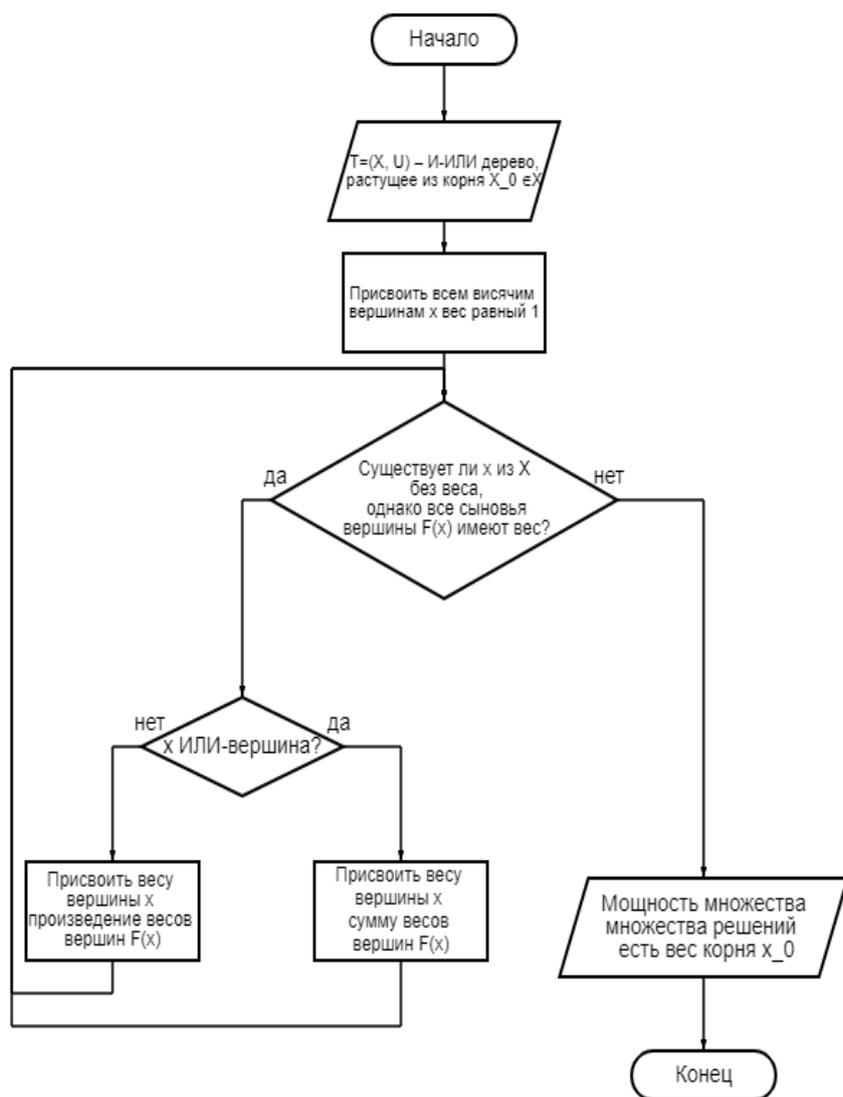


Рисунок 5. Схема обобщенного алгоритма вычисления мощности множества решений на И-ИЛИ дереве

этого, при построении описания множества проектных решений желательно знать, сколько решений эта модель содержит. Умение вычислять мощность множества решений позволит также оценивать эффективность представления решений в виде И-ИЛИ дерева.

Пусть  $R_T(y)$  означает множество решений на дереве  $T(y)$  – максимальном поддереве дерева  $T$  с корнем  $y \in X$ . Справедливо следующее утверждение.

*Утверждение 2.* При  $x \in X \setminus K$

В связи с тем, что ранговые показатели (измеренные в шкалах порядка) в задании на проектирование играют роль критериев качества (чем выше значение показателя, тем лучше конструкция), то лицо принимающее решение может варьировать ограничениями на эти показатели, «усиливая» или «ослабляя» требования к проектируемому объекту или системе.

При решении задачи поиска допустимых проектных решений лицо принимающее решение может интересоваться вопросом о количестве найденных допустимых вариантов. Кроме

$$|R_{T(k)}| = \begin{cases} \prod |R_{T(y)}|, & \text{если } x \in X_{И} \\ \sum_{y \in F(x)} |R_{T(y)}|, & \text{если } x \in X_{ИЛИ} \end{cases} \quad (6)$$

Знаком « $| \cdot |$ » обозначается мощность множества.

На основе формулы (6) можно предложить алгоритм вычисления мощности множества решений на И-ИЛИ дереве.

Алгоритм.

0 шаг. Приписать всем висячим вершинам вес 1.

1 шаг. Найти вершину  $x \in X$  такую, что она не имеет веса, но все вершины на  $F(x)$  имеют некоторый вес; если такой вершины нет, то перейти к шагу 5.

2 шаг. Если  $x \in X_{ИЛИ}$ , то перейти к шагу 4.

3 шаг. Приписать вершине  $x$  вес, равный произведению весов всех вершин из  $F(x)$ ; перейти к шагу 1.

4 шаг. Приписать вершине  $x$  вес, равный сумме весов всех вершин из  $F(x)$ ; перейти к шагу 1.

5 шаг. Мощность множества  $R_T$  есть вес корня  $x_0$ ; конец.

Схема обобщенного алгоритма вычисления мощности множества решений на И-ИЛИ дереве представлен на Рисунке 5.

*Оценка близости решений.* В архиве проектных решений могут находиться известные решения, например запатентованные в нашей стране или за рубежом. После нахождения рационального решения часто приходится показать решение – прототип, т.е. наиболее известное решение. В частности, наличие множества ближайших прототипов позволяет рассматривать различные варианты функционирования сложной технической системы.

Для решения задачи синтеза ближайшего прототипа проектного решения предлагается использовать адаптированный комплекс условий оценки близости решений из  $R_T$ . Предположим, что имеется два решения  $\omega^1, \omega^2 \in R_T$ . Перечислим свойства, которыми должен обладать адаптированный комплекс условий оценки близости решений.

1. Чем дальше от корня различаются решения, тем они ближе. Действительно, так как дерево  $T$  строится по принципу от общего к частному, то весомость вершины  $x \in X$  в оценку близости решений обратно пропорциональна глубине этой вершины (под глубиной вершины понимается длина пути от корня до этой вершины).

2. Декомпозируемость оценки близости решений: близость двух решений оценивается исходя из близости соответствующих подрешений.

3. Возможно сравнивать между собой только сыновей одного отца (т.е. только вершины их  $F(x)$ ).

4. Если вершина  $x$  и вершина  $y$  входят в два различных решения, но имеют одного отца – ИЛИ-вершину, то необходимо учитывать, сколько вершин находится ниже  $x$  и  $y$ .

5. Сыновья И-вершины могут иметь различный вклад в оценку близости решений.

Исходя из вышеприведенных правил, будем конструировать функцию для оценки близости решений.

Пусть  $\omega^1$  и  $\omega^2$  объединены в одно И-ИЛИ дерево  $T(\omega^1, \omega^2)$ . Очевидно, различия появляются на ИЛИ-вершинах. Пусть  $X_r(\omega^1, \omega^2)$  – множество ИЛИ-вершин дерева  $T(\omega^1, \omega^2)$  таких, что для любой вершины  $x \in X_r(\omega^1, \omega^2)$  справедливо  $|F(k)| > 1$ . (символом « $| \cdot |$ » обозначена мощность множества). В соответствии с правилом 4 возможно определить различия  $f(x)$  по вершине  $x \in X_r(\omega^1, \omega^2)$  следующими условиями:

$$1) f(x) = |A_x| + |B_x| - 2|A_x \cap B_x|,$$

где  $A_x$  – множество вершин решения  $\omega^1$ , лежащих ниже вершины  $x$ ;

$B_x$  – множество вершин решения  $\omega^2$ , лежащих ниже вершины  $x$ .

$$2) f(x) = \max(|A_x|, |B_x|).$$

Отметим, что хотя ниже вершины  $x$  решения  $\omega^1$  и  $\omega^2$  не пересекаются, они могут содержать (некоторые вершины) одинаковую символьную информацию из словаря  $\Phi$ . При оценке близости решений это возможно учесть, идентифицировав такие вершины, т.е. в этом случае, вообще говоря, пересечение  $A_x \cap B_x$  будет непустым.

$$3) f(x) = 1 - \frac{|A_x \cap B_x|}{|A_x \cup B_x|}.$$

$$4) f(x) = 1 - \frac{|A_x \cap B_x|}{\max(|A_x|, |B_x|)}.$$

Таким образом, для каждой вершины  $x \in X_r(\omega^1, \omega^2)$  может быть определена функция различия  $f(x)$ . Для учета свойства 1 определим окончательную функцию различия на вершине  $x \in X_r(\omega^1, \omega^2)$

$$V(x) = \frac{f(x)}{h(x)},$$

где  $h(x)$  – глубина вершины  $x$ .

С учетом свойства 5 определим для каждой вершины  $x \in X_r(\omega^1, \omega^2)$  весовой коэффициент значимости вершины  $x$  для оценки близости решений  $p(x)$ . Причем  $\sum_{x \in X_r(\omega^1, \omega^2)} p(x) = 1$ . Получаем окончательную функцию оценки близости решений

$$r(\omega^1, \omega^2) = \sum_{x \in X_r(\omega^1, \omega^2)} p(x) * V(x).$$

Пусть  $E_T$  – множество всех путей дерева  $T$  из корня  $x_0$  в висячие вершины  $K$ . Пусть  $\alpha$  и  $\beta$  правые пути из  $E_T$ . Символами  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\beta}$  обозначим вершины, через которые проходят пути  $\alpha$  и  $\beta$  соответственно. Расстояние на множестве  $E_T$  определим как  $\rho(\alpha, \beta) = \frac{|\bar{\alpha} \cap \bar{\beta}|}{\max(|\bar{\alpha}|, |\bar{\beta}|)}$ .

Нетрудно показать, что  $\rho(\alpha, \beta)$  удовлетворяет аксиомам расстояния. Пусть имеются произвольные решения  $\omega^1$  и  $\omega^2 \in R_T$ . Для каждого из этих решений

выпишем наборы из повторяющихся путей на дереве  $T$  из корня в висячие вершины, покрывающие эти решения:

а)  $\omega^1 * \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ , где  $\alpha_i \neq \alpha_k$  при  $k \neq i$ ;

б)  $\omega^2 * \beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ , где  $\beta_i \neq \beta_k$  при  $k \neq i$ .

Расстояние  $d$  между  $\omega^1$  и  $\omega^2$  определим следующим образом

$$d(\omega^1, \omega^2) = \max_{i=1, m} \min_{j=1, n} \rho(\alpha_i, \beta_j) + \max_{j=1, n} \min_{i=1, m} \rho(\alpha_i, \beta_j).$$

*Утверждение 3.*  $d$  является расстоянием, т.е. справедливо

1)  $d(\omega^1, \omega^2) = 0$  тогда и только тогда, когда  $\omega^1 = \omega^2$ ;

2)  $d(\omega^1, \omega^2) = d(\omega^2, \omega^1)$ ;

3) для любых  $\omega^1, \omega^2, \omega^3 \in R_T$  справедливо

$d(\omega^1, \omega^2) \leq d(\omega^1, \omega^3) + d(\omega^2, \omega^3)$ .

Таким образом, множество  $R_T$  представляет собой метрическое пространство. Для синтеза ближайшего прототипа предлагается организовать набор решений из архива, вычисляя каждый раз близость с найденным решением. Затем найти решение с наименьшей оценкой различия, которое будет представлять собой ближайший прототип.

*Имитационная модель реализации проектных решений.* Имитационная модель реализации проектных решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог представлена в двух частях: земляные работы и перевозки. При создании алгоритма работы имитационной модели реализации проектных решений были приняты следующие предположения и допущения, основанные на гетерогенной информации.

На основании проведенных ранее исследований предполагается, что производительность дорожно-строительных машин описывается нормальным законом распределения. Для автомобилей-самосвалов принято, что случайные величины скоростей груженого и порожнего автомобиля, времени разгрузки и времени дополнительных операций подчиняются закону гамма-распределения, близкого к нормальному. Считается, что к началу очередной смены в состоянии готовности к работе находится случайное число автомобилей-самосвалов каждой марки из имеющихся в составе автомобильного парка.

Влияние кратковременных простоев внутри смены учитывается случайной величиной часовой производительности автомобиля. Принято, что к концу смены всегда должен быть полностью отсыпан, выровнен и уплотнен слой грунта по всему поперечному сечению земляного полотна. Это означает, что в каждом отдельно взятом отряде машины каждого типа выполняют за смену один и тот же объем работ.

При отсыпке грунта из выемки (или резерва) в насыпь при наличии в выемке (резерве) грунтов различных групп по трудности разработки предполагается, что разработка всегда начинается с грунтов, имеющих наиболее высокий номер

группы, с тем, чтобы верх насыпи был затем отсыпан из легко разрабатываемых грунтов (1 или 2 группы), что улучшает его качество.

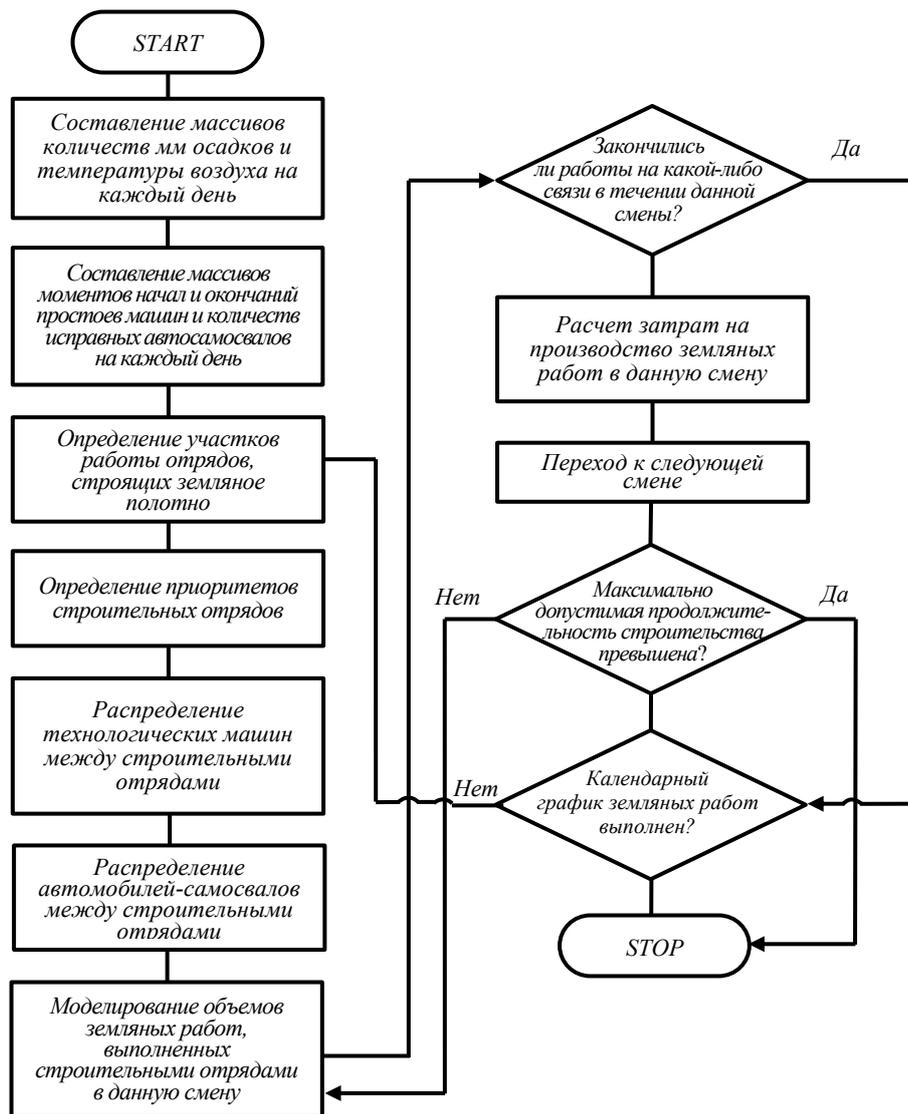


Рисунок 6. Схема обобщенного алгоритма работы первой части имитационной модели реализации проектных решений

соответствующих случайных величин. Далее, для каждого строительного отряда, согласно календарному графику, определяются участок выемки или сосредоточенный резерв (или транспортная развязка), в котором будут работать ведущие машины отряда. Схема обобщенного алгоритма работы первой части имитационной модели приведен на Рисунке 6.

Моделирование процесса перевозок начинается с составления массивов моментов начал и окончаний простоев для всех машин и механизмов. Конкретный состав машин обуславливается конструкцией дорожной одежды и задается в проектном решении. Кроме того, составляются массивы моментов и размеров поставок материалов различных видов на склады в течение реализации проектного решения.

Вся трасса разбивается на участки согласно эпюре перемещения земляных масс.

Моделирование процесса возведения земляного полотна начинается с составления массивов количеств миллиметров осадков и температуры воздуха на каждый рабочий день, а также моментов начала и окончания простоев для каждой из машин, входящих в состав парка строительных машин. Кроме того, определяется количество исправных автомобилей-самосвалов различных марок на каждую смену. Составление этих массивов производится путем моделирования реализаций

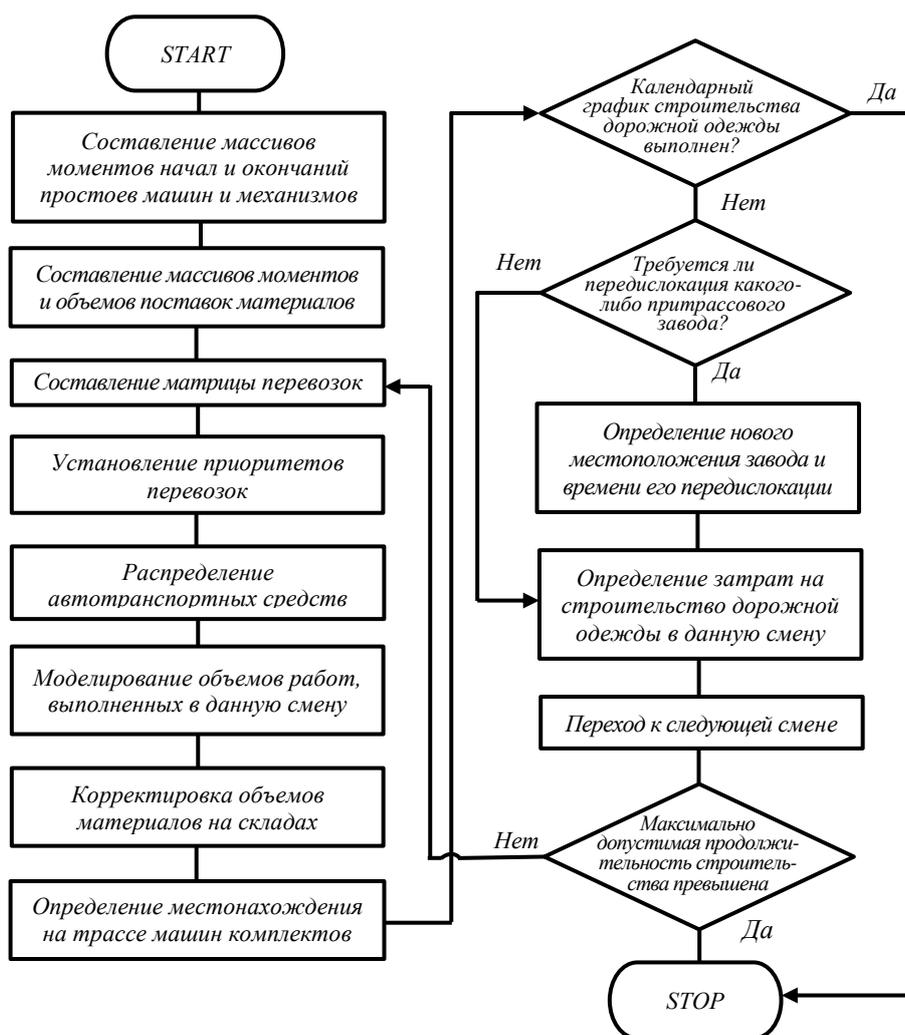


Рисунок 7. Схема обобщенного алгоритма работы второй части имитационной модели реализации проектных решений

Интервалы между поставками и размеры поставок случайны, но при этом соблюдается условие того, что как только суммарный размер поставок какого-либо материала достигает того количества, которое требуется для реализации проектного решения, поставки этого материала прекращаются. После составления массивов переходят к посменному моделированию процесса перевозок. Схема обобщенного алгоритма работы второй части имитационной модели приведен на Рисунке 7.

Имитационная модель реализации проектных решений

также является частью предложенной методологии, которая лежит в основе проблемно-ориентированной системы поддержки принятия проектных решений.

В четвертой главе «Методика разработки проектных решений по организации и планированию вариантов лесовозных автомобильных дорог на основе проблемно-отраслевой системы поддержки принятия проектных решений» приведены этапы разработки методики проектных решений организации и планирования вариантов лесовозных автомобильных дорог.

Основой настоящей методики является метод взаимосвязанного определения оптимальной продолжительности реализации проектного решения и обеспечивающего его состава ресурсов, описанный во второй главе диссертационного исследования.

Для восстановления корреляционной зависимости (4) достаточно составить около 6-8 вариантов исходных данных и провести с каждым из них серию экспериментов, состоящую приблизительно из двадцати прогонов имитационной модели, что обусловлено точностью исходных данных. В ходе

работы имитационной модели возможно с той или иной степенью проследить имитацию процесса реализации проектного решения. В случае нехватки технологических машин какой-либо марки, выдается информационное сообщение, что позволяет назначать сбалансированный состав парка машин. Вся информация выдается на экран дисплея, и с дисплея же производится корректировка исходных данных в ходе пробных прогонов.

Результатом одного прогона имитационной модели является реализация случайной величины продолжительности реализации проектного решения  $T$  и случайной функции темпа изменения затрат на реализации  $S(t, T)$ , на основании которых по формуле (1) рассчитывается эффект реализации проектного решения. Полученные в результате каждой серии экспериментов с одним вариантом исходных данных модальные значения продолжительности реализации  $T_{mod}$  необходимо фиксировать.

Таким образом, получена статистика, требуемая для установления корреляционной зависимости эффекта от реализации проектного решения от продолжительности его реализации (4). Исходя из этой зависимости, определяется продолжительность оптимальной реализации проектного решения исследуемого объекта  $T^*$ .

Последним шагом является выбор рационального варианта проектного решения. Для этого необходимо взять в качестве начального приближения тот вариант исходных данных из уже рассмотренных, при котором модальное значение продолжительности реализации наиболее близко к  $T^*$ . Затем путем корректировки исходных данных этого варианта, проводя пробные эксперименты с имитационной моделью, требуется подобрать состав ресурсов, обеспечивающий совпадение  $T_{mod}$  с  $T^*$ . В результате будет получен рациональный вариант проектного решения, ориентированный на оптимальную продолжительность реализации и обеспечение максимального эффекта от реализации проектного решения организации и планировании вариантов лесовозной автомобильной дороги.

Результаты, полученные в настоящем исследовании, были применены в разработке проектного решения перемещения возведения земляного полотна для участка лесовозной автомобильной дороги в Калужской области. Для восстановления корреляционной зависимости (4) было подобрано 6 вариантов составов парков машин. Подбор вариантов осуществлялся путем пробных прогонов имитационной модели. Целью пробных прогонов при подборе каждого варианта являлось обеспечение рационального распределения ведущих машин между отрядами для согласованного выполнения намеченного календарного графика. Составы парка машин от варианта к варианту изменялись таким образом, чтобы реализации случайной величины продолжительности реализации проектного решения охватывали всю ее область определения. С каждым из подобранных шести вариантов исходных данных было проведено не менее 20 прогонов имитационной модели. Результаты экспериментов отражены в таблице.

Таким образом, была набрана статистика для установления корреляционной зависимости (4)

$$\mathcal{E}(T) = 146,2732 + 0,36163 T - 0,10975 T^2 \cdot 10^{-2} + 0,9072 T^3 \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

где  $T$  – продолжительность реализации проектного решения; выражена в сменах, а эффект от строительства дороги, млн. руб.

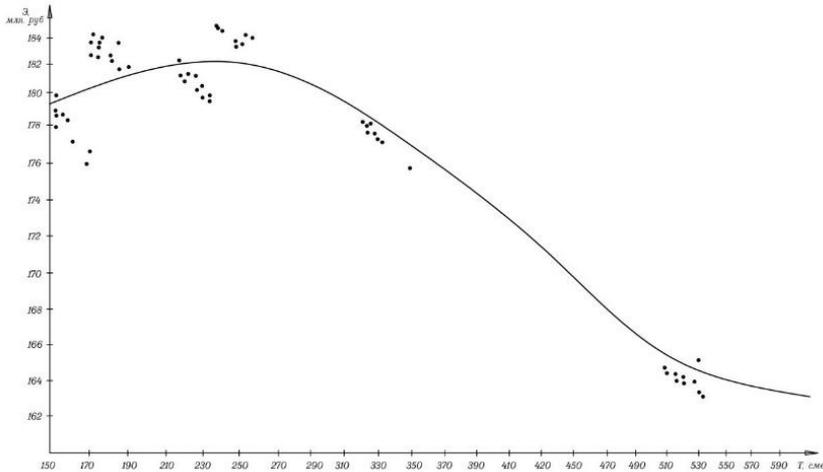


Рисунок 8. Корреляционная зависимость эффекта реализации проектного решения от продолжительности реализации

Область определения величины продолжительности реализации проектного решения на рассматриваемом участке была принята в интервале (150, 630) смен. Степень уравнения (7) обусловлена тем, что в него были включены только значащие члены, уровень значимости был принят равным 5%. Графически вид зависимости (7) представлен на Рисунке 8. Исходя

из (7),  $\max_T \mathcal{E} = 182,025$  млн.руб. и достигается при  $T^* = 261$  смене.

Затем путем дальнейших экспериментов с имитационной моделью был подобран рациональный состав парка машин для реализации проектного решения и соответствующий ему календарный график для проектируемого участка автомобильной дороги (Рисунок 9).

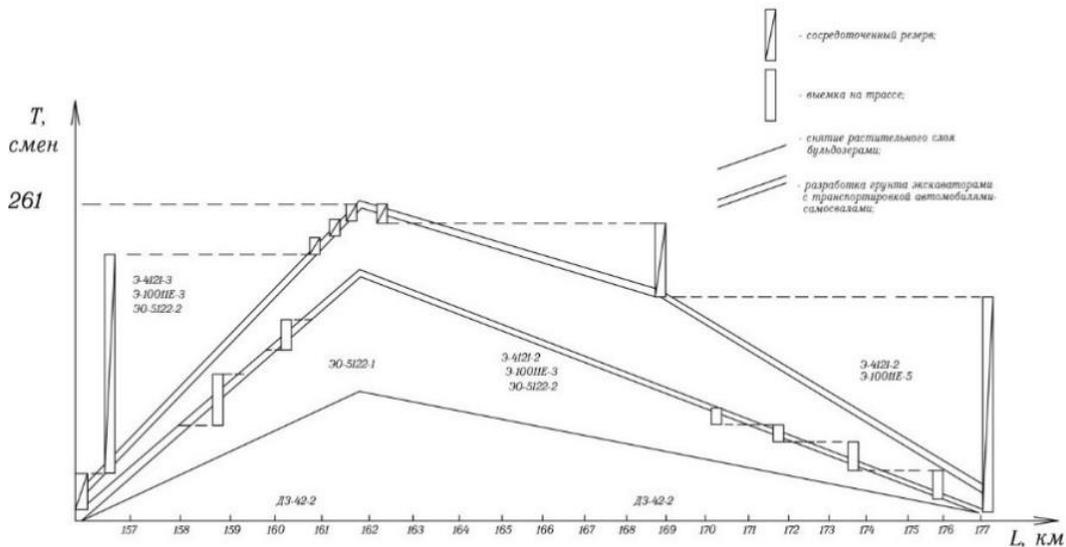


Рисунок 9. Календарный график реализации проектного решения на участке магистральной лесовозной автомобильной дороги

В пятой главе «Практическая реализация проблемно-отраслевой системы принятия проектных решений при реализации проектов освоения лесосырьевых баз» приводится характеристика программного решения элементов проблемно-

отраслевой системы принятия проектных решений. За счет интеграции в единое технологическое решение системы интеллектуальной поддержки принятия решений и комплекса факторов организации и планирования вариантов лесовозных автомобильных дорог обеспечивается создание эффективной, целостной и сбалансированной системы стратегического целеполагания и планирования в лесном комплексе.

Программы реализуют алгоритм поиска допустимых проектных решений и выдачу на печать связного описания найденных решений на языке, близком к естественному и имеют дружественный интерфейс.

Среднее время работы программ после ввода задания на поиск решений и до печати первого найденного варианта проектного решения возможно оценить по следующей формуле:

$$t_{cp} \approx t_1 m + i t_2 n,$$

где  $t_{cp}$  – среднее время работы программ;  $m$  – число вершин в дереве;  $t_1$  – время, затрачиваемое на обработку одной вершины дерева (при данной реализации программ это время равно 0,06 сек.);  $i$  – число вершин дерева, оцененных относительно показателей;  $n$  – число показателей в техническом задании;  $t_2$  – время, затрачиваемое на проверку ограничений для одного показателя в одной вершине.

Опытная эксплуатация программ показала, что полное время, затрачиваемое на обработку одного задания, начиная с его ввода и кончая печатью описания найденного решения, колеблется в пределах 0,5-1 минут. Схема обобщенного алгоритма концепции программ приведен на Рисунке 10.

Система программ работает в диалоговом режиме. Для поиска допустимых проектных решений диалог состоит в следующем. Выдается сообщение: «Задание» и система переходит к соответствующему сценарию диалога для ввода задания. После ввода задания и поиска допустимых проектных решений в случае, если решений нет, выдается сообщение: «Решений нет. Будете ослаблять требования?». В зависимости от ответа лица принимающего решения: «ДА» или «НЕТ» система либо переходит к вводу нового задания, либо к программе поиска критических элементов. В случае, когда имеются допустимые решения, выдается сообщение: «Будите ли усиливать требования?» Если ответ ДА, то система переходит к сценарию диалога поиска оптимального технического задания. Если ответ НЕТ, то проектировщик указывает на метод выбора решений и решение выдается на печать. После сообщения: «Нужен прототип?» и ответа ДА или НЕТ происходит переход к программе поиска ближайшего прототипа, либо система заканчивает работу.

В главе приведены методические рекомендации по построению модели множества проектных решений. Предварительный анализ собранных проектных решений должен быть нацелен на построение терминологического словаря  $\Phi$ , списка показателей –  $\{g_i\}$  качества функционирования решений рассматриваемого класса объектов и выделение «базовых» решений, т.е. некоторого количества эффективных и перспективных решений. В дальнейшем



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методология интеллектуальной поддержки принятия проектных решений при управлении сложными техническими системами транспортного освоения лесосырьевых баз, обеспечивающая управление состоянием дорожно-транспортной инфраструктуры в районах лесозаготовки, учитывающим климатические условия, количественный и качественный состав функционирующего автотранспортного парка, количество рабочих отрядов, объем работ, календарный график работ, поставки и объем материалов.

2. Разработана модель описания параметров лесовозных автомобильных дорог, влияющих на поддержку выбора управленческого решения, оптимальную продолжительность процесса реализации выбранного варианта решения и обеспечивающего его состава ресурсов.

3. Обобщая результаты проведенного теоретико-информационного анализа, разработана структура, состав и реализация системы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при управлении техническими системами транспортного освоения лесосырьевых баз в виде специального программного обеспечения на основе многовариантного анализа слабоструктурированной проблемной ситуации выбора возможных вариантов проектных решений из допустимых альтернатив лесовозных автомобильных дорог на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации.

4. Предложен подход к описанию множества допустимых вариантов проектных решений при управлении транспортным освоением лесосырьевых баз на основе совместного использования концепции естественного языка и теории графов. Осуществлен синтез метода поиска вариантов альтернатив проектного задания с использованием показателей качества функционирования технической системы в виде генерации альтернативного графа, в котором вершины представляют собой допустимые варианты проектных решений с учетом индивидуальных предпочтений заинтересованных лиц в широком диапазоне показателей качества проектного задания.

5. Предложен способ упорядочения и структуризации возможных вариантов альтернатив на И-ИЛИ дереве, реализующий алгоритм параметрического синтеза прототипов проектного решения, процедуру поиска предпочтительных проектных решений с использованием адаптированного комплекса условий с учетом индивидуальных предпочтений заинтересованных лиц.

6. Предложен критерий описания и оценки эффективности принятия решения о выборе варианта проектного задания в сложных технических системах транспортного освоения лесосырьевых баз. Критерий представляет собой комплексную оценку решения задачи агрегирования слабоформализованных данных при поиске проектных решений вариантов магистральных лесовозных автомобильных дорог с учетом индивидуальных предпочтений заинтересованных лиц, существующей специфики организации и планирования работ в районах лесозаготовки.

7. Разработано и реализовано в виде прототипа проблемно-ориентированной отраслевой системы транспортного освоения лесосырьевых баз, который объединяет в себе технологическое решение системы интеллектуальной поддержки принятия решений и комплекса факторов организации и планирования вариантов лесовозных автомобильных дорог. Разработанный прототип отраслевой системы поддержки принятия проектных решений внедрен в ООО «Дубрава», ООО «Центрлес», ООО «Гиперборея», ООО «СлавСтрой», ООО «Лестехсервис Регион», ООО «Бастион» при составлении проектов освоения лесосырьевых баз посредством синтеза участков магистральной лесовозной автомобильной дороги.

Расчетный экономический эффект в сфере строительного производства по участку лесовозной автомобильной дороги составил свыше 90 млн. рублей. Годовой экономический эффект от внедрения проблемно ориентированной отраслевой системы поддержки принятия решений при проектировании организации строительства магистральных автомобильных дорог может составить около 270 млн. рублей в ценах 2023 года.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Публикации в изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России категории к1, к2*

1. Анализ исследований по обоснованию сроков улучшения геометрических параметров лесовозных автомобильных дорог / А. Ю. Жук, С. Ю. Саблин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая, Е. Ю. Микова // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 2(50). – С. 81-87.

2. Влияние рельефа местности и почвенно-грунтовых условий на величину оптимального расстояния между путями лесотранспорта / В. В. Никитин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 4(52). – С. 117-121.

3. Выбор критерия оптимальности управленческих решений при проектировании сложных технических систем/ А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17. – № 1. – С. 120-128.

4. Высоцкая, И. А. Исследование некоторых классов почти периодических на бесконечности функций / И. А. Высоцкая, И. И. Струкова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2021. – Т. 21. – № 1. – С. 4-14.

5. Высоцкая, И. А. Обоснование информационно-интеллектуальной поддержки принципов действия технических систем / И. А. Высоцкая // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17. – № 1. – С. 19-26.

6. Высоцкая, И. А. Обоснование методов поиска принципов действия сложных технических систем и объектов/ И. А. Высоцкая // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17. – № 1. – С. 27-34.

7. Высоцкая, И. А. Поиск множества допустимых управленческих решений при проектировании технических систем/ И. А. Высоцкая // Моделирование систем и процессов. – 2024. – Т. 17. – № 1. – С. 34-42.

8. Информационная модель зоны варьирования трассы лесовозной автомобильной дороги / Е. В. Чирков, А. В. Скрыпников, А. О. Боровлев, С. Ю. Саблин, И. А. Высоцкая // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т. 74. – № 12. – С. 538-542.
9. Информационно-интеллектуальная система проектирования лесотранспортных сетей / В.В. Никитин, И.А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76. – № 4. – С. 185-188.
10. Информационно-интеллектуальная система совершенствования геометрического контроля строительных закруглений / П. В. Тихомиров, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 239. – С. 161-171.
11. Исследование математической модели рельефа местности при проектировании автомобильных дорог / А. Ю. Жук, С. Ю. Саблин, А. В. Скрыпников, Д. Е. Болтнев, И. А. Высоцкая // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 2(50). – С. 88-93.
12. Методика вычисления транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги / С. Ю. Саблин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 1(49). – С. 78-81.
13. Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации / Е. В. Чирков, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75. – № 2. – С. 60-65.
14. Методы оптимизации транспортных сетей лесовозных автомобильных дорог / В. В. Никитин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 4(52). – С. 122-126.
15. Программно-технические средства искусственного интеллекта в условиях онлайн-трансформации / А. В. Скрыпников, В. В. Денисенко, И. А. Высоцкая [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75. – № 8. – С. 373-376.
16. Проектирование схем транспортного освоения лесных массивов с применением информационно-интеллектуальных систем / В. В. Никитин, А. Н. Брюховецкий, А. В. Скрыпников, И.А. Высоцкая [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76. – № 3. – С. 130-134.
17. Сочетания криволинейных участков плана и продольного профиля трассы лесовозных автомобильных дорог / А. О. Боровлев, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2021. – № 235. – С. 196-207.
18. Техничко-экономическая эффективность проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог с применением информационно-интеллектуальной системы / В. В. Никитин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76. – № 5. – С. 225-229.
19. Условия зрительной плавности пространственных кривых при автоматизированном проектировании лесовозных автомобильных дорог / А. О.

Боровлев, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75. – № 9. – С. 395-397.

20. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги / Е. В. Чирков, А. В. Скрыпников, А. О. Боровлев, В.С. Прокопец, И.А. Высоцкая // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75. – № 1. – С. 29-33.

21. Формирование оптимальных схем этапного развития лесовозных автомобильных дорог / С. Ю. Саблин, И. А. Высоцкая [и др.] // Системы. Методы. Технологии.– 2021. – № 1(49). – С. 82-85.

#### ***Публикации в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus***

22. A Linear Model of the Forest Transport Network and An Algorithm for Assessing the Influence of the Density of Points and the Length of Links in Developing Multi-Forested Areas / V. V. Nikitin, A. V. Skrypnikov, A. N. Bryukhovetsky, I. A. Vysotskaya // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2021. – Vol. 69. – No. 12. – P. 175-178.

23. Determination of Theoretical Path of Vehicle Motion upon Cornering / A. N. Belyaev, V. P. Shatsky, V. G. Kozlov, T. V. Trishina, I. A. Vysotskaya // Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan). – 2022. – Vol. 25. – No. 5. – P. 741-747.

24. Vysotskaya, I. A. Solutions of Difference Equations Almost Periodic at Infinity / I. A. Vysotskaya // Journal of Mathematical Sciences. – 2022. – Vol. 263, No. 5. – P. 635-642.

#### ***Публикации в изданиях ВАК РФ***

25. Автоматизированное проектирование продольного профиля лесовозных автомобильных дорог с учётом влияния зрительно плавных и изломанных линий / А. О. Боровлев, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. – 2021. – Т. 75. – № 10. – С. 450-453.

26. Анализ действительной криволинейной траектории движения колесной машины / А. Н. Беляев, В.П. Шацкий, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, И.А. Высоцкая // Вестник Воронежского ГАУ. – 2022. – Т. 15. – № 1 (72). – С. 63-70.

27. Боровлев, А. О. Экономическая эффективность от улучшения плавности и ясности лесовозных автомобильных дорог / А. О. Боровлев, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая // Ученые записки Российской Академии предпринимательства. – 2021. – Т. 20. – № 2. – С. 106-112.

28. Интегрирование дифференциального уравнения движения автомобиля на основе аналитического выражения динамической характеристики / Д. Е. Болтнев, И. А. Высоцкая, М. Н. Казачек [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 10. – С. 33-37.

29. К согласованию кинематических характеристик поворота колёсной машины / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина, А. Н. Брюховецкий, И. А. Высоцкая // Вестник Воронежского ГАУ. – 2020. – Т. 13. – № 3 (66). – С. 12-18.

30. Математическое обоснование показателей зрительной ясности криволинейных участков трассы лесовозной автомобильной дороги / А. О.

Боровлев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Транспорт Урала. – 2021. – № 2(69). – С. 90-92.

31. Методика определения теоретической траектории поворота колесной машины / А. Н. Беляев, В.П. Шацкий, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, И.А. Высоцкая // Вестник Воронежского ГАУ. – 2023. – Т. 16. – № 1 (76). – С. 90-97.

32. Методика экспериментальных исследований функционирования автомобильной дороги сельскохозяйственного назначения / С. Ю. Саблин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14. – № 3(70). – С. 58-63.

33. Обоснование выбора математического метода исследования организации строительства лесовозных автомобильных дорог / М. Н. Казачек, Д. М. Левушкин, Ю. А. Боровлев, И. И. Савченко, А. С. Сергеев, А. А. Скрыпников, И. А. Высоцкая, А. Ю. Жук // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 4 (60). – С. 176-180.

34. Оптимизация движения лесовозного автомобильного транспорта на подъемах лесовозных дорог / Д. Е. Болтнев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 7. – С. 13-17.

35. Оценка кинематических характеристик поворота колесной машины / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина Т.В., А. Н. Брюховецкий, И. А. Высоцкая, А. И. Завражнов // Вестник Воронежского ГАУ. – 2020. – Т. 13. – № 4 (67). – С. 71-78.

36. Оценка экономической эффективности проектных решений автомобильных лесовозных дорог / Д. Е. Болтнев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 5. – С. 49-53.

37. Оценка параметров кривой траектории на участке входа в поворот колесной машины / А. Н. Беляев, Д.Н. Афоничев, Т.В. Тришина, А.Е. Новиков, П.В. Шередикин, И.А. Высоцкая // Вестник Воронежского ГАУ. – 2023. – Т. 16. – № 2 (77). – С. 124-135. №138

38. Повышение эффективности лесовозных автомобильных дорог / А. О. Боровлев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 4. – С. 9-13.

39. Проверка кода на уязвимости на всех стадиях разработки / А. В. Скрыпников, В. В. Денисенко, И. А. Высоцкая [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 3. – С. 77-81.

40. Проектирование продольного профиля лесовозной автомобильной дороги на подъемах / Д. Е. Болтнев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников [и др.] // Транспорт Урала. – 2021. – № 4(71). – С. 96-99.

41. Система технико-экономического обоснования геометрических элементов автомобильных дорог / С. Ю. Саблин, А. В. Скрыпников, И. А. Высоцкая [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14. – № 1(68). – С. 41-45.

### ***Патенты на изобретения и полезную модель***

42. Патент № 2705413 РФ, МПК В 62 D 7/14, А01В 69/0 (2006.01). Способ поворота транспортного средства со всеми управляемыми колёсами / А. Н. Беляев, Д. Г. Козлов, И. А. Высоцкая, Т. В. Тришина; заявитель и патентообладатель А. Н. Беляев, Д. Г. Козлов, И. А. Высоцкая, Т. В. Тришина. – № 2019100113; заявл. 09.01.2019; опубл. 07.11.2019. Бюл. № 31. – 7 с.

43. Патент на полезную модель № 207574 РФ, МПК В62D 7/14. Система рулевого управляемыми транспортного средства со всеми управляемыми колесами / А. Н. Беляев, В. Д. Бурдыкин, И. А. Высоцкая, Т. В. Тришина, А. Е. Новиков, Ю. В. Дьяченко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2021109574; заявл. 06.04.2021; опубл. 02.11.2021. Бюл. № 31. – 7 с.

44. Патент на полезную модель № 213863 РФ, МПК В62D 7/14. Система рулевого управляемыми транспортного средства со всеми управляемыми колесами / А. Н. Беляев, В. Д. Бурдыкин, В. А. Гулевский, И. А. Высоцкая, Т. В. Тришина, А. Е. Новиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ.– № 2022103780; заявл. 14.02.2022; опубл. 04.10.2022. Бюл. № 28. – 7 с.

45. Патент на полезную модель № 215945 РФ, В62D 7/14. В62D 12/00. Рулевая система поворота транспортного средства / А. Н. Беляев, В. Д. Бурдыкин, Т. В. Тришина, В. В. Шередекин, И. А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2022128062; заявл. 29.10.2022; опубл. 11.01.2023. Бюл. № 2. – 8 с.

46. Патент на полезную модель № 217686 РФ, В62D 12/00. В62D 5/28. Рулевая система поворота транспортного средства / А. Н. Беляев, В. Д. Бурдыкин, Т. В. Тришина, А. Е. Новиков, П. В. Шередекин, И. А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023105280; заявл. 07.03.2023; опубл. 12.04.2023 Бюл. № 11. – 7 с.

47. Патент на полезную модель № 218095 РФ, В62D 7/14. В62D 12/00, G01В 7/30. Рулевая система поворота транспортного средства / А. Н. Беляев, В. Д. Бурдыкин, Т. В. Тришина, В. В. Шередекин, И. А. Высоцкая; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2023107028; заявл. 24.03.2023; опубл. 11.05.2023. Бюл. № 14. – 8 с.

### ***Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ***

48. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613331 РФ. Программа расчета и построения теоретической траектории входа в поворот кинематического центра колесной машины / А. Н. Беляев, В. П. Шацкий, Т. В. Тришина, И. А. Высоцкая; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2019611802; заявл. 25.02.2019; опубл. 13.03.2019. Бюл. № 3.

49. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616660 РФ. Программа расчета и построения теоретической траектории поворота кинематического центра колесной машины / А. Н. Беляев, В. П. Шацкий, Т. В. Тришина, И. А. Высоцкая; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2019615370; заявл. 13.05.2019; опубл. 28.05.2019 Бюл. № 6.

50. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617785 РФ. Программный комплекс поддержки принятия решений транспортного освоения лесосырьевых баз/ В. Г. Козлов, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников, Д. В. Васильев, Ю. А. Боровлев, А. С. Сергеев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2024616912; заявл. 04.04.2024; опубл. 04.04.2024. Бюл. № 4.

Подписано в печать 24.06.2024. Формат 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> . Бумага кн.-журн.  
П.л. 2,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №25946.  
Типография ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.