

На правах рукописи



Кос Оксана Игоревна

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
СОСТОЯНИЕМ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 2.3.8 «Информатика и информационные процессы
(технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 311 «Прикладные программные средства и математические методы».

Научный руководитель: **Смирнов Владимир Юрьевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры 311 «Прикладные программные средства и математические методы» ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»

Официальные оппоненты: **Дивеев Асхат Ибрагимович**
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела № 55 Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН).

Голосов Павел Евгеньевич
кандидат технических наук, директор Института общественных наук (ИОН) Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита состоится «__» _____ 2025 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.224.03 на базе ФИЦ ИУ РАН по адресу: 119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 42.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН на официальном сайте <http://www.frccsc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.224.03,
к.т.н.



И.А. Рейер

Актуальность темы исследования.

В нашей стране эксплуатируется огромное количество сложных технических систем (СТС). Для того, чтобы снизить затраты на эксплуатацию и, одновременно, обеспечить заданный уровень надежности, необходимо применение вероятностных методов и алгоритмов при принятии управленческих решений. Это позволит управлять техническим состоянием СТС таким образом, чтобы гибко реагировать на изменение эксплуатационных условий, обеспечивать экономический эффект и безопасность эксплуатации. Следовательно, задача разработки вероятностных методов и алгоритмов управления техническим состоянием СТС, решению которой посвящена настоящая диссертационная работа, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

Существенный вклад в построение теории надежности СТС внесли ученые: А.В. Александров, Е.Ю. Барзилович, К.Б. Бобылев, С.А. Бокарев, В.В. Болотин, К.П. Большаков, В.М. Бродский, Е.С. Вентцель, В.М. Горпенченко, Б.В. Гнеденко, Л.И. Иосилевский, П.С. Костяев, В.М. Круглов, Е.Н. Курбацкий, В.В. Ларионов, А.С. Лычев, В.П. Мальцев, Н.А. Махутов, В.Б. Мещеряков, Е.М. Морозов, Н.И. Новожилова, А.В. Носарев, В.О. Осипов, И.В. Павлов, А.С. Платонов, А.А. Потапкин, В.Д. Потапов, В.Д. Райзер, А.Р. Ржаницын, И.А. Рябинина, П.М. Соломахин, А.С. Стрелецкий, С.А. Тимашев, И.А. Ушаков, Е.П. Феоктистова, А.А. Цернант, В.П. Чирков и другие.

Большой вклад в развитие генетических алгоритмов внесли исследователи: J.R. Koza, W.B. Langdon, N.F. McPhee, R. Poli, J.A. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик, Т.В. Панченко, М.Н. Пилинский, Д.В. Рутковская, Л.А. Рутковский и другие.

Рекуррентный алгоритм расчета надежности структурно-сложных систем, описанный в монографии И.А. Рябинина, послужил основой для построения рекуррентного метода расчета надежности с использованием классификации элементов СТС.

Математические методы теории обслуживания сложных систем по состоянию и теории надежности и эффективности в технике, описанные в монографиях Е.Ю. Барзиловича, послужили основой для построения метода управления техническим состоянием элементов СТС с использованием выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

Цель работы: разработка вероятностных методов и алгоритмов управления техническим состоянием СТС для снижения затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности.

Задачи диссертационного исследования:

– выбрать закон распределения и разработать метод расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;

– создать классификацию элементов СТС по критерию их влияния на техническое состояние всей СТС в целом;

– построить рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС для определения вероятности безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех предшествующих замен (ремонтов);

– построить метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющий вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента.

– разработать алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;

– создать программный комплекс расчета надежности СТС на основе разработанных алгоритмов;

– построить схему управления техническим состоянием элементов СТС и системы в целом на весь период эксплуатации.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработан метод расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;

– создана классификация элементов СТС по их влиянию на надежность системы в целом;

– разработан рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС для определения вероятности безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени;

– создан метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющий вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) каждого элемента СТС;

– применен адаптированный генетический алгоритм для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;

– построена схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации.

Теоретическая значимость работы:

- разработанный метод позволяет определять параметры функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований;
- произведена классификация элементов СТС по степени взаимосвязи и взаимовлияния элементов СТС и их влияния на показатели надежности СТС в целом;
- создан рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС;
- построен метод управления техническим состоянием элемента СТС на весь период эксплуатации;
- использован генетический алгоритм для решения задачи достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию СТС при условии обеспечения заданной надежности;
- созданный программный комплекс позволяет рассчитывать показатели надежности СТС и прогнозировать изменение этих показателей в процессе последующей эксплуатации;
- разработана схема управления техническим состоянием элементов СТС и систем в целом на весь период эксплуатации.

Практическая значимость работы:

- с применением разработанного метода произведены расчеты параметров функций отказов для различных элементов СТС на основании результатов обследования;
- в разработанном программном комплексе произведены расчеты вероятности безотказной работы для ряда СТС с учетом произведенной классификации элементов;
- произведены расчеты оптимальных интервалов замен (ремонтов) для различных элементов ряда эксплуатируемых в настоящее время СТС с учетом ранее проведенных ремонтов и обследований;
- расчеты с помощью разработанного модуля программного комплекса на основе генетического алгоритма позволяют достичь оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;
- использование созданного программного комплекса позволяет принимать научно-обоснованные решения по управлению СТС на основе стратегии их эксплуатации по фактическому техническому состоянию с учетом проведенных обследований, плановых и внеплановых ремонтов, а также внезапных отказов;
- построены схемы управления техническим состоянием для ряда

эксплуатируемых в настоящее время СТС на весь период эксплуатации.

Методология и методы исследования.

В диссертационном исследовании использованы известные, достоверные и хорошо зарекомендовавшие себя на практике математические методы и алгоритмы: вероятностные методы, методы решения интегро-дифференциальных уравнений, численные методы, методы поиска экстремумов, рекуррентные методы, генетический алгоритм и др.

Положения, выносимые на защиту (в соответствии с пунктами 1, 6, 8, 16 области исследований паспорта специальности 2.3.8. «Информатика и информационные процессы»):

- классификация элементов СТС по их влиянию на надежность системы в целом;
- рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС;
- метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами;
- применение генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект;
- схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается следующим:

- достоверностью примененных математических методов исследования, в том числе методов теории вероятностей и математической статистики;
- согласованностью результатов расчетов, полученных в разработанном программном комплексе, с данными, полученными в ходе обследований СТС;
- публикациями результатов исследований в рецензируемых научных изданиях, в том числе рекомендованных ВАК;
- докладами и обсуждениями результатов исследований на российских и международных конференциях;
- воспроизводимостью результатов исследований;
- результатами практического применения.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

– XIII научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов» (Москва, МИИТ, 2012);

– Международная научная конференция «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность» (Москва, НИИСФ РААСН, 2013);

– XIV научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов» (Москва, МИИТ, 2013);

– X международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem» (Москва, МИИТ, 2014);

– Международная научно-практическая конференция «Транспорт-2014» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2014);

– 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), (St. Petersburg, 2017);

– 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), (St. Petersburg, 2018);

– 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 20-24 ноября 2023 года;

– Международная научно-практическая конференция, посвящённая 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, (Гомель, 16–17 ноября 2023 г.);

– Международная Воронежская весенняя математическая школа «Современные методы теории краевых задач. Понтрягинские чтения - XXXV» – 2024 (Воронеж, 26 – 30 апреля 2024 г.).

Публикации. По тематике работы опубликовано 17 научных работ [1-17]. В изданиях ВАК РФ и в изданиях, включенных в международную реферативную базу данных Scopus опубликованы девять работ [1 - 9].

Личный вклад. Работы диссертанта, выполненные с соавторами. В основных работах [1–9] приведены ключевые положения диссертации. Работы [1, 7, 8] посвящены созданному автором методу управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, позволяющему вычислить оптимальный интервал замены (ремонта) элемента и разработке модуля программного комплекса на его основе. В работе [2] приведены результаты

произведенных автором расчетов показателей технического состояния искусственных сооружений и их прогнозирование. Работа [6] посвящена применению модифицированного автором генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. В работе [9] представлена произведенная автором адаптация программного комплекса для распределенных вычислительных систем. Результаты в работах [3, 4, 5] получены диссертантом лично при научном руководстве к.т.н. В.Ю. Смирнов. В работе [3] представлен разработанный автором метод расчета параметров функции отказов любого элемента СТС на основании результатов обследований. Работа [4] посвящена созданному автором рекуррентному методу расчета надежности на основе классификации элементов СТС и прогнозированию вероятности ее безотказной работы. В работе [5] приведена разработанная автором схема управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации. Работы [10 – 17] являются статьями в сборниках научных конференций или тезисами научных докладов, выполненных автором на различных научных мероприятиях, в том числе международных конференциях. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованных работах. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные результаты получены лично автором.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Полный объем диссертации 184 страниц текста, включая 42 рисунка, 4 таблицы. Список литературы содержит 83 наименования.

Основное содержание диссертационной работы:

Во введении обоснована актуальность темы исследования, проанализирована степень разработанности темы исследования, сформулированы: цель работы, задачи диссертационного исследования, научная новизна диссертационного исследования, теоретическая значимость работы, практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, подтверждена степень достоверности результатов проведенных исследований, приведен список конференций, на которых докладывались и обсуждались основные положения и результаты диссертации, представлены объем и структура работы.

В первой главе приведены термины и определения в области надежности в соответствии с нормативными документами, а также описаны различные способы оценки надежности СТС, проанализированы их достоинства и недостатки.

С целью устранения недостатков присущих рассмотренным способам в работе предложен новый подход, основанный на применении вероятностных методов и алгоритмов управления состоянием СТС. Для эффективной эксплуатации СТС необходимо осуществлять замены или ремонты элементов не по нормируемым срокам, а в соответствии с результатами расчетов по вероятностному методу с учетом их фактического технического состояния.

Предлагаемый подход к расчету и прогнозированию технического состояния СТС позволяет рассмотреть проблему надежности системы более глобально. Наряду с задачей расчета надежности в данный момент времени эксплуатации СТС, т. е. задачей фиксации текущего технического состояния, а также задачей прогнозирования этого состояния в будущем с помощью расчета изменения показателей надежности, в данной работе задача рассматривается в более общей постановке как задача достижения заданных показателей надежности системы в заданные моменты времени, т. е. задача управления техническим состоянием СТС.

Во второй главе изложен общий подход к управлению техническим состоянием СТС и рассмотрены основные разработанные методы.

В диссертационной работе решается задача достижения минимума затрат на эксплуатацию, выраженного целевой функцией, при условии обеспечения заданного уровня надежности, выраженного вероятностью безотказной работы.

Пусть:

$\bar{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_n)$ - набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС;

n – количество элементов СТС;

$\Psi(\bar{\tau}) = 3э(\bar{\tau}) + 3с(\bar{\tau}) + 3в(\bar{\tau})$ - целевая функция;

$3э(\bar{\tau})$ - стоимость замен (ремонтов) элементов СТС;

$3с(\bar{\tau})$ - затраты на выезд специалистов для замен (ремонтов) элементов СТС;

$3в(\bar{\tau})$ - стоимость времени работы элементов СТС, которые были заменены раньше времени своей оптимальной замены;

$P(t)$ - вероятность безотказной работы;

P_0 - предельно допустимое значение вероятности безотказной работы.

Пусть заданы: $\Psi(\bar{\tau})$, $P(t)$, $\bar{\tau}$, $Z_3(\bar{\tau})$, $Z_c(\bar{\tau})$, $Z_B(\bar{\tau})$.

Найти: оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС, удовлетворяющий системе:

$$\begin{cases} \Psi(\bar{\tau}) \rightarrow \min, \\ P(t) \geq P_0 \quad \forall t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

Затраты определяются из нормативных документов, методик и экспертных оценок. Вероятность безотказной работы $P(t)$ не должна быть ниже предельно допустимого значения P_0 . Например, для искусственных сооружений на железных дорогах России предельное значение установлено инструкцией по оценке состояния и содержания искусственных сооружений и равно 0.9845.

Для решения этой задачи разработано несколько методов.

Исходные данные для последующих методов получаются из метода расчета параметров функции отказов элемента СТС. На основании проведенных уполномоченными организациями обследований на основе методики АСУ ИССО вычисляются вероятности безотказной работы элементов СТС, на основании которых и данных о прошедшей нагрузке для каждого элемента СТС рассчитываются параметры функции отказов элемента $F(t)$.

Первый метод - рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС. С использованием метода расчета параметров функции отказов для каждого элемента СТС определяется функция надежности $\bar{F}(t)$. Функции надежности и классификация элементов СТС является входными данными для рекуррентного метода, который позволяет рассчитать зависимость вероятности безотказной работы СТС от времени. По этой зависимости можно рассчитать момент времени τ_c , при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, т.е. срок эксплуатации СТС. Таким образом, первый метод применяется для обеспечения заданного уровня надежности в поставленной задаче.

Второй метод - метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами. Из нормативных документов, методик и экспертных оценок определяются такие исходные данные для этого метода, как: время эксплуатации, средние длительности планового и внепланового ремонта и интервал безотказности, а из метода расчета параметров функции отказов элемента СТС определяются функции $F(t)$. Метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов

элементов с рассчитываемыми параметрами позволяет произвести расчет оптимального интервала замены (ремонта) τ_0 для каждого элемента СТС. Этот метод применяется для решения задачи достижения минимума затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданного уровня надежности за счет того, что элемент заменяется или ремонтируется в оптимальное время, которое не может быть уменьшено, так как это увеличит затраты, и не может быть увеличено, так как это не обеспечит надежность.

Третий метод (подробно изложенный в 3 главе) - применение генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. С помощью генетического алгоритма вычисляется оптимальный набор интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС $\bar{\tau}_0$, который доставляет минимум целевой функции и удовлетворяет заданному ограничению на совокупность интервалов, т.е. позволяет достигнуть решения поставленной задачи (1).

Таким образом, применение описанных методов позволяет решить задачу управления техническим состоянием СТС, которая заключается в достижении минимума затрат на эксплуатацию, при условии обеспечения заданного уровня надежности. Объектом управления является СТС, например, железнодорожный мост, состоящий из большого количества разнородных элементов. Субъектом управления является эксплуатирующая организация, например, дистанция пути. Входными параметрами для управления являются результаты обследований технического состояния СТС, время эксплуатации и другие исходные данные.

Механизмом управления являются проводимые в определенные моменты времени замены и ремонты элементов конструкции СТС, при чем эти определенные моменты времени формируются не на основе нормативных сроков, а рассчитываются на основе вероятностных методов, учитывающих фактическое техническое состояние СТС и всю предыдущую историю эксплуатации. Целевой функцией управления техническим состоянием является величина затрат на эксплуатацию СТС, т.е. функция приспособленности. Критерием эффективности управления является минимум целевой функции при выполнении заданных ограничений, то есть минимизация затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности. Это фактически означает эксплуатацию СТС в соответствии с критерием «надежность – затраты», что обеспечивает экономический эффект и безопасность эксплуатации

одновременно. Для управления техническим состоянием СТС необходимо произвести количественную оценку фактического технического состояния, для чего требуется задать функция износа, которая соответствует функции отказа из теории надежности. Для выбора функции отказа были проанализированы различные законы распределения.

Закон распределения Вейбулла $F(t)=1-\exp((-t/\beta)^\alpha)$, где α , β – параметры, имеет отрицательный коэффициент асимметрии, что соответствует исследуемым процессам старения элементов СТС, в частности резкому увеличению количества отказов и, соответственно, скорости износа после наступления среднего времени функционирования элемента. Кроме этого, закон Вейбулла, помимо накапливающихся отказов, моделирует и внезапные отказы. Таким образом, на основании проведенного анализа из всех рассмотренных законов распределения в качестве наиболее рационального был выбран закон Вейбулла, так как кривая функции распределения в законе Вейбулла в наибольшей степени соответствует кривой износа в СТС, например, таких как искусственные сооружения.

На основе выбора функций отказа для всех элементов СТС можно рассчитать показатели технического состояния СТС в целом. Это делается с помощью рекуррентного метода расчета надежности, для реализации которого создана классификация элементов СТС в соответствии с их влиянием на отказ всей системы в целом.

Для каждого i -го элемента СТС, где $i=1, \dots, n$, а n – количество элементов, введены и определены коэффициенты: критичности α_i , который характеризует степень влияния отказа элемента на отказ всей СТС; групповой конгломерации β_i , который характеризует свойство элемента в случае отказа его и определенного количества соседних элементов приводить к отказу всей системы в целом; коэффициент работоспособности γ_i , который зависит от вероятности безотказной работы P_i и характеризует степень влияния работоспособности этого элемента на вероятность безотказной работы системы в целом.

Для учета рассмотренных специфических особенностей СТС, а также классификации элементов СТС, введены специальные термины, учитывающие взаимосвязи элементов в СТС. Коннект — это такая совокупность элементов системы, в которую входят все критичные элементы, а также может входить или не входить какая-то часть или все элементы, относящиеся к группам критичных

конгломерирующих, некритичных конгломерирующих и некритичных элементов, но при этом в каждый коннект должно входить не менее такого числа конгломерирующих элементов, находящихся в одном и том же узле, которое обеспечивает работоспособность системы. Коннективность — это свойство системы образовывать коннекты, которые обеспечивают выполнение целевой функции системы с заданной вероятностью безотказной работы. Сложная техническая система, очевидно, обладает свойством коннективности.

Для построения нового коннекта необходимо добавить некритичные элементы, сочетания которых в различных коннектах должны отличаться. Если коннект не включает какой-то элемент, то этот элемент некритичен. Если все коннекты включают какой-либо элемент, то этот элемент критичен. Каждый из элементов конкретного коннекта не должен отказать, что математически выражается как вероятность совместного появления нескольких событий. В соответствии с известной теоремой сложения вероятностей совместных событий, вероятность объединения всех коннектов системы математически выражается в виде суммы вероятностей реализации каждого из коннектов системы без учета их совместной реализации.

Для построения рекуррентного метода необходимо задать матрицу смежности, в которой описаны только те элементы, которые входят либо в группу критичных конгломерирующих, либо в группу некритичных конгломерирующих элементов. Элементы, входящие в группу критичных и некритичных элементов, в матрице смежности не описываются, т. к. их взаимное расположение не влияет на вклад этих элементов в работоспособность системы. Акконнект — это любая совокупность критичных конгломерирующих, некритичных конгломерирующих и некритичных элементов, которая не должна входить в состав коннекта. Введенные термины использованы для построения рекуррентного метода расчета надежности СТС.

Пусть: $\bar{F}(t)$ - функция надежности для каждого элемента СТС.

Пусть заданы: $\bar{F}(t)$, классификация элементов СТС.

Найти: момент времени работы СТС τ_c , при котором $P(t) = P_0$.

При построении рекуррентного метода необходимо сформировать все возможные коннекты. Алгоритмически это делается следующим образом. Для применения метода логических схем необходимо задать функцию алгебры логики, связывающую состояние элементов с состоянием всей СТС:

$$f(r_1, r_2, \dots, r_m) = f(r), \quad (2)$$

где r_1, r_2, \dots, r_m — вероятности событий, состоящих в том, что данные элементы не отказали,

$f(r)$ — функция работоспособности системы.

Вероятность безотказной работы всей СТС рассчитывается с помощью рекуррентного метода по формуле:

$$P\{\bigvee_{i=1}^{l+1} R_i\} = P\{\bigvee_{i=1}^l R_i + P\{R_{l+1}\}\} - P\{\bigvee_{i=1}^l R_i\} * P\{R_{l+1}\}, \quad (3)$$

где R_i — i -й коннект системы, $l \in \overline{1, n-1}$, n — количество элементов СТС.

Этот метод основан на использовании теоремы сложения вероятностей совместных событий. Каждое событие представляет собой коннект системы, представленный в виде элементарных конъюнкций условий работоспособности, записанных в дизъюнктивно-нормальной форме. Рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС позволяет определить вероятность безотказной работы всей системы в любой момент времени и найти срок эксплуатации всей СТС τ_c .

Рассмотрим метод управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, который позволяет осуществлять замены или ремонты элементов через оптимальные интервалы времени.

Задача расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС ставится следующим образом.

Пусть:

t — время эксплуатации СТС;

T_1 — средняя длительность плановой предупредительной замены или ремонта элемента;

T_2 — средняя длительность внеплановой аварийной замены или ремонта элемента;

x — интервал безотказности элемента;

$F(t)$ — функция распределения интервалов времени между внеплановыми заменами или ремонтами, возникающими при обнаружении отказа, т.е. функция отказов элемента;

$G(t)$ — функция распределения интервалов времени между плановыми заменами или ремонтами;

$H(t)$ — математическое ожидание числа отказов за время от 0 до t ;

$p(x, t)$ — коэффициент оперативной готовности.

Пусть заданы: времена T_1, T_2, x , функции $F(t)$ и $H(t)$.

Найти: оптимальный интервал замены (ремонта) элемента

$$\tau_0 = \arg \max_{G(t)} p(x, t). \quad (4)$$

В качестве показателя надежности СТС возьмем коэффициент оперативной готовности $p(x, t)$, т.е. вероятность того, что в момент t элемент будет в работоспособном состоянии и после момента t проработает время x . Ограничениями при решении задачи будут требования: $T_2 > T_1$; $\lambda'(t) > 0$, где $\lambda(t) = f(t)/(1 - F(t))$, $f(t) = F'(t)$; $x \ll T_0$, где T_0 – среднее время безотказной работы элемента. Критерий оптимальности решения задачи: максимизация выбранного показателя надежности $p(x, t)$.

В рассматриваемой задаче под оптимальным решением будем понимать оптимальный интервал замены (ремонта) τ_0 для данного элемента СТС. Максимизация выбранного показателя надежности обеспечивается за счет выбора $G(t)$. Коэффициент оперативной готовности $p(x, t)$ при $t \rightarrow \infty$ можно представить в виде:

$$p(x) = \frac{\int_0^{\infty} [1-G(t)] \cdot [1-F(t+x)] dt}{\int_0^{\infty} [1-G(t)] \cdot [1-F(t)] dt + T_1 \int_0^{\infty} G(t) dF(t) + T_2 \int_0^{\infty} F(t) dG(t)}. \quad (5)$$

Максимум дробно-линейного функционала (5), как показано в работах Барзиловича Е.Ю., ищется на вырожденном распределении вида:

$$G(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq \tau, \\ 1 & \text{при } t > \tau. \end{cases} \quad (6)$$

С учетом (6) выражение (5) приводится к виду (7).

$$p(x, \tau) = \frac{\int_0^{\tau} [1 - F(t+x)] dt}{\int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt + T_1 + (T_2 - T_1)F(\tau)}. \quad (7)$$

Дифференцируя (7) по τ и приравнявая полученный результат к нулю, получаем уравнение (8), из которого определяется точка экстремума функции $p(x, \tau)$:

$$\frac{T_1}{T_2 - T_1 + x} = \lambda(\tau) \int_0^{\tau} [1 - F(t)] dt - F(\tau). \quad (8)$$

С учетом заданных ограничений единственным решением этого уравнения является τ_0 – величина оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС.

Решение уравнения (8) находится с помощью численного метода Симпсона для каждого элемента СТС. В результате получаются оптимальные интервалы замен (ремонтов) для всех элементов СТС.

Среди элементов СТС есть такие, которые имеют наименьший ресурс, так называемые слабые звенья. Их учет производится следующим образом. Поскольку время достижения критического уровня P_0 вероятности безотказной работы СТС наступает раньше,

чем отказ ее элементов, в первую очередь необходимо заменить те элементы, срок замены (ремонта) которых наступает раньше, чем у других, причем за рассчитываемый интервал безотказности до момента времени достижения критического уровня P_0 вероятности безотказной работы СТС. После этого необходимо сделать перерасчет времени эксплуатации всей СТС.

Таким образом оптимальная стратегия эксплуатации СТС, созданная в данной работе, базируется на использовании разработанных вероятностных методов: рекуррентном методе расчета надежности на основе классификации элементов СТС, с помощью которого можно вычислить вероятность безотказной работы всей СТС в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой СТС в предшествующие моменты времени, а также с учетом износа каждого элемента СТС к заданному моменту времени, и методе управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранного закона распределения с рассчитываемыми параметрами функций отказов элементов, с помощью которого можно вычислить оптимальные времена замен (ремонтов) для всех элементов СТС.

В третьей главе рассматривается оптимизация эксплуатации, не поэлементно как во второй главе, а для всей СТС в целом. После того как получены результаты по рекуррентному методу расчета надежности и вычислены оптимальные интервалы замен (ремонтов) элементов СТС необходимо построить схему эксплуатации СТС оптимальным образом. Задача оптимизации эксплуатации СТС за счет эффективной замены ее элементов решается с помощью адаптированного генетического алгоритма и ставится следующим образом.

Пусть: $\bar{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_n)$ - набор интервалов замен (ремонтов) элементов СТС, где n - количество элементов СТС; $\bar{\theta} = (\bar{\tau}_1, \dots, \bar{\tau}_m)$ - популяция решений, т.е. совокупность наборов интервалов, где m - количество наборов в популяции решений; $\Phi(\bar{\theta}) = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m F(\bar{\tau}_l)$ - функция приспособленности популяции решений; $\Psi(\bar{\tau}_l) = \mathcal{Z}_3(\bar{\tau}_l) + \mathcal{Z}_c(\bar{\tau}_l) + \mathcal{Z}_B(\bar{\tau}_l)$ - функция приспособленности l -го набора решений, $l=1, m$, где $\mathcal{Z}_3(\bar{\tau})$, $\mathcal{Z}_c(\bar{\tau})$, $\mathcal{Z}_B(\bar{\tau})$ - стоимости и затраты из (1).

Пусть заданы: $\bar{\tau}$, $\Phi(\bar{\theta})$, $\Psi(\bar{\tau}_l)$, $\mathcal{Z}_3(\bar{\tau})$, $\mathcal{Z}_c(\bar{\tau})$, $\mathcal{Z}_B(\bar{\tau})$.

Найти: $\bar{\theta}_0 = \arg \min_{\{\bar{\theta}\}} \Phi(\bar{\theta})$, далее найти: $\bar{\tau}_0 = \arg \min_{\{\bar{\tau}_l\} \in \bar{\theta}_0} \Psi(\bar{\tau}_l)$.

Множеством решений данной задачи является оптимальная, т.е. эффективная с точки зрения эксплуатации, совокупность наборов времен замен (ремонтов) элементов СТС.

Ограничением при решении задачи оптимизации будет требование на совокупность интервалов, заключающееся в том, что эти интервалы могут быть уменьшены до ближайшего интервала, но они не могут быть увеличены, так как в этом случае не будет обеспечена надежность СТС. Уменьшение до ближайшего интервала обеспечивает сокращение количества выходов на объект, так как несколько элементов СТС заменяются или ремонтируются одновременно.

Критерий оптимальности решения задачи выражен целевой функцией или функцией приспособленности, значения которой используют для сравнения решений. В нашем случае целевая функция – это сумма стоимостей и затрат в процессе эксплуатации СТС из (1). Эти затраты зависят от совокупности интервалов замен (ремонтов) элементов, рассчитанных по изложенным ранее методам. Для оценки популяции решений используется средняя функция приспособленности популяции.

В рассматриваемой задаче оптимальным решением будет оптимальный набор времен замен (ремонтов) элементов \bar{t}_0 для всей СТС в целом, который доставляет минимум целевой функции и удовлетворяет заданному ограничению. При решении задачи оптимизации затрат на эксплуатацию СТС при условии обеспечения заданного уровня надежности основным способом достижения экономического эффекта будет уменьшение количества выездов специалистов на объект. Для решения нашей задачи в силу своей специфики хорошо подходит генетический алгоритм, с помощью которого проводится оптимизация за счет сдвигов времен замен (ремонтов), что приводит к уменьшению количества выходов на объект и, следовательно, к сокращению издержек.

При использовании генетического алгоритма были применены модифицированные операторы: гибридная селекция, включающая помимо метода выборной рулетки, элитарный отбор и отбор усечением; гибридный кроссинговер, включающий помимо одноточечного кроссинговера метод кроссинговера с уменьшением замены; гибридная мутация, включающая помимо точечной мутации метод мутации с вероятностью.

В четвертой главе по методам, рассмотренным во второй главе, построены и изложены следующие алгоритмы:

- рекуррентный алгоритм расчета надежности всей сложной

технической системы на основе классификации элементов СТС с использованием коэффициентов критичности и групповой конгломерации для каждого элемента и с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени. Результатом работы алгоритма является зависимость вероятности безотказной работы системы от прошедшей нагрузки, что позволяет рассчитать срок эксплуатации СТС;

– алгоритм расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента сложной технической системы на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами и с применением численного метода решения интегро-дифференциального уравнения;

– алгоритм оптимизации затрат на эксплуатацию СТС за счет минимизации количества выходов на объект с использованием модифицированного генетического алгоритма, включающего в себя гибридные операторы кроссинговера, селекции и мутации;

В пятой главе описан разработанный программный комплекс «Надежность СТС», а также построена схема управления техническим состоянием элементов СТС и системы в целом на весь период эксплуатации и изложены ее этапы. В программном комплексе «Надежность СТС» реализованы все методы и алгоритмы, рассмотренные в предыдущих главах диссертационной работы. Программный комплекс написан на языке С++. Интерфейс программного комплекса написан с помощью Windows API. Модули программного комплекса представлены на рисунке 1.

Интерактивный графический препроцессор
Модуль программного комплекса расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности и классификации элементов СТС
Модуль программного комплекса расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС с применением выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами
Модуль программного комплекса расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС на основе генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект

Рисунок 1 – Модули программного комплекса «Надежность СТС»

В программном комплексе реализован интерактивный графический препроцессор для создания моделей СТС, а также задания их параметров.

Графический ввод данных о системе и ее элементах с использованием средств визуализации необходим для представления СТС, например искусственных сооружений, с помощью их геометрических моделей, которые позволяют связать эти данные с их геометрическими прототипами. Применение разработанного программного комплекса позволяет обеспечить схему управления техническим состоянием элементов СТС и СТС в целом на весь период эксплуатации, которая представлена на рисунке 2.

На втором этапе по обработанным данным обследований для каждого элемента СТС рассчитываются свои параметры функции отказов $F(t)$ и определяется своя функция надежности $\bar{F}(t)$.

На следующем этапе по найденным функциям надежности $\bar{F}(t)$ и заданной классификации элементов с помощью рекуррентного метода рассчитывается зависимость вероятности безотказной работы СТС от времени и время τ_c , при котором будет достигнут критический уровень вероятности безотказной работы, т.е. срок эксплуатации СТС. Далее по заданным исходным данным и рассчитанным параметрам функции отказов $F(t)$ производится расчет оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС с помощью метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.



Рисунок 2 – Схема управления техническим состоянием СТС

Затем производится учет слабых звеньев, которые заменяются (ремонтируются) раньше рассчитанного оптимального интервала с

целью обеспечения надежности всей системы в целом. В результате получается набор оптимальных интервалов замен (ремонтов) для всех элементов СТС $\bar{\tau}$. На следующем этапе производится расчет оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС с применением генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. В результате получается оптимальный набор интервалов $\bar{\tau}_0$, обеспечивающий минимум затрат на эксплуатацию при условии обеспечения заданной надежности.

На последнем этапе принимается решение о сокращении или продлении времени эксплуатации СТС на основании рассчитанного τ_c , до очередного ремонта в соответствии с рассчитанным оптимальным набором $\bar{\tau}_0$. Далее в процессе эксплуатации производятся замены, ремонты и новые обследования, в результате которых меняются и уточняются исходные данные и входные параметры и все расчеты производятся заново.

В шестой главе произведена адаптация разработанного программного комплекса для распределенных вычислительных систем высокой производительности HPS. Для того чтобы произвести расчеты в программном комплексе с требуемой точностью, особенно для ряда СТС, необходимо обработать большие объемы данных. Для того чтобы сократить время выполнения расчётов, эти данные могут быть обработаны параллельно.

Адаптация разработанного программного комплекса для распределенных вычислительных систем с помощью технологии распараллеливания MPI позволяет применять созданные алгоритмы в HPS. В диссертационной работе было выполнено распараллеливание рекуррентного алгоритма, а также алгоритма расчета оптимального интервала замены (ремонта) элемента СТС и произведены расчеты с их использованием.

В седьмой главе представлены расчеты для ряда эксплуатируемых в настоящее время СТС, в том числе: расчеты параметров функций отказов элементов с учетом ранее проведенных ремонтов и обследований; расчеты оптимальных интервалов замен (ремонтов) элементов на основе метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами; расчеты срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени на основе рекуррентного метода расчета надежности

с учетом созданной классификации элементов; расчет оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС на основе применения генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект. В частности, с помощью разработанного программного комплекса была построена схема управления техническим состоянием на весь период эксплуатации элементов и системы в целом для моста, пропускающего реку «Нерусса», расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка Брянск-Льговской дистанции пути, а также построены зависимости износа, меры повреждения и вероятности безотказной работы для элементов металлического клепаного пролетного строения этого моста от прошедшей нагрузки.

В заключении диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Оптимальная стратегия эксплуатации СТС, созданная в данной работе, базируется на двух вероятностных методах: рекуррентном методе расчета надежности на основе классификации элементов СТС и методе управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами, а также на применении генетического алгоритма для достижения оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на эксплуатируемый объект.

2. Параметры функции отказов для любого элемента СТС могут быть определены на основании результатов обследований с помощью разработанного метода их расчета.

3. Созданная классификация элементов СТС позволяет моделировать влияние технического состояния этих элементов на техническое состояние всей СТС в целом.

4. Построенный в работе рекуррентный метод расчета надежности на основе классификации элементов СТС позволяет определить вероятность безотказной работы системы в целом в заданный момент времени с учетом всех произведенных замен (ремонтов) элементов этой системы в предшествующие моменты времени и срок эксплуатации СТС.

5. Замену или ремонт элемента СТС необходимо производить через оптимальный интервал времени, вычисленный с помощью разработанного метода управления техническим состоянием элементов СТС на основе выбранных функций отказов элементов с рассчитываемыми параметрами.

6. Применение модифицированного генетического алгоритма позволяет построить схему управления техническим состоянием на весь период эксплуатации элементов СТС и системы в целом, обеспечивающую достижение оптимального уровня затрат на эксплуатацию за счет минимизации количества выходов на объект при обеспечении заданного уровня надежности.

7. Созданный программный комплекс «Надежность СТС» состоит из следующих модулей: интерактивный графический препроцессор; модуль расчета срока эксплуатации СТС и зависимости вероятности безотказной работы СТС от времени; модуль расчета оптимального интервала замены (ремонта) для каждого элемента СТС; модуль расчета оптимального набора интервалов замен (ремонтов) элементов для всей СТС.

8. Произведена адаптация разработанного программного комплекса для распределенных вычислительных систем высокой производительности и произведены расчеты с их использованием.

9. С помощью разработанного программного комплекса были построены схемы управления техническим состоянием на весь период эксплуатации элементов и системы в целом для эксплуатируемых в настоящее время СТС. Для моста, расположенного на 478 км II пути участка Брянск-Суземка, анализ полученных результатов позволяет сделать выводы о том, что срок его эксплуатации может быть продлен при сохранении той же интенсивности движения поездов, а количество выходов на объект сокращено.

10. Созданные в диссертационной работе вероятностные методы, алгоритмы и разработанный программный комплекс могут быть основой управления техническим состоянием СТС и эффективно использоваться во всех организациях, эксплуатирующих СТС, а также в проектно-строительных организациях любой отрасли.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.

Результаты диссертационной работы достаточно полно изложены в 17 печатных изданиях.

Девять работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ и в изданиях, включенных в международную реферативную базу данных SCOPUS:

1. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Оптимальный интервал предупредительных замен для искусственных сооружений железных дорог // Мир транспорта. – 2013. – №1. – с.152–155.

2. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Расчет показателей технического состояния искусственных сооружений и их прогнозирование // Транспортное строительство. – 2014. – №1. – с. 30–32.

3. *Кос О.И.* Прогноз износа металлических мостовых пролетов // Мир транспорта. – 2014. – №5. – с.82–89.

4. *Кос О.И.* Рекуррентный алгоритм расчета и прогнозирования вероятности безотказной работы искусственных сооружений // Транспортное строительство. – 2016. – №6. – с. 16–19.

5. *Кос О.И.* Схема управления техническим состоянием искусственных сооружений // Мир транспорта. – 2016. – №5. – с.198–204.

6. *Кос О.И., Смирнов В. Ю.* Применение генетического алгоритма в задаче оптимизации замены элементов системы // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2022. – № 5. – с. 76–89. (перевод: Kos O. I., Smirnov V. U. Optimal Replacement of System Elements Using a Genetic Algorithm // Journal of Computer and Systems Sciences International. Optimal Control. Volume 61. – 2022. – pp. 793–804).

7. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Математическая модель управления техническим состоянием элементов сложных технических систем на основе закона распределения функции отказов элементов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2022, № 6, с. 3–10. (перевод: Kos O. I., Smirnov V. U. Mathematical Model of Control of the Technical Condition of Elements of Complex Technical Systems on the Basis of the Distribution Law of the Function of Element Failures // Journal of Computer and Systems Sciences International. System Theory and General Control Theory. Volume 61. – 2022. – pp. 885–892).

8. *Kos O.I., Smirnov V.U.* Program module for calculating the optimal interval of preventive substitutions // Proceedings 2017 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). – 2017. – pp. 282–283.

9. *Kos O.I., Smirnov V.U., Eseva E.A.* Adaptation of Reliability Calculation Software Packages for High Performance Distributed Computing Systems // Proceedings 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). – 2018. – pp. 219 – 221.

В изданиях, индексируемых РИНЦ и других изданиях опубликованы следующие работы:

10. *Кос О.И., Смирнов В.Ю.* Вычисление интервала предупредительных замен элементов для обеспечения безопасности

искусственных сооружений // Труды XIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 18-19 октября 2012 г., Москва. – М.: ОУС ОАО «РЖД», 2012. – с. XIV–181–XIV–182.

11. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Обеспечение надежности искусственных сооружений на железных дорогах // Сборник к конференции актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность, 02–04 июля 2013 г., Москва. – М.: ФГБУ «НИИ строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», 2013. – с. 463–470.

12. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Расчет показателей технического состояния искусственных сооружений на транспорте // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт–2014», 22–25 апреля 2014 г., Ростов-на-Дону. – Ростов-на-Дону.: РГУПС, 2014. – с. 304–307.

13. Кос О.И. Расчет и прогнозирование показателей технического состояния искусственных сооружений // Труды X международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem», 01–31 мая 2014 г., Москва. – М.: МИИТ, 2014. – с. I–52–I–53.

14. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Применение генетического алгоритма искусственного интеллекта для управления эксплуатацией сложных технических систем // Тезисы 22-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», 20–24 ноября 2023 г., Москва. – М.: «Перо». – 148–149 с.

15. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Применение генетического алгоритма для управления эксплуатацией искусственных сооружений на железных дорогах // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа: в 2 ч.; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко, 16–17 ноября 2023 г., Гомель. – Г.: БГУ транспорта, 2023. – с. 144–146.

16. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Оптимизация затрат на эксплуатацию сложной технической системы с помощью генетического алгоритма искусственного интеллекта // Современные методы теории краевых задач. Понtryгинские чтения – xxxv. Материалы международной Воронежской весенней математической школы, 26–30 апреля 2024 г., Воронеж. – В.: Издательский дом ВГУ, 2024. – 178–180 с.

17. Кос О.И., Смирнов В.Ю. Применение алгоритма Хебба для классификации качества проведенных ремонтов сложных технических систем // Современные методы теории краевых задач. Понtryгинские чтения – xxxv. Материалы международной Воронежской весенней математической школы, 26–30 апреля 2024 г., Воронеж. – В.: Издательский дом ВГУ, 2024. –180–182 с.