

Транспортно-логистическая инфраструктура Северного морского пути на основе моделей интенсивности отказов: оценка и оптимизация обеспечения инженерной надежности*

Transport and Logistics Infrastructure of the Northern Sea Route based on Failure Rate Models: Assessment and Optimization of Engineering Reliability

О. КОМПАНИЙЦЕВА, Р. ЛАВРОВ

Компанийцева Оксана Вячеславовна, канд. экон. наук, доцент Военно-космической академии (ВКА) имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург). E-mail: oks1@yandex.ru

Лавров Роман Олегович, канд. тех. наук, доцент, заместитель начальника кафедры метрологии ВКА имени А.Ф. Можайского. E-mail: 9432923@mail.ru

***Аннотация.** В статье предложен подход к оценке и оптимизации обеспечения инженерной надежности транспортно-логистической инфраструктуры Северного морского пути в условиях функционирования объектов Арктической зоны Российской Федерации. Сформулированы прямая и обратная задачи оптимизации соотношения «затраты – надежность» и получено их решение методом неопределенных множителей Лагранжа, позволяющее определить согласованные значения параметров надежности элементов и соотнести их с объемом инвестиций. В рамках многоуровневой интерпретации обеспечения надежности введен омниканальный уровень как контур синхронизации экосистемы, характеризующий, в частности, временем переключения на альтернативный канал доставки при сбоях и долей поставок, выполненных без снижения заданного уровня обслуживания при перераспределении потоков. Результаты могут применяться при формировании требований к инженерной надежности элементов инфраструктуры, обосновании решений по резервированию и распределению затрат на обеспечение надежности.*

***Ключевые слова:** Северный морской путь; транспортно-логистическая инфраструктура; инженерная надежность; интенсивность отказов; инвестиции; Арктическая зона Российской Федерации; омниканальный уровень обеспечения надежности.*

***Abstract.** The paper proposes an approach to assessing and optimizing the provision of engineering reliability for the transport and logistics infrastructure of the Northern Sea Route under Arctic operating conditions. Direct and inverse optimization problems are formulated for the “cost–reliability” trade-off and are solved using the Lagrange multipliers method, which yields coordinated estimates of element-level reliability parameters and links them to investment volumes. Within a multi-level interpretation of reliability provision, an omni-channel level is introduced as an ecosystem synchronization contour, characterized, in particular, by the time required to switch to an alternative delivery channel in the event of disruptions and by the share of deliveries completed without reducing the target service level when flows are reallocated. The results may support the specification of engineering reliability requirements for infrastructure elements, substantiation of redundancy decisions, and allocation of expenditures for reliability provision.*

***Keywords:** Northern Sea Route; transport and logistics infrastructure; engineering reliability; failure intensity; investment; Arctic Zone of the Russian Federation; omni-channel reliability provision level.*

Введение

Развитие Арктической зоны Российской Федерации относится к числу приоритетных направлений экономического развития страны. Смещение акцента от обобщенных ориентиров

* Ссылка на статью: Компанийцева О.В., Лавров Р.О. Транспортно-логистическая инфраструктура Северного морского пути на основе моделей интенсивности отказов: оценка и оптимизация обеспечения инженерной надежности // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2026. № 2. С. 35–43. DOI: 10.34773/EU.2026.2.6.

экономической безопасности арктических территорий к обеспечению надежности функционирования Северного морского пути (СМП) предполагает переход к прикладным задачам управления параметрами транспортно-логистической системы. К таким задачам относятся обеспечение непрерывности грузопотоков, поддержание работоспособности критических элементов инфраструктуры, а также повышение результативности использования СМП как альтернативного маршрута, обеспечивающего связь между Азией и Европой. Реализация транзитного потенциала СМП и развитие сопутствующих сервисов в рамках международных транспортных коридоров формируют предпосылки модернизации транспортно-логистической инфраструктуры Арктической зоны и создают условия для структурных изменений в экономике.

Цель статьи – предложить подход к оценке и оптимизации обеспечения инженерной надежности транспортно-логистической инфраструктуры СМП на основе моделей интенсивности отказов и функций стоимости обеспечения надежности при ресурсных ограничениях. Для достижения поставленной цели обосновывается многоуровневая интерпретация обеспечения надежности транспортно-логистической инфраструктуры, формулируются прямая и обратная задачи оптимизации соотношения «затраты – надежность» и приводится расчетная процедура их решения. Дополнительно рассматривается роль резервирования как механизма обеспечения надежности, а также вводится омниканальный уровень обеспечения надежности как контур синхронизации экосистемы и согласования решений по цепи «планирование – исполнение – контроль – корректировка».

Методология научного исследования

Исследование основано на принципах согласованности кросс-отраслевых подходов, предполагающих интеграцию и координацию данных, методов и результатов из различных областей знания для формирования непротиворечивого и целостного представления об объекте.

В рамках исследования использованы: метод тематического структурирования научных источников для выделения уровней обеспечения надежности транспортно-логистической инфраструктуры [1]; инструменты теории надежности для параметризации инженерного уровня через интенсивности отказов и показатели безотказности [9; 10; 15; 16]; методы оптимизационного анализа для постановки прямой и обратной задач при ресурсных ограничениях и получения условий оптимума методом неопределенных множителей Лагранжа. Совокупность примененных методов обеспечивает сопряжение концептуальных положений многоуровневой модели обеспечения надежности с расчетными процедурами оценки и оптимизации инженерного уровня.

Практико-ориентированная направленность исследования, связанная с решением актуальных задач, обуславливает междисциплинарный характер анализа социально-экономического и научно-технического развития. В рамках данного подхода сопоставляются представления о надежности систем в техническом аспекте и подходы к устойчивости функционирования и институциональным условиям развития инфраструктуры в региональном измерении, что позволяет рассматривать обеспечение надежности как инструмент развития производственной базы, сферы услуг и повышения уровня жизни населения.

В ходе исследования решаются задачи формирования и уточнения концептуальных представлений о надежности как категории, применяемой в современных интерпретациях для технических, инженерных и информационных систем, а также для транспортно-логистических, инфраструктурных и институциональных систем в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

Арктический регион рассматривается как открытая система, интегрированная в глобальную логистическую цепочку и выступающая значимым элементом экономической системы Российской Федерации. Методологическая база исследования опирается на системный и практико-ориентированный подходы, а также на положения устойчивого научно-технологического развития региона. В процессе анализа использовались взаимосвязанные методы, включая сравнительно-аналитический метод, примененный для выявления закономерностей в научных подходах к категории надежности систем.

Надежность как научная категория сформировалась в рамках нескольких направлений, различающихся объектом анализа и методическим инструментарием. Базовый уровень составляет нормативно-терминологический подход, в котором закрепляется понятийный аппарат: надежность трактуется как совокупность свойств объекта, проявляющихся во времени и характеризующихся показателями, применимыми для задания требований и сопоставимости результатов исследований [15]. Данный подход задает исходные границы употребления термина «надежность» и обеспечивает единство интерпретаций при переносе категории в прикладные области.

В рамках инженерно-технического направления рассматривается надежность в контексте функционирования сложных технических систем и процессов их жизненного цикла. В рамках данного подхода развиваются методы обеспечения надежности при проектировании и эксплуатации, анализируются механизмы деградации и отказов, а также методы поддержания работоспособности и заданного качества функционирования систем [9; 10; 16].

Информационно-методический подход фокусируется на данных и процедурах оценивания, необходимых для диагностики и прогнозирования надежности. В работах данного направления рассматриваются методы многомодельной обработки измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности, а также подходы к оцениванию точности и состояния метрологических и информационных систем, обеспечивающих надежностно-ориентированное управление [3; 12–14]. Тем самым надежность интерпретируется не только как свойство объекта, но и как результат качества измерений, мониторинга и аналитической поддержки принятия решений.

Отдельный блок исследований связан с теорией высоконадежных систем и развитием ресурсных представлений. В этой группе работ обсуждаются расширенные трактовки ресурса надежности и ресурса работоспособности, вопросы применения гипотезы Н.М. Седякина для высоконадежных систем, а также задачи выбора номинальных параметров элементов по критерию надежности [3; 10; 14]. Данные результаты развивают методические основания для учета долговременных характеристик функционирования и параметрической устойчивости систем.

Перенос категории надежности в область транспортно-логистических и инфраструктурных систем предполагает учет сетевой природы объектов, зависимости результатов от согласованности элементов и наличия ограничений по времени и пропускной способности. В транспортно-логистическом контексте предложена многоуровневая трактовка надежности транспортно-логистической инфраструктуры, включающая инженерный, логистический, инфраструктурный, цифровой уровни и омниканальный уровень обеспечения надежности, связанный с синхронизацией элементов логистической инфраструктуры [1]. Вместе с тем сопоставление перечисленных подходов показывает необходимость уточнения содержания уровней надежности и механизмов их сопряжения применительно к условиям Арктической зоны Российской Федерации и функционированию Северного морского пути с учетом факторов сезонности, ограниченности инфраструктурных резервов и повышенной чувствительности цепей поставок к сбоям [1].

Результаты научного исследования

Концептуальные положения многоуровневой модели обеспечения надежности транспортно-логистической инфраструктуры

В современной научной литературе сохраняется разрозненность методик определения и оценивания надежности как системной концепции, что осложняет сопоставление результатов, полученных для технических, информационных и транспортно-логистических объектов. Дополнительно фиксируется дефицит исследований, ориентированных на сопряжение инженерных и информационных моделей в едином контуре управления, включая интеграцию цифровых платформ, виртуальных копий и моделей искусственного интеллекта для задач предиктивной аналитики, что релевантно территориальному управлению логистикой в арктическом пространстве.

В рамках уточнения авторской позиции предлагается рассматривать обеспечение надежности транспортно-логистической инфраструктуры через призму многоуровневой системы управления, интерпретируемой как иерархическая система, в которой каждый уровень, соотносясь со стратегическим, тактическим и операционным горизонтами, имеет собственные цели, инструменты и набор показателей контроля инфраструктурного обеспечения. На операционном горизонте преобладают методы снижения интенсивности отказов и резервирования, включая подходы к обеспечению безопасности дискретных систем [11]; на тактическом горизонте – согласование ресурсов и мощностей; на стратегическом горизонте – интеграция информации для согласованного принятия решений и контроля результативности системы.

Иерархическая система уровней обеспечения надежности транспортно-логистической инфраструктуры включает:

- уровень обеспечения инженерной надежности;
- уровень обеспечения логистической надежности;
- инфраструктурный уровень обеспечения надежности;
- цифровой уровень: алгоритмическая и платформенная надежность;
- омниканальный уровень обеспечения надежности: синхронизация экосистемы.

Омниканальный уровень обеспечения надежности (в логистической интерпретации – многоканальный/мультимодальный контур) выделяется как надуровневая характеристика, отражающая способность экосистемы СМП поддерживать целевые параметры функционирования при перераспределении потоков между каналами доставки и узлами инфраструктуры. В отличие от цифрового уровня, описывающего надежность алгоритмов и платформ, омниканальный уровень относится к согласованности регламентов взаимодействия участников, приоритизации грузов и синхронизации планов по цепи «планирование – исполнение – контроль – корректировка». Омниканальный уровень проявляется на всех горизонтах управления: на стратегическом – через правила интеграции участников, целевые уровни обслуживания, приоритеты грузов и требования к резервам и связанности сети; на тактическом – через согласование планов перевозок, перевалки и складирования, распределение мощностей узлов, конфигурацию запасов и сценарии переназначения маршрутов; на операционном – через диспетчеризацию и фактическое переключение между каналами доставки и узлами при возникновении сбоев.

Оценивание данного уровня может быть связано, в частности, со временем переключения на альтернативный канал доставки при возникновении сбоя, долей поставок, выполненных без снижения заданного уровня обслуживания при перераспределении потоков, а также с отклонениями «план – факт» на стыках «узел – транспортно-логистический маршрут (плечо) – узел». В условиях Арктической зоны РФ данный уровень определяется ограниченностью окон доступности и необходимостью переключения между каналами доставки без потери заданного уровня обслуживания [1].

***Инженерный уровень обеспечения надежности:
понятийные положения, факторы и структурные модели***

На уровне обеспечения инженерной надежности концепция оценки надежности формируется в рамках операционного уровня обеспечения надежности элементов в техническом и инженерном аспекте – надежности машин, механизмов и транспортных средств, их способности функционировать без отказов в течение заданного времени при установленных условиях эксплуатации.

Надежность сложных систем зависит от совокупности факторов, которые целесообразно классифицировать по области действия. В рамках инженерного уровня выделяются соответствующие классы факторов:

- **технические факторы** (аппаратные и программные характеристики, тактико-технические и эксплуатационно-технические характеристики);
- **системные факторы** (структура системы, режим функционирования, процедуры восстановления, контроль технического состояния, резервирование);

– **человеческие факторы** (эргономические свойства системы «человек – техника – среда», параметры информационной нагрузки и организационные процедуры).

В практике обеспечения надежности можно рассматривать показатель **готовности** – способности объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях в заданный момент или период времени при обеспеченности внешними ресурсами. Показателями готовности выступают коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности и коэффициент технического использования.

Для расчета надежности структурно сложных систем используются структурные схемы надежности, описывающие влияние надежности каждого элемента на надежность системы в целом. В случае, когда отказ каждого элемента приводит к отказу всей системы, структурная схема представляет собой последовательное соединение элементов системы.

На практике применяется введение избыточности. Способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и (или) возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций трактуется как резервирование (рис. 1).

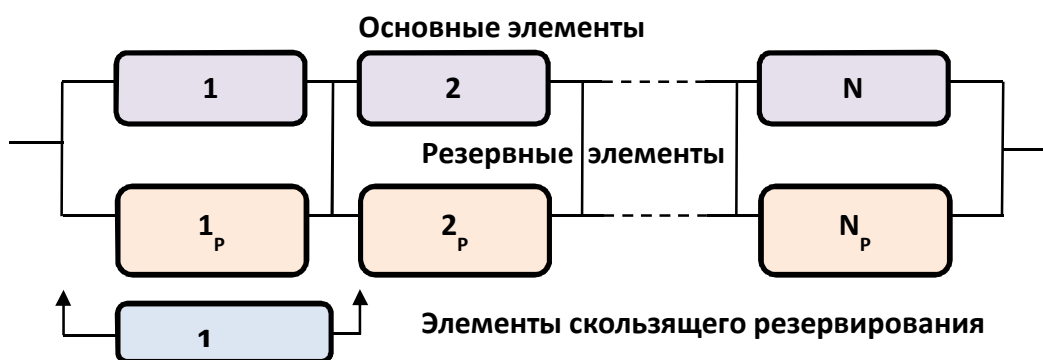


Рис. 1. Структурная схема надежности при резервировании

Виды резервирования соответствуют видам избыточности в системах (структурная, нагрузочная, информационная, функциональная, временная и др.). Структурное резервирование предусматривает использование дополнительных элементов и выделение основных и резервных элементов, предназначенных для обеспечения работоспособности при отказе основных элементов.

**Управляемость параметров надежности через инвестиции:
постановка и решение оптимизационных задач**

Задача синтеза обеспечения надежности функционирования оборудования транспортных логистических компаний сводится к возможности управления параметрами надежности в зависимости от финансовых вложений (инвестиций). Это связано с необходимостью достижения заданного или максимального значения параметров надежности при возможных ограничениях. В качестве примера рассмотрим ограничение по стоимости и решим задачу для двух последовательных элементов оборудования, образующих общий канал оборудования. В данном примере под надежностью понимается одно из ее свойств – безотказность. Зависимость надежности от интенсивности отказов обратная: при увеличении интенсивности отказов надежность снижается.

Приведем пример управляемости параметров надежности путем постановки и решения оптимизационных задач.

Прямая задача. Необходимо обеспечить максимальную надежность канала (минимальное количество отказов) при ограничении на стоимость канала, то есть требуется найти:

$$\sigma = \min \left\{ C_0 - \sum_{i=1}^M C_i : P(\Delta_1, \dots, \Delta_M) \geq P_{\text{зад}} \right\}. \quad (1)$$

Обратная задача. Требуется обеспечить заданную надежность канала (количество отказов) при минимуме его стоимости:

$$C = \min \left\{ P(\Delta_1, \dots, \Delta_M) : \sum_{i=1}^M C_i \leq \sigma_{\text{зад}} \right\}. \quad (2)$$

Обе задачи решаются методом неопределенных множителей Лагранжа (МНМЛ).

Для получения аналитической постановки оптимизационной задачи в терминах инженерной надежности далее используется параметризация через интенсивности отказов элементов λ_1 и λ_2 и функции стоимости $C_1(\lambda_1)$, $C_2(\lambda_2)$. В этой связи ограничения, заданные в (1)-(2) через $P(\Delta_1, \dots, \Delta_M)$ и $\sum_{i=1}^M C_i$, рассматриваются как ограничения на допустимые сочетания λ_1, λ_2 при фиксированном бюджете C_0 (прямая задача) либо при фиксированном целевом уровне надежности (обратная задача). Соответствующая целевая функция в дальнейшем задается через агрегированную характеристику интенсивностей отказов, что приводит к записи функции Лагранжа (3) и условиям оптимума (4)–(5), а для обратной задачи – к функции Лагранжа (6).

Функция Лагранжа имеет вид:

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} + \gamma\{C_0 - (\psi_1(\lambda_1) + \psi_2(\lambda_2))\}. \quad (3)$$

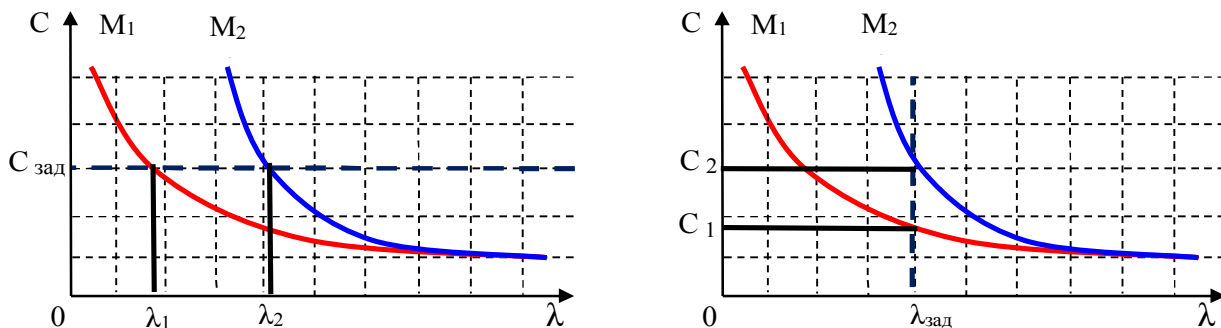
где γ – неопределенный множитель.

Найдем минимум данной функции, для чего возьмем от нее производные:

$$\begin{cases} A(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = \frac{\partial}{\partial \lambda_1} L(\lambda_1, \lambda_2, \gamma), \\ B(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = \frac{\partial}{\partial \lambda_2} L(\lambda_1, \lambda_2, \gamma), \\ C(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = \frac{\partial}{\partial \gamma} L(\lambda_1, \lambda_2, \gamma). \end{cases} \quad (4) \quad \text{Приравняем их к нулю:} \quad (5)$$

$$\begin{cases} A(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = 0, \\ B(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = 0, \\ C(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = 0. \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений может быть получено в аналитическом виде для простых функций, а также численными способами, в том числе с использованием процедур программы MathCad. На основании полученных результатов строятся графики зависимости заданных инвестиций в надежность оборудования от интенсивности отказов (рис. 2а).



а) Графики зависимости инвестиций в надежность оборудования от интенсивности отказов

б) График зависимости стоимости элементов от параметров надежности

Рис. 2 Графики управляемости параметров надежности, путем решения оптимизационных задач

Применим аналогичную процедуру для решения обратной задачи. Пусть задана надежность канала. Требуется обеспечить заданную надежность при минимальной стоимости. Пусть $C_1(\lambda_1) = \psi_1(\lambda_1)$, $C_2(\lambda_2) = \psi_2(\lambda_2)$ – функции зависимости стоимости от уровня надежности. Составим функцию Лагранжа:

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \gamma) = \psi_1(\lambda_1) + \psi_2(\lambda_2) + \gamma\{\lambda_0 - \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}\}. \quad (6)$$

Решая ее методом, описанным выше, получают значения надежности (интенсивности отказов) для каждого модуля. На основании результатов строятся графики зависимости инвестиций в надежность оборудования от заданной интенсивности отказов (рис. 2б).

**Логистический уровень надежности: контуры управления
и показатели выполнения логистических функций**

На логистическом уровне надежность трактуется как способность транспортно-логистической системы обеспечивать выполнение логистических функций (перевозка, перевалка, складирование, снабжение) в требуемом объеме и в установленные сроки при вариативности условий функционирования. По сравнению с инженерным уровнем объект анализа расширяется от отдельных технических элементов к операциям и потокам, а также к механизмам координации [11].

Для решения проблем надежности в логистике применяются методы анализа рисков, имитационное моделирование и системы управления цепочками поставок, что позволяет рассматривать логистическую систему как единую систему с учетом взаимосвязей между элементами и операциями.

**Инфраструктурный, цифровой и омниканальный уровни обеспечения надежности:
согласование решений в рамках единого контура управления**

Инфраструктурный уровень обеспечения надежности связан с функционированием критических объектов транспортно-логистической инфраструктуры и их согласованностью в составе единой сети. На данном уровне надежность определяется не только параметрами отдельных элементов, но и структурной связанностью, пропускными способностями узлов, режимами эксплуатации, а также доступностью инфраструктурных резервов и возможностью перераспределения потоков.

Цифровой уровень (алгоритмическая и платформенная надежность) трактуется как надежность информационных и вычислительных контуров, обеспечивающих мониторинг, планирование и диспетчеризацию транспортно-логистических процессов. В рамках цифровой трансформации эти контуры рассматриваются как инструмент согласования решений между участниками системы и снижения неопределенности за счет повышения наблюдаемости состояния объектов, устойчивости алгоритмов к неполноте данных и отказоустойчивости платформенных компонентов.

Омниканальный уровень обеспечения надежности интерпретируется как синхронизация экосистемы, в которой согласуются решения по цепи «планирование – исполнение – контроль – корректировка» и обеспечивается сопоставимость показателей инженерного, логистического и инфраструктурного уровней в едином контуре управления [1]. В отличие от цифрового уровня, где объектом анализа выступают алгоритмы и платформы, омниканальный уровень относится к согласованности регламентов взаимодействия участников, приоритизации потоков и правилам переключения между каналами доставки и узлами инфраструктуры при возникновении нарушений в работе элементов системы.

Завершающим результатом инженерного подхода является формализованное представление компромисса между ростом надежности и затратами на ее обеспечение, включая использование избыточности (резервирования) как инструмента повышения надежности. Данный тезис иллюстрируется зависимостью стоимости оборудования от резервирования элементов (рис. 3).

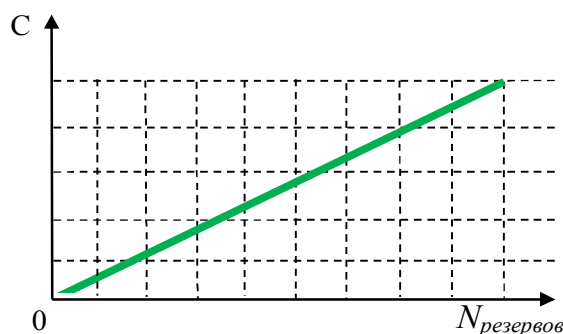


Рис. 3. Зависимость стоимости оборудования от резервирования элементов

Учет роста затрат при наращивании избыточности определяет целесообразность развития методов, ориентированных на повышение диагностируемости и самоконтроля технических средств, используемых в контуре управления надежностью транспортно-логистической инфраструктуры. В качестве направления дальнейших исследований может рассматриваться адаптация методов построения самопроверяемых структур к задачам управления надежностью технических средств и узлов инфраструктуры, включая подходы, основанные на формировании кода под структуру объекта диагностирования [19], подборе весовых коэффициентов [4], применении кодов класса CRC [8], использовании композиций кодов [5] и методах логической коррекции [7]. Возможности внедрения указанных подходов на уровне техники применительно к системе управления надежностью могут быть предметом последующей научной дискуссии [6].

Выводы

1. Сформирована расчетная постановка оценки и оптимизации обеспечения инженерной надежности элементов транспортно-логистической инфраструктуры на основе параметризации через интенсивности отказов λ_1, λ_2 и функции стоимости $C_1(\lambda_1), C_2(\lambda_2)$ при ресурсном ограничении C_0 .

2. Прямая и обратная задачи оптимизации сформулированы в виде ограничений (1)-(2) и согласованы с дальнейшим переходом к аналитическому решению методом неопределенных множителей Лагранжа (4)-(6).

3. Получены условия оптимума (4)-(5) для прямой задачи и функция Лагранжа обратной задачи (6), что обеспечивает определение согласованных значений λ_1 и λ_2 и их увязку с объемом инвестиций (рис. 2).

4. Резервирование элементов рассмотрено как механизм обеспечения инженерной надежности; зависимость затрат от увеличения избыточности иллюстрируется графически (рис. 3), что позволяет учитывать ресурсные ограничения при выборе структурных решений.

5. В рамках многоуровневой интерпретации обеспечения надежности выделен омникальный уровень как контур синхронизации экосистемы, обеспечивающий согласование решений по цепи «планирование – исполнение – контроль – корректировка» и сопоставимость показателей инженерного, логистического и инфраструктурного уровней [1]. В прикладном измерении омникальный уровень может характеризоваться, в частности, временем переключения на альтернативный канал доставки при возникновении сбоя и долей поставок, выполненных без снижения заданного уровня обслуживания при перераспределении потоков.

6. В контексте цифровой трансформации контура управления надежностью обозначено направление дальнейших исследований, связанное с развитием методов повышения диагностируемости и самоконтроля технических средств, включая подходы к построению самопроверяемых структур и кодов [4–8; 19].

Литература

1. Барыкин С.Е., Компанийцева О.В. Генезис теории надежности транспортно-логистической инфраструктуры в контексте устойчивого развития Арктической зоны и Северного морского пути // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27, № 4. С. 94–103. DOI 10.35330/1991-6639-2025-27-4-94-103.

2. Гавзов Д.В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д.В. Гавзов, В.В. Сапожников, В.В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. 1994. № 8. С. 3–50.

3. Дорохов А.Н., Солдатенко В.С. Выбор номинальных значений параметров элементов эталона единицы величины по критерию надежности // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2025. № 697. С. 286–294.

4. Елина Е.И., Ефанов Д.В. Взвешенные коды Боуза–Лина в схемах встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2025. № 1. С. 45–62. DOI 10.31857/S0002338825010047.

5. Ефанов Д.В. Композиции двух равновесных кодов с ортогональными по всем разрядам комбинациями для синтеза самопроверяемых дискретных устройств // Проблемы управления. 2025. № 3. С. 49–62.
6. Ефанов Д.В. Методы синтеза самопроверяемых дискретных устройств. М.: ЛЕНАНД, 2025. 268 с.
7. Ефанов Д.В. Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе логической коррекции сигналов с применением равновесного кода «1 из 3» // Известия Российской Академии наук. Теория и системы управления. 2025. № 5. С. 61–77. DOI 10.31857/S0002338825050052.
8. Ефанов Д.В., Пивоваров Д.В. Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе полиномиальных кодов с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам // Автоматика и телемеханика. 2025. № 5. С. 39–60. DOI 10.7868/S2413977725050036.
9. Исследование вопросов моделирования границ области работоспособности элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов на стадиях создания и эксплуатации / А.Н. Миронов, Е.А. Миронов, О.Л. Шестопалова, С.А. Платонов // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-13. С. 2815–2818.
10. Лавров Р.О. Обобщение понятия ресурса надежности технической системы Н.М. Седякина до ресурса работоспособности живого организма / Р.О. Лавров, В.А. Смагин, С.Ф. Литвиненко // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 54–60. DOI 10.21685/2307-4205-2022-3-7.
11. Лисенков В.М. Статистическая теория безопасности движения поездов. М.: ВИНТИ, 1999. 332 с. ISBN 5-900242-29-3.
12. Ломакин М.И. Многомодельная обработка измерительной информации в интеллектуальных системах прогнозирования надежности космических средств / М.И. Ломакин, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 8–13.
13. Миронов А.Н. Обеспечение качества функционирования системы космического информационного обеспечения на основе оптимального распределения запусков космических аппаратов по элементам системы средств выведения / А.Н. Миронов, Н.П. Сизяков, О.Л. Шестопалова // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2018. № 4(44). С. 7.
14. Миронов Е.А. Разработка моделей процесса эксплуатации оборудования систем связи с учетом старения / Е.А. Миронов, И.В. Мищенко, С.А. Платонов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12, № 6. С. 41–45.
15. Национальный стандарт Российской Федерации (ГОСТ 27.102-2021) «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141>
16. Обеспечение надежности сложных технических систем / А.Н. Миронов, А.Н. Дорохов, В.А. Керножицкий, О.Л. Шестопалова. 3-е изд., стереотипное. Санкт-Петербург: Изд-во «Лань», 2017. 352 с. ISBN 978-5-8114-1108-5.
17. Сапожников Вал. В., Сапожников Влад. В., Ефанов Д.В. Основы теории надежности и технической диагностики. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 588 с. ISBN 978-5-8114-3453-4.
18. Смагин В.А. Информационный подход оценивания точности метрологических систем / В.А. Смагин, Р.О. Лавров, А.И. Пихтов // Информация и космос. 2010. № 1. С. 42–44.
19. Efanov D.V. The Equal-length Redundant Code Development for the Self-checking Combinational Devices Synthesis Based on Data on their Structures // Электронное моделирование. 2022. Vol. 44, No. 1. P. 43–52. DOI 10.15407/emodel.44.01.043.