

УДК: 658.5:658.513

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.15

EDN: LWNRFQ



Обоснование показателей и критериев контроля и оценки качества транспортных сооружений

М.В. Петроченко¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Необходимость повышения надежности, безопасности и экономичности транспортных сооружений требует корректировки существующих подходов к обоснованию показателей и оценке их качества. Основная проблема заключается в стохастичности и нестационарном характере большинства показателей качества, что обусловлено неопределенностью исходных данных при проектировании, строительстве и эксплуатации транспортных сооружений. *Цель работы* заключается в обосновании критериев контроля и оценки качества транспортных сооружений на стадиях жизненного цикла с учетом вероятностной природы показателей качества. *Задачи исследования:* классифицировать показатели качества по группам; определить цели и задачи контроля качества на каждом этапе жизненного цикла; обосновать применение вероятностного подхода, методов скаляризации и теории игр для многопараметрической оценки качества в условиях неопределенности; разработать критерии выбора проектных решений и превентивных мер, обеспечивающих требуемое качество с минимальными совокупными затратами.

Результаты. Для оценки качества на стадиях проектирования и строительства предложен интегральный (обобщенный) показатель с использованием аддитивной/мультипликативной скаляризации рандомизированных частных показателей и их весовых коэффициентов. Для стадии эксплуатации разработана модель обеспечения требуемого качества с учетом оптимизации затрат на превентивные меры и адаптации транспортно-эксплуатационных свойств объекта к увеличению интенсивности движения и параметров транспортной нагрузки; приведены рекомендации по применению критериев Вальда, Сэвиджа, а также критериев минимальных средних затрат и минимума дополнительных затрат на обеспечение качества, устанавливаемого на основе математического аппарата теории игр.

Выводы. Предложенный подход позволяет создать методологическую основу для разработки математических моделей и методов контроля и оценки качества на всех стадиях жизненного цикла транспортных сооружений, что позволит снизить риски наступления аварийных ситуаций, повысить безопасность сооружения и оптимизировать затраты на обеспечение требуемых значений показателей качества с учетом длительных сроков эксплуатации и сложности прогноза условий работы транспортных сооружений.

Ключевые слова: качество, показатель качества, оценка качества, контроль качества, транспортное сооружение

Для цитирования: Петроченко М.В. Обоснование показателей и критериев контроля и оценки качества транспортных сооружений // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 223-237, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.15, EDN: LWNRFQ

Substantiation of indicators and criteria for quality control and assessment of transport facilities

M. V. Petrochenko¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The need to improve the reliability, safety, and cost-efficiency of transport facilities requires revisiting the existing approaches to substantiating quality indicators and assessing their performance. The main challenge lies in the stochastic and non-stationary nature of most quality indicators, which stems from the uncertainty inherent in the initial data during the design, construction, and operation of transport facilities. *The objective of this work* is to substantiate the criteria for quality control and assessment of transport facilities over their life-cycle stages, taking into account the probabilistic nature of quality indicators. *The research tasks include:* classifying quality indicators into groups; defining the goals and objectives of quality control at each life-cycle stage; substantiating the application of a probabilistic approach, scalarization methods, and game theory for multi-parameter quality assessment under uncertainty; and developing criteria for selecting design solutions and preventive measures that ensure the required quality at minimal total cost.

Results. For quality assessment at the design and construction stages, an integral (generalized) indicator is proposed, based on additive/multiplicative scalarization of randomized partial indicators and their weight coefficients. For the operation stage, a model is developed to ensure the required quality by optimizing the cost of preventive measures and adapting the transport-operational properties of the facility to increasing traffic intensity and load parameters. Recommendations are given for the application of Wald's criterion, Savage's criterion, as well as criteria of minimum average cost and minimum additional cost for quality assurance, established using the mathematical framework of game theory. *Conclusions.* The proposed approach provides a methodological foundation for developing mathematical models and methods of quality control and assessment at all life-cycle stages of transport facilities. This will reduce the risks of emergencies, enhance structural safety, and optimize the costs required to achieve the prescribed quality indicators, given the long service life and the complexity of predicting the operating conditions of transport facilities.

Keywords: quality, quality indicator, quality assessment, quality control, transport facility

For citation: Petrochenko M.V. Substantiation of indicators and criteria for quality control and assessment of transport facilities // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 223-237, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.15, EDN: LWNRFQ

1. Введение

Обоснование показателей и критериев оценки качества транспортных сооружений является одним из центральных вопросов создания необходимых условий для безопасного и комфортного движения транспортных средств, повышения мобильности населения, снижения рисков преждевременного разрушения [1, 2], транспортных аварий [3], экологического загрязнения и других негативных последствий неудовлетворительного состояния объектов транспортного строительства [4, 5].

Исходным пунктом установления показателей и критериев качества транспортных сооружений является определение сущности этого термина. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных квалиметрии объектов и процессов в строительстве, однозначного определения термина «качество транспортного сооружения» не существует. Вопреки тому, что смысл этого понятия является интуитивно ясным, дать ему строгое определение достаточно нелегко. В большинстве случаев качество транспортных сооружений и, в том числе автомобильных дорог, отождествляется сопоставлением их транспортно-эксплуатационных свойств с

нормативными значениями¹. Однако такой подход не соответствует сути этого термина. Соответствие действующей норме далеко не всегда означает высокий уровень качества [6]. Наряду с повышающимися требованиями к потребительским свойствам дороги (безопасность, обеспечиваемая скорость движения, уровень дорожного сервиса), это связано с несвоевременностью актуализации нормативной базы и обоснованностью перечня самих нормативов в условиях роста уровня автомобилизации населения, а также совершенствования эксплуатационных характеристик автомобильной техники. Исходя из этого оценка качества транспортных сооружений должна быть реализована через показатели потребительских свойств, которые определяются их техническими характеристиками и геометрическими параметрами, фактическим уровнем содержания, инженерным оборудованием и обустройством [7, 8]. Потребительские свойства определяют требования к нормативам, а также основные цели и задачи контроля и оценки качества [9-11], представленные в табл. 1.

Таблица 1

Цели и задачи контроля и оценки качества на стадиях жизненного цикла

Стадии жизненного цикла	Цели контроля и оценки качества	Основные задачи контроля и оценки качества
Проектирование	Обеспечение качества проектной документации	Проверка проектных решений на соответствие нормам, стандартам и техническому заданию
		Предотвращение дефектов проектных решений
Строительство	Контроль соответствия выполненных работ проекту	Проверка соответствия выполненных работ проекту
		Проверка объемов выполненных работ
		Проверка соответствия применяемых материалов, изделий, конструкций, оборудования
	Обеспечение безопасности и надежности сооружения	Операционный контроль
		Лабораторный контроль
		Приемочный контроль
		Инспекционный контроль
		Контроль исполнительной документации
Эксплуатация	Обеспечение работоспособности сооружения	Проверка качества выполняемых работ и соблюдения технологии производства работ
		Входной контроль материалов, изделий, конструкций, оборудования
	Обеспечение безопасности, срока службы и эффективности использования	Мониторинг состояния конструкций (регулярные осмотры, диагностика).
		Контроль устранения неисправностей.

Основываясь на функциональном назначении транспортных сооружений, их качество можно и необходимо рассматривать как совокупность транспортно-эксплуатационных свойств, характеризующих степень фактического соответствия комплекса показателей технического уровня, эксплуатационного состояния, инженерного оборудования, обустройства и содержания сооружения потребностям участников транспортных процессов и установленным нормативам [12]. Общие признаки классификации и основные показатели качества транспортных сооружений приведены на рис. 1.

¹ ОДМ 218.4.031-2016 «Рекомендации по организации и проведению ведомственного контроля (мониторинга) качества при выполнении дорожных работ на автомобильных дорогах общего пользования федерального значения»

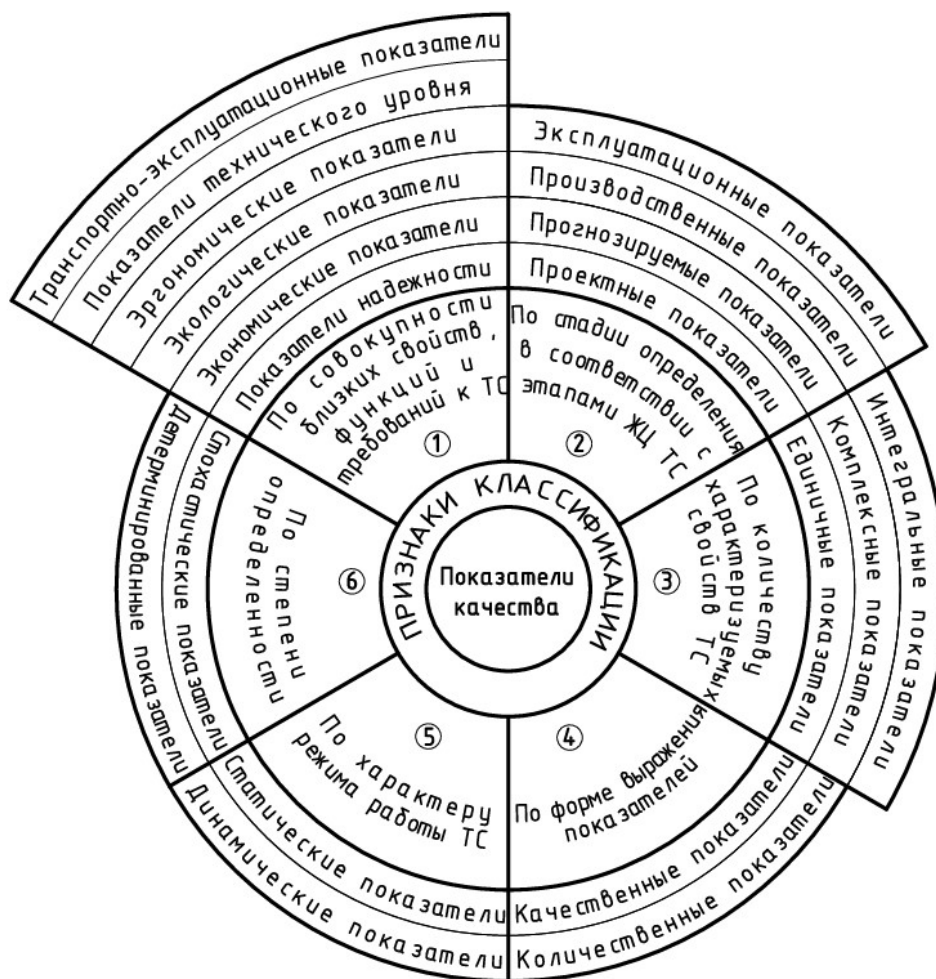


Рис. 1. Основные показатели качества транспортных сооружений
(иллюстрация автора)

Fig. 1. Key indicators of the quality of transport facilities (illustration by the author)

В транспортном строительстве решающее значение для обеспечения высокого качества возведенного и введенного в эксплуатацию транспортного сооружения имеет создание эффективной системы контроля качества [13]. Действующая в отрасли система контроля качества не в полной мере обеспечивает соответствие транспортных сооружений требованиям к их долговечности и требует совершенствования не только в части организации строительного контроля, но и в применении методов технической диагностики на основе технологий искусственного интеллекта [14-16]. Эффективной будет такая система контроля, которая установит причины возникновения отклонений от нормативных требований, проанализирует их и оперативно выдаст рекомендации по их устранению [17-19].

Необходимо отметить, что перечень показателей, приведенных на рис. 1, характерен не только для объектов транспортного строительства, но и многих других строительных объектов [20]. Однако методы их количественной оценки требуют учета особенностей проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений. В связи с этим необходим более детальный анализ рассматриваемых показателей для их количественного эквивалентирования и синтеза интегрального критерия качества с учетом стадий жизненного цикла транспортных сооружений.

Важнейшими свойствами (по первому признаку классификации), определяющими качество транспортных сооружений, является их безопасность и надежность. Применительно к транспортным сооружениям наиболее значимыми являются механическая, пожарная и экологическая безопасность.

Под *механической безопасностью транспортного сооружения*² принято понимать состояние конструктивных элементов сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью потребителей транспортных услуг, имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений вследствие разрушения или потери устойчивости сооружения. Под *пожарной безопасностью транспортного сооружения*³ следует понимать состояние сооружения, характеризующее возможность предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на потребителей транспортных услуг и имущество опасных факторов пожара. Под *экологической безопасностью*⁴ понимается защищенность прилегающей территории и окружающей среды от негативного воздействия строительства транспортных сооружений и их эксплуатации, последствий дорожно-транспортных происшествий, аварий и катастроф.

Рассмотрим классификацию основных показателей качества по первому признаку на примере автомобильной дороги [21, 22]. К транспортно-эксплуатационным показателям относятся такие показатели качества, как интенсивность транспортного потока, транспортно-эксплуатационное состояние автомобильной дороги, состав транспортного потока, средняя скорость транспортного потока, пропускная способность автомобильной дороги, коэффициент безопасности для различных участков автомобильной дороги, относительная аварийность для различных участков автомобильной дороги, обеспеченность видимости на автомобильной дороге, показатель инженерного оборудования и обустройства, уровень содержания автомобильной дороги. Экологические показатели включают следующие показатели качества: уровень транспортного шума на участке автомобильной дороги, уровень загрязнения атмосферного воздуха на участке автомобильной дороги. Группа экономических показателей состоит из сметной стоимости строительства транспортного сооружения, чистого дисконтированного дохода от строительства транспортного сооружения, индекса доходности инвестиций при строительстве транспортного сооружения, внутренней нормы доходности от эксплуатации транспортного сооружения, срока окупаемости проекта и материалоемкости. К проектным показателям можно отнести уровень качества проекта и уровень квалификации специалистов проектной организации. Производственные показатели состоят из стабильности и точности технологических процессов, уровня обеспеченности материалами требуемого качества в установленные сроки. Эксплуатационные показатели включают стабильность и точность технологических процессов, уровень обеспеченности материалами требуемого качества в установленные сроки, уровень технического состояния, уровень автоматизации мониторинга технического состояния, квалификацию персонала.

Группы показателей технического уровня и надежности представлены более подробно. Наименование показателей качеств этих групп и их содержательная характеристика приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что качество транспортных сооружений имеет вероятностный и нестационарный характер, поскольку большинство его показателей являются случайными величинами. Во многом стохастичность и динамика рассматриваемых показателей качества объективно обусловлены особенностями проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений [23, 24]:

1. Проектирование транспортных сооружений, как линейно протяженных объектов, сопряжено с отсутствием достаточной полноты и достоверности исходных данных не только в связи с изменчивостью в границах объекта строительства грунтово-геологических и гидрометрических условий, но и сложностью прогнозирования динамики параметров интенсивности и состава транспортного потока при нормативных сроках эксплуатации от 20 до 100 и более лет⁵ [25].

² №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

³ №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»

⁴ №7-ФЗ «Об охране окружающей среды»

⁵ ГОСТ 33178-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Классификация мостов»

2. Полный цикл транспортного строительства характеризуется множеством проектных и производственных процессов, выполняемых с использованием большого количества строительных и дорожных машин и механизмов, обеспечивающих разный уровень стабильности и точности технологических процессов; применением разнообразной номенклатуры строительных материалов, изделий и конструкций, имеющих вариативные физико-механические характеристики; неоднородностью уровня профессиональной подготовленности специалистов [26]. В связи с этим для оценки качества транспортных сооружений необходимо применение системы частных показателей с учетом их взаимосвязей, случайной природы и изменений во времени.

3. В целях обеспечения надежности и безопасности транспортных сооружений необходимо применение широкой номенклатуры материалов с требуемыми показателями качества, включая их стоимость. Решение этой задачи требует разработки специальных моделей и методов оценки качества, учитывающих выполнение сроков доставки дорожно-строительных материалов необходимой номенклатуры и качества на объекты, а также ограничения на финансирование. С учетом этих обстоятельств необходимо оценивать стоимость единица качества дорожно-строительных материалов и конструкций.

4. Сложность прогнозирования условий строительства и эксплуатации транспортных сооружений является причиной повышенного риска несвоевременного ввода объекта в эксплуатацию, что требует разработки критериев и методов контроля сроков и качества выполнения работ по строительству и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры [27]. Допустимые отклонения показателей качества выполнения работ должны включать не только сроки их завершения, но и расход ресурсов, транспортно-эксплуатационные показатели, долговечность, экологичность и др. [28].

Таблица 2

Содержательная характеристика показателей качества транспортных сооружений

Группа показателей качества	Наименование показателя качества	Содержательная характеристика показателя качества	Ед. изм.
Показатели технического уровня	Объем транспортной работы	суммарная масса перевозимых грузов и транспортных средств, проходящих по данному участку дороги в обоих направлениях в единицу времени	т/год или т/сут
	Уровень технико-эксплуатационного состояния	прочность дорожной одежды, ровность, шероховатость и сцепные качества дорожного покрытия, устойчивость земляного полотна и т.д.	-
	Степень пригодности транспортного сооружения	степень соответствия параметров и характеристик конструкций и материалов сооружения требованиям нормативных документов в условиях воздействия нагрузок и агрессивной окружающей среды	-
Показатели надежности	Безотказность	свойство транспортного сооружения сохранять свои выходные параметры в допустимых пределах, закладываемое на стадии проектирования	-
	Надежность	свойство транспортного сооружения сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации транспортного сооружения	-
	Срок службы	календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации транспортного сооружения или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние	год
	Ремонтопригодность	свойство транспортного сооружения, определяющее его приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения работ по содержанию и ремонту	-

Таким образом основная проблема заключается в стохастичности и нестационарном характере большинства показателей качества, что обусловлено неопределенностью исходных данных при проектировании, строительстве и эксплуатации транспортных сооружений. Целью данной работы является обоснование критериев контроля и оценки качества транспортных сооружений на стадиях жизненного цикла с учетом вероятностной природы показателей качества. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: классифицировать показатели качества по группам; определить цели и задачи контроля качества на каждом этапе жизненного цикла; обосновать применение вероятностного подхода, методов скаляризации и теории игр для многопараметрической оценки качества в условиях неопределенности; разработать критерии выбора проектных решений и превентивных мер, обеспечивающих требуемое качество с минимальными совокупными затратами.

2. Материалы и методы

Вероятностная природа показателей объясняется неоднозначностью и неопределенностью (интервальным характером) данных для проектирования транспортных объектов, условий их строительства и эксплуатации. Это касается не только инженерных изысканий, но и физико-механических характеристик материалов, точности и стабильности технологических процессов строительства и эксплуатации, прогнозирования параметров расчетных нагрузок, интенсивности и состава транспортных потоков, потребности в ресурсах, а также нестабильности финансирования работ. В связи с этим технические и технологические решения на проектирование, строительство и эксплуатацию транспортных сооружений с теми или иными значениями показателей качества приходится принимать в условиях производственно-технологической и экономической неопределенности. При этом многопараметрическая оценка качества транспортных сооружений должна учитывать как фактические значения показателей качества проектов, материалов и технологических процессов при проектировании и строительстве, так и требуемые значения транспортно-эксплуатационных показателей при эксплуатации в прогнозном периоде.

Для решения задачи возможно последовательное применение двух групп методов. На стадии проектирования и строительства оценка качества может быть выполнена с достаточной степенью объективности методом построения интегрального (обобщенного) показателя качества посредством аддитивной или мультипликативной скаляризации векторных оценок в условиях неопределенности. В данном случае сравнение m -вариантов проектов транспортных сооружений по уровню их качества сводится к процедуре моделирования байесовской неопределенности [29] и установлению лучшего варианта по статистическим характеристикам обобщенного показателя качества:

$$Q_j = f(\alpha_i, q_{ij}, \varphi_{ij}) \text{ при } j = 1, \dots, m \text{ и } i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

где α_i – вектор случайных значений весовых коэффициентов частных показателей качества; q_{ij} – вектор случайных значений нормированных частных показателей качества; φ_{ij} – функция скаляризации частных показателей качества в обобщенный (аддитивная, мультипликативная).

В качестве статистических характеристик можно использовать математическое ожидание обобщенного показателя Q_j или значение вероятности превышения уровня качества j -го варианта над m -м, то есть $P(Q_j > Q_k)$. Следует отметить, что наиболее сложным в данном подходе является выбор способа определения весовых коэффициентов. Расчет их значений с заданной точностью можно осуществить с применением метода моделирования весовых коэффициентов, изложенного в [30 – 32]. В месте с тем следует отметить, что в работе [33] изложен способ расчета весовых коэффициентов с учетом их случайной природы, изменений во времени и неполной определенности. Такие ситуации наиболее характерны для квалиметрии транспортных сооружений на разных стадиях их жизненного цикла.

Что касается обеспечения требуемого качества и его повышения в период эксплуатации, то реализация таких мер требует дополнительных затрат ресурсов. В особенности это касается показателей безопасности, надежности и функционального назначения транспортных сооружений, которые являются определяющими для объектов транспортного строительства при угрозе аварий и катастроф от природно-климатических и техногенных факторов, а также из-за воздействия на конструкции агрессивных сред и увеличивающихся за время эксплуатации нагрузок транспортного потока.

С другой стороны, превентивные меры по обеспечению определяющих показателей качества транспортных сооружений позволяют избежать дополнительных затрат на выполнение работ в процессе содержания, ремонта и реконструкции.

Представим общие затраты на обеспечение качества транспортного сооружения в виде выражения:

$$C = C_0 + C_k, \quad (2)$$

где C_0 – затраты на предупредительные мероприятия по обеспечению требуемого качества транспортного сооружения в соответствии с первоначальным проектом; C_k – затраты на адаптацию, возникающие при изменении исходных условий в процессе проектирования, строительства и эксплуатации и требующие дополнительных мер по поддержанию требуемого качества транспортного сооружения.

Как показано на рис. 2, дополнительные первоначальные затраты ΔC_0 (например на повышение несущей способности балок пролетного строения мостового сооружения для предотвращения обрушений по причине прогнозируемого увеличения массогабаритных характеристик нагрузок) позволяют достичь более высокого качества сооружения и одновременно сократить эксплуатационные затраты на величину C_k .

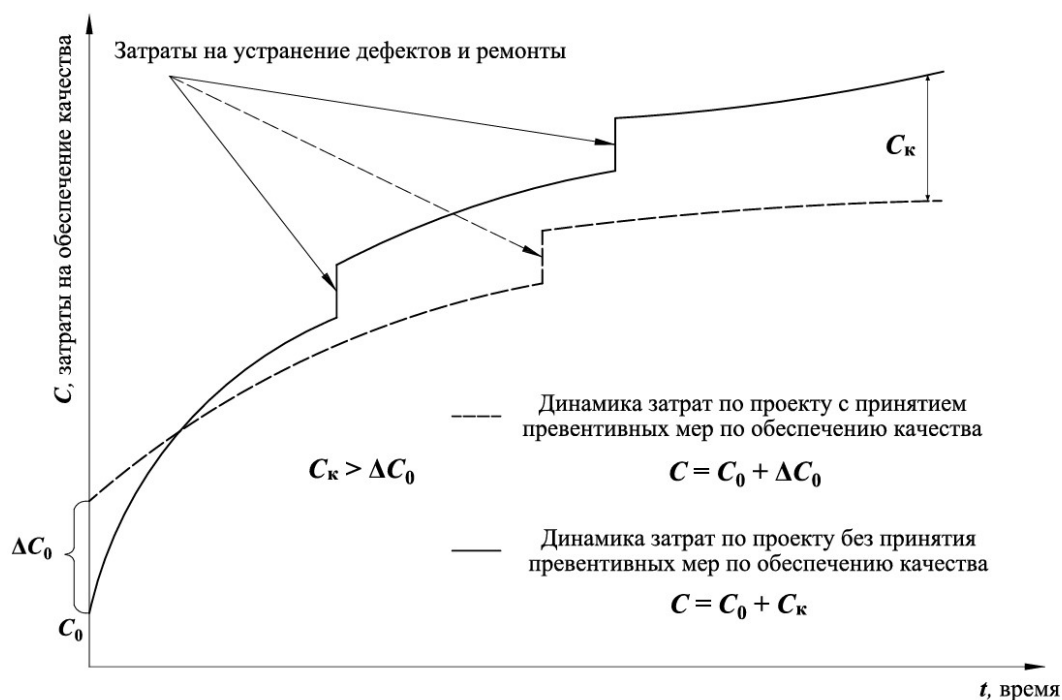


Рис. 2. Зависимость затрат от времени принятия решений на обеспечение требуемого качества транспортных сооружений (иллюстрация автора)

Fig. 2. Dependence of costs on the timing of decisions to ensure the required quality of transport facilities (illustration by the author)

Начало координат на рис. 2 принято за момент начала эксплуатации транспортного сооружения. Анализ графика показывает, что с помощью дополнительных первоначальных затрат можно избежать ремонтно-восстановительных работ и снизить затраты на устранение последствий разрушений во время эксплуатации транспортного сооружения.

Экономическая целесообразность реализации превентивных мер по обеспечению качества определяется соотношением затрат и результатов. Критерием экономической оправданности превентивных мер выступает соотношение $\Delta C_0 \leq C_k$, где ΔC_0 – дополнительные первоначальные затраты на обеспечение показателей качества (направлены на предотвращение разрушений, создание резерва пропускной способности и грузоподъемности); C_k – сокращение расходов на ремонтно-восстановительные работы, реконструкцию и компенсацию социально-экономических ущербов.

Рассмотренный подход к обеспечению требуемых показателей качества транспортных сооружений справедлив только для детерминированных условий, когда характер функционирования сооружения заранее известен. Проектные решения, полученные на его основе, сохраняют рациональность лишь в рамках тех условий, для которых они разработаны. Изменение условий эксплуатации транспортного сооружения может привести к несоответствию выбранного решения требованиям по качеству.

3. Результаты и обсуждение

На практике неполнота и неопределенность исходных данных не позволяют достоверно прогнозировать реальные условия $(m_1, m_2, \dots, m_n)$ эксплуатации транспортных сооружений. Наибольшую неопределенность создают сложность прогноза интенсивности и состава движения, воздействия природно-климатического и техногенного характера, что создает риск принятия технического или технологического решения, которое при реальной эксплуатации не сможет обеспечить требуемого уровня качества.

При такой неопределенности для обеспечения качества транспортных сооружений целесообразно использовать математический аппарат теории игр [34], реализуемый посредством построения и последующего анализа платежных матриц (табл. 3).

Таблица 3

Дополнительные затраты на выполнение мероприятий по обеспечению требуемого качества транспортных сооружений при изменении условий их работы

Варианты проектных решений	Группы условий проектирования, строительства и эксплуатации (m_1, m_2, m_3) транспортного сооружения и соответствующие им затраты, млн. руб.			Средние затраты, млн. руб.
	m_1	m_2	m_3	
X_1	[700] / 0	800 / 50	850 / 50	785
X_2	850 / 150	[750] / 0	900 / 100	835
X_3	950 / 250	850 / 100	[800] / 0	805

В рассматриваемом случае выделяются три группы условий, характеризующие этапы жизненного цикла транспортного сооружения: проектирование, строительство и эксплуатации. Каждый вариант является оптимальным только для одной группы условий. Это группа исходных данных, для которых проектировался и был построен данный объект ($m_1 \rightarrow X_1; m_2 \rightarrow X_2; m_3 \rightarrow X_3$). В ячейках таблицы данные в числителе соответствуют затратам, необходимым для обеспечения требуемого качества работы варианта транспортного сооружения при наступлении соответствующей группы условий эксплуатации. В знаменателе приведены дополнительные затраты на обеспечение требуемого качества работы по сравнению с теми условиями, для которых проектировался вариант. Например, затраты на обеспечение требуемого качества варианта X_1 в условиях m_1 составляют 700 млн. руб. При наступлении группы условий m_2 эти затраты будут 800 млн. руб., что на 50 млн. руб. больше, чем у варианта X_2 , который является оптимальным для группы условий m_2 .

В действительности каждому из вариантов проектных решений (X_1, X_2, X_3) присущи не один, а несколько показателей затрат, соответствующих наступлению той

или иной группы условий эксплуатации. При известных вероятностях наступления каждой из групп условий (P_1, P_2, P_3) более предпочтительный вариант выбирается с использованием следующей зависимости:

$$\min_X C_X = \sum_{m=1}^n P_m C_X^m, \quad (3)$$

где C_X – прогнозируемые затраты на обеспечение качества транспортного сооружения по варианту X при возможном множестве условий его эксплуатации ($m_1, m_2, \dots, m_n$); P_m – вероятность события, при котором наступает m -ая группы условий эксплуатации; C_X^m – затраты на обеспечение качества варианта транспортного сооружения X в m -ой группе условий эксплуатации.

В случае неопределенности условий проектирования, строительства и эксплуатации транспортного сооружения, применение принципа максимума энтропии делает обоснованным допущение о равновероятности всех рассматриваемых групп условий ($m_1, m_2, \dots, m_n$). При таком допущении критерий выбора варианта, гарантирующего требуемый уровень качества, вычисляется по формуле:

$$\min_X C_X = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n C_X^m. \quad (4)$$

Данный критерий позволяет выбрать вариант, характеризующийся минимальными средними затратами на обеспечение требуемого качества. Вместе с тем, при наличии рисков воздействия природно-климатических и техногенных факторов, а также в целях предотвращения аварий, обусловленных превышением фактических параметров по сравнению с нормативными значениями, возникает необходимость в дополнительной защите от наиболее неблагоприятных сценариев и минимизации потенциальных социально-экономических ущербов.

В теории принятия решений в условиях неопределенности [35] для решения подобных задач применяются следующие критерии:

- пессимистический максиминный критерий (критерий Вальда), в соответствии с которым в табл. 3 лучшим является вариант X_1 , обеспечивающий минимум максимальных затрат;
- критерий минимальной величины риска наибольших дополнительных затрат на обеспечение требуемого качества (минимаксный риск Сэвиджа) позволяет выбрать решение на основе оценки перерасхода затрат. Критерий обеспечивает выбор варианта с минимальным перерасходом дополнительных затрат в наиболее неблагоприятных условиях работы транспортного сооружения;
- цена игры, соответствующая минимальному гарантированному риску перерасхода дополнительных затрат на обеспечение качества транспортного сооружения λ_x^m . В этом случае игра сводится к решению задачи линейного программирования, математическая постановка которой заключается в следующем.

Пусть процедура выбора варианта проекта транспортного сооружения задана платежной матрицей размерностью $m \times n$, где m – число групп условий функционирования транспортных сооружений, а n – число вариантов проекта. Элементы матрицы соответствуют затратам на приспособление варианта проекта к условиям, отличающимся от тех, для которых этот вариант разрабатывался. Требуется выбрать вариант проекта, имеющий наименьшие затраты при неопределенности наступлении любой из возможных групп условий.

В этом случае целевая функция и ограничения задачи могут быть представлены в виде

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^n y_m / \sum_{m=1}^n \lambda_x^m y_m \geq 1; y_m \geq 0 \right\}, \quad (5)$$

а оптимальная стратегия выбора проекта определена следующим образом

$$X_{r, \text{опт}} = \sum_{r=1}^n y_r X_r, \quad (6)$$

где y_r – элементы двойственного симплекс-метода, показывающие значимость каждого варианта.

4. Заключение

Таким образом, при обосновании показателей качества необходимо учитывать цели и условия проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений. Однако с учетом их длительных сроков эксплуатации и сложностью прогноза требуемых значений транспортно-эксплуатационных показателей необходимо развитие методов многопараметрической оценки качества транспортных сооружений, учитывающих стохастические и динамические аспекты частных показателей качества и их взаимосвязи. При этом следует исходить из состояния нормативной базы технического регулирования дорожной деятельности; требований стандартов на применяемые строительные материалы, смеси, изделия и конструкции с учетом допускаемой вариабельности их физико-механических характеристик; уровня профессиональной подготовленности специалистов, задействованных при проектировании и в технологических процессах строительства; технического состояния дорожно-строительной техники; применения современных технологий строительного производства. На каждом этапе жизненного цикла и в ходе реализации действий на этапах могут применяться свои показатели оценки качества. Общая оценка качества должна сводиться к обобщению этих показателей с точки зрения их влияния на безопасность, функциональность, надежность и экологичность. Необходим универсальный обобщенный показатель качества, в роли которого может быть принят критерий минимума общего перерасхода затрат, возникающих из-за неопределенности условий проектирования, строительства и эксплуатации транспортных сооружений и невыполнения превентивных мероприятий по обеспечению требуемого качества. В совокупности с обоснованием содержания понятия «качество транспортного сооружения», формированием перечня его показателей и признаков их классификации, выявлением соотношения между качеством и затратами на его обеспечение в условиях неопределенности производственно-технологических и экономических факторов транспортного строительства, этот критерий составляет методологическую основу для разработки математических моделей и методов контроля и оценки качества при проектировании, строительстве и эксплуатации транспортных сооружений.

Список литературы/ References

1. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путь навигатор. 2022. № 50(76). С. 30–41. EDN: LNFPKN
Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Averyanov D.A. Simulation Modeling of Road Structure Failure Risk During Inter-Repair Period // Route navigator. 2022. No. 50(76). P. 30–41. EDN: LNFPKN
2. Al-Masaeid H, Assolie A., Al Migdady A. Effect of Pavement Conditions on Urban Road Accidents // Jordan Journal of Civil Engineering. 2025. Vol. 19. No. 1. P. 74–85. DOI: 10.14525/JJCE.v19i1.06
3. Васин С.А., Веревкина О.И., Яицков И.А. Совершенствование методики оценки рисков функциональной безопасности и надежности для управления качеством на инфраструктурных объектах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 144–154. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-144-154. EDN: TFUSHV
Vasin S.A., Verevkina O.I., Yaitskov I.A. Improving the Procedure for Assessing Functional Safety and Reliability Risks for Quality Management at Infrastructure Facilities. Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2023. Vol. 21. No. 3. P. 144–154. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-144-154. EDN: TFUSHV
4. Мошков В.Б., Цховребов Э.С., Калаева С.З.К., Королева Л.А. Анализ нарушений

- экологических требований на автомобильных дорогах, приводящих к угрозам возникновения чрезвычайных ситуаций // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 1(110). С. 86–92. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-11. EDN: JNJWFM
- Moshkov V.B., Tskhovrebov E.S., Kalaeva S.Z.K., Koroleva L.A. Analysis of environmental compliance violations on roads causing threats of emergencies occurrence. *World of Transport and Transportation*. 2024. Vol. 22. No. 1(110). P. 230–236. DOI: 10.30932/1992-3252-2024-22-1-11. EDN: JNJWFM
5. Eidsvig U., Santamaría M., Galvão N., Tanasic N., Piciullo L., Hajdin R., Nadim F., Sousa H.S., Matos J. Risk Assessment of Terrestrial Transportation Infrastructures Exposed to Extreme Events // *Infrastructures*. 2021. Vol. 6. No. 11. P. 163. DOI: 10.3390/infrastructures6110163
6. Веселов В.В. Безопасная эксплуатация зданий и сооружений на транспорте // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. Вып. 1. С. 161–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171
- Veselov V.V. Safe Operation of Buildings and Structures on Transport // *News of Petersburg Transport University*. 2023. Vol. 20. No. 1. P. 161–171. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-161-171
7. Patel C.S., Pitroda J.R. Quality management system in construction: a review // *Reliability: theory & applications*. 2021. Vol. 16 (SI 1 (60)). P. 121–131. DOI: 10.24412/1932-2321-2021-160-121-131
8. Tanasić N., Blumenfeld T., Hajdin R., Schiffmann F. A framework for management of transportation infrastructure based on key performance indicators. *ce/papers*. 2023. Vol. 6. No. 5. P. 1214–1220. DOI: 10.1002/cepa.2134
9. Родионов П.Ю., Михальченко О.Ю. Анализ влияния нарушений, выявляемых при строительном контроле, на ключевые параметры реализации проектов капитального строительства // Труды НГАСУ. 2025. Т. 28. № 2(96). С. 88–106. DOI: 10.32683/1815-5987-2025-28-96-2-88-106
- Rodionov P.Yu., Mikhachenko O.Yu. Analysis of the violations' impact detected during construction control on the key parameters of capital construction projects' implementation // *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2025. Vol. 28. No. 2(96). P. 88–106. DOI: 10.32683/1815-5987-2025-28-96-2-88-106
10. Мальцев А.Б. Контроль качества проектной деятельности в строительстве // Вестник науки. 2023. Т. 3. № 11(68). С. 956–967. EDN: MRVJHH
- Maltsev A.B. Quality control of project activities in construction // *Bulletin of Science*. 2023. Vol. 3. No. 11(68). P. 956–967. EDN: MRVJHH
11. Алиулова В.А., Петроченко М.В. Оценка качества проектной документации повторного использования // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 730–740. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.730-740
- Aliulova V.A., Petrochenko M.V. The quality assessment of reusable project documentation // *Bulletin of MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021. Vol. 16. No. 6. P. 730–740. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.730-740
12. Клюев С.В., Слободчикова Н.А. Метод оценки состояния автомобильных дорог // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 4(61). С. 139–150. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-4/139-150
- Klyuev S.V., Slobodchikova N.A. The method of assessing the condition of roads // *FEFU: Bulletin of School of Engineering of Far East Federal University*. 2024. No. 4(61). P. 139–150. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-4/139-150
13. Мартинсон В.Л., Быстров Н.В. Основные этапы развития строительного контроля в сфере дорожного хозяйства Российской Федерации // Дороги и мосты. 2022. № 1(47). С. 11–35. EDN: NWTKYZ
- Martinson V.L., Bystrov N.V. Main Development Stages of Construction Control in Road Sector of The Russian Federation // *Roads and bridges*. 2022. No. 1(47). P. 11–35. EDN: NWTKYZ
14. Севастьянов П.Д., Казаков А.В., Матвеева М.В., Пешков А.В. Развитие систем

- автоматизированного управления на этапе строительства (на примере линейных объектов) // Известия вузов. Строительство. 2023. Т. 13. № 2(45). С. 324–335. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-324-335. EDN: LKQVDG
- Sevastyanov P.D., Kazakov A.V., Matveeva M.V., Peshkov A.V. Development of automated control systems at the construction stage (using the example of linear objects) // News of Universities. Construction. 2023. Vol. 13. No. 2(45). P. 324–335. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-2-324-335. EDN: LKQVDG
15. Junlin Heng, You Dong, Li Lai, Zhixiang Zhou, Dan M. Frangopol. Digital twins–boosted intelligent maintenance of ageing bridge hangers exposed to coupled corrosion–fatigue deterioration // Automation in Construction. 2024. Vol. 167, 105697. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105697
16. Wolf P., Vierling A., Husemann J., Berns K., Decker P. Extending skills of autonomous off-road robots on the example of behavior-based edge compaction in a road construction scenario // Commercial Vehicle Technology 2020/2021: Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2021. DOI:10.1007/978-3-65829717-6_5
17. Каимов Е.В. Совершенствование научно-технического сопровождения, мониторинга и контроля производства работ по устройству линейного транспортного сооружения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 2(70). С. 120–128. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).120-128
- Kaimov E.V. Improvement of scientific and technical support, monitoring and work production control on the arrangement of a linear transportation facility // Modern Technologies. System Analysis. Modeling. 2021. No. 2(70). P. 120–128. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).120-128
18. Панфилов А.В., Бахтеев О.А., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 2. С. 19–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-19-29
- Panfilov A.V., Bakhteev O.A., Deryushev V.V., Korotkiy A.A. Adaptive remote monitoring and control system for the operation of hazardous facilities based on a risk-based approach // Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020. No. 2. P. 19–29. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-19-29
19. Villa V., Gioberti L., Domaneschi M., Catbas N. Conceptual Advancements in Infrastructure Maintenance and Management Using Smart Contracts: Reducing Costs and Improving Resilience. Buildings, 2025, 15, 680. DOI: 10.3390/buildings15050680
20. Маилян Л.Д., Сизен Н.О. Оценка показателей качества в строительстве // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21. № 3(97). С. 464–474. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474. EDN: BKBYOI
- Mailyan L.D., Sizen N.O. Assessment of quality indicators in construction // The Russian Automobile and Highway Industry Bulletin. 2024. Vol. 21. No. 3(97). P. 464–474. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-3-464-474. EDN: BKBYOI
21. Хафизов Э.Р., Вдовин Е.А., Фомин А.Ю. и др. Определение интенсивности движения и состава потока на улично-дорожной сети г. Казани в рамках исследования образования дефектов на дорожных покрытиях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 2(40). С. 297–304. EDN: YQQQWF
- Khafizov E.R., Vdovin E.A., Fomin A.Yu., et al. Determination of the volume of traffic and speed of movement on the street-road network in Kazan in the framework of the study of a formation of defects on road surfaces // News KSUAE. 2017. No. 2(40). P. 297–304. EDN: YQQQWF
22. Новик В.А., Бельский Е. И. Эксплуатационные свойства автомобильных дорог // AlfaBuild. 2018. № 1(3). С. 65–75. EDN: HAKXXC
- Novik V.A., Belskii Ye.I. Operating properties of motor-roads // AlfaBuild. 2018. No. 1(3). P. 65–75. EDN: HAKXXC
23. Боков С.С., Шматков Р.Н. Разработка информационной модели для задач

- транспортного строительства на основе математической модели оптимизационной задачи // *Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта*. 2025. № 3(18). С. 5–11. DOI: 10.52170/2712-9195_2025_3_5. EDN: НКАКРҮ
- Bokov S.S., Shmatkov R.N. Development of an information model for transport construction tasks based on a mathematical model of an optimization problem // *Fundamental and Applied Transport Issues*. 2025. No. 3(18). P. 5–11. DOI: 10.52170/2712-9195_2025_3_5. EDN: НКАКРҮ
24. Алексеев С.В., Симонов Д.Л., Катикова А.С. Воздействие природных факторов на состояние дорог в различных регионах России // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2022. Т. 8. № 4. С. 14–30. DOI: 10.17816/transsyst20228414-30
- Alekseev S.V., Simonov D.L., Katikova A.S. The impact of natural factors on the condition of roads in various regions of Russia // *Innovative Transportation Systems and Technologies*. 2022. Vol. 8. No. 4. P. 14–30. DOI: 10.17816/transsyst20228414-30
25. Nikulina M.E., Gorobtsov D.N., Pendin V.V. Engineering and geological audit in design and construction of linear transport facilities // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 189. P. 70–74. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.012
26. Кузнецов С.М., Демиденко О. В., Алексеев Н. Е. Проектирование надежности транспортно-технологического процесса в строительстве // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 3(43). С. 51–56. EDN: TWRCUJ
- Kuznetsov S.M., Demidenko O.V., Alekseev N.E. Designing reliability of transport and technological processes in construction // *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. 2015. No. 3(43). P. 51–56. EDN: TWRCUJ
27. Петроченко М.В. Метод оценки качества проектов транспортных сооружений // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2025. № 2(72). С. 221–231. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.20. EDN: NIFCKQ
- Petrochenko M.V. The method of assessing the quality of transport facilities projects // *News of KSUAE*. 2025. No. 2(72). P. 221–231. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.20. EDN: NIFCKQ
28. Шестаков Н.И., Чертес К.Л., Тупицина О.В., Пыстин В.Н. Экологические особенности обращения с объектами дорожно-строительного комплекса // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. Вып. 9. С. 1217–1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1217-1227
- Shestakov N.I., Chertes K.L., Tupicyna O.V., Pystin V.N. Ecological features of handling objects of the road construction complex. // *Bulletin of MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 9. P. 1217–1227. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.9.1217-1227
29. Ярошев И.Л. Применение байесовских нейросетей для моделирования рисков на финансовых рынках // *Журнал монетарной экономики и менеджмента*. 2024. № 9. С. 123–129. DOI: 10.26118/2782-4586.2024.24.48.018. EDN: DMKLNG
- Yaroshev I.L. Application of bayesian neural networks for risk modeling in financial markets // *Journal of Monetary Economics and Management*. 2024. No. 9. P. 123–129. DOI: 10.26118/2782-4586.2024.24.48.018. EDN: DMKLNG
30. Саати Т. Принятие решений: Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь. 1993. 278 с.
- Saaty T. Decision Making: The Analytic Hierarchy Process. M.: Radio and communication. 1993. 278 p.
31. Rad H.N., Khosrowshahi F. Quality measurement in construction projects: Proceedings of the 14th Annual ARCOM Conference / University of Reading. Reading: Association of Researchers in Construction Management. 1998. Vol. 2. P. 389–397.
32. Цибизова Т.Ю., Карпунин А.А. Применение метода анализа иерархий в оценке качества процессов управления // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2-1.
- Tsibizova T.Yu., Karpunin A.A. Method of hierarchies' analysis for quality assessment of managerial processes // *Modern Problems of Science and Education*. 2015. No. 2-1.
33. Хованов Н.В., Федотов Ю.В. Модели учета неопределенности при построении

- сводных показателей эффективности деятельности сложных производственных систем. Научные доклады № 28(R)–2006. СПб.: НИИ менеджмента СПбГУ, 2006. 37 с.
- Hovanov N.V., Fedotov Yu.V. Complex production performance measurement: estimation of aggregate indices under uncertainty. Discussion Paper No. 28(R)–2006. Institute of Management, Saint Petersburg State University: St. Petersburg, 2006. 37 p.
34. Нейман Дж. фон, Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М.: Наука. 1970. 707 с.
- Neumann J. von, Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. M.: Science. 1970. 707 p.
35. Малетова Т.С. Принятие управленческих решений в условиях неопределенности // Экономика и управление: проблемы, решения. 2025. № 10. Т. 5. С. 18–26. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2025.10.05.003
- Maletova T.S. Making managerial decisions in conditions of uncertainty // economics and management: problems, solutionse: problemy resheniya. 2025. Vol. 5. No. 10. P. 18–26. DOI: 10.36871/ ek.up.p.r.2025.10.05.003

Информация об авторах

Петроченко Марина Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: petrochenko_mv@spbstu.ru, ORCID: 0000-0002-4865-5319

Information about the authors

Marina V. Petrochenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: petrochenko_mv@spbstu.ru, ORCID: 0000-0002-4865-5319

Дата поступления: 23.04.2026

Дата принятия: 30.09.2026