

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Научная статья

УДК 004.413.4:[625.1/.5+004.9]

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения

А. В. Панфилов , Н. Н. Николаев  , А. Р. Юсупов , А. А. Короткий 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

 nnnks@yandex.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время техническое состояние канатов машин на канатной тяге оценивается периодически согласно нормативной документации. При этом применяются методы визуально-инструментального контроля, которые зависят от навыков и физических возможностей (зрения) персонала, выполняющего работы. Единая система непрерывной оценки технического состояния по совокупности факторов, не зависящая от человеческого фактора, отсутствует. В результате возникают аварийные ситуации даже при выполнении всех регламентных работ в срок. Для исправления этой ситуации предлагается использование системы компьютерного зрения и нейронных сетей, позволяющей по совокупности обнаруженных и идентифицированных дефектов определять его пригодность к дальнейшей эксплуатации по уровням риска с интерпретацией их результатов в цветовую гамму: зеленый — приемлемый, желтый — повышенный, красный — высокий. Цель работы — предложить интегральный метод оценки риска эксплуатации машин с канатной тягой при обнаружении дефектов и их сочетаний в стальном канате с использованием компьютерного зрения при исключении влияния человеческого фактора.

Материалы и методы. Обучение нейронной сети производилось на основе статистических данных дефектов, полученных по результатам технических освидетельствований машин с канатной тягой, на участках каната, кратных его шести и тридцати номинальным диаметрам по ГОСТ 33 718. Индексация рисков в цветовую гамму осуществлялась по ГОСТ 55 234.3 для выработки стратегии технического обслуживания стальных канатов. На программный код нейронной сети получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Нейронная сеть обрабатывает данные визуально-измерительного контроля на основе компьютерного зрения.

Результаты исследования. Создана система интегральной оценки риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения, позволяющая своевременно обнаруживать дефекты стальных канатов, оценивать существующий риск дальнейшей эксплуатации и давать рекомендации специалистам эксплуатирующих организаций в режиме реального времени. Это позволит резко снизить риск аварий, травмирования и гибели людей на объектах, использующих стальные канаты.

Обсуждение и заключения. Предлагаемая система интегральной оценки риска может быть применена в любом объекте с применением канатной тяги. Это лифты различного назначения, фуникулеры, канатные дороги, краны и многие другие машины. Следует отметить, что предполагаемая коммерческая стоимость системы является невысокой, следовательно, система доступна широкому кругу потребителей.

Ключевые слова: интегральная система, оценка риска, стальной канат, компьютерное зрение, нейронная сеть, рекомендательная система.

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам из ДГТУ за помощь в разработке системы; благодарность Фонду содействия инновациям за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения / А. В. Панфилов, Н. Н. Николаев, А. Р. Юсупов, А. А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — Т. 1, №1. — С. 56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

© Панфилов А. В., Николаев Н. Н., Юсупов А. Р., Короткий А. А., 2023

Original article

Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision

Aleksey V. Panfilov , Nikolay N. Nikolaev ✉, Aleksandr R. Yusupov , Anatoliy A. Korotkiy 

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nnnks@yandex.ru

Abstract

Introduction. Currently, the technical condition of ropes of cable-working machines is evaluated periodically according to regulatory documentation. At the same time, methods of visual and instrumental control are used, which depend on the skills and physical capabilities (vision) of the personnel performing the work. There is no unified system of continuous assessment of the technical condition based on a set of factors that does not depend on the human factor. As a result, emergencies occur even when all routine maintenance is carried out on time. To correct this situation, it is proposed to use a computer vision system and neural networks, which allows determining its suitability for further operation by risk levels based on the totality of detected and identified defects, with the interpretation of their results in the color scheme: green — acceptable, yellow — increased, red — high. The work objective is to propose an integral method for risk assessment of operating machines with rope traction when defects and their combinations are detected in a steel rope using computer vision while excluding the influence of the human factor.

Materials and Methods. Training of the neural network was carried out on the basis of statistical data of defects obtained from the results of technical inspections of machines with rope traction, on sections of the rope, multiples of its six and thirty nominal diameters according to GOST 33 718. Indexing of risks in the color scheme was carried out according to GOST 55 234.3 to develop a strategy for steel ropes maintenance. A certificate of registration of a computer program was obtained for the neural network program code. The neural network processes visual and measurement control data based on computer vision.

Results. An integrated risk assessment system has been created for the diagnosis of steel ropes using computer vision, which allows you to detect defects in steel ropes timely, assess the existing risk of further operation and give recommendations to specialists of operating organizations in real time. This will dramatically reduce the risk of accidents, injury and death of people at facilities using steel ropes.

Discussion and Conclusion. The proposed integrated risk assessment system can be applied in any facility that uses rope traction. These are elevators for various purposes, funiculars, cable cars, cranes and many other machines. It should be noted that the estimated commercial cost of the system is low; therefore, the system is available to a wide range of consumers.

Keywords: integrated system, risk assessment, steel rope, computer vision, neural network, recommendation system.

Acknowledgements. The authors would like to thank their colleagues from DSTU for their help in developing the system and to express gratitude to the Innovation Promotion Fund for financial support of the research.

For citation. A. V. Panfilov, N. N. Nikolaev, A. R. Yusupov, A. A. Korotkiy. Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no. 1, pp. 56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

Введение. Своевременная оценка технического состояния объектов, непосредственно отвечающих за безопасность выполнения различных технологических операций является важнейшей задачей. Это позволит сократить или исключить аварийные ситуации с травмированием, гибелью людей и повреждением материальных объектов [1, 2]. К таким критически важным с точки зрения оценки риска техническим объектам относятся: лифты (пассажирские, больничные и грузовые); канатные дороги (пассажирские и грузовые); шахтные подъемные установки; нефте- и газодобывающие буровые установки; грузоподъемные краны; тали; <https://www.bps-journal.ru>

судовые подъемные устройства; скиповые подъемники; канатные механизмы оффшорных платформ; механизмы на морских трубоукладчиках и другие.

Для осуществления непрерывного контроля параметров технического состояния стальных канатов разработана рекомендательная система интегральной оценки риска продолжения работы стальных канатов в механизмах с использованием и интерпретацией данных системы компьютерного зрения.

Актуальность проблемы подтверждается имеющейся статистикой аварий на объектах, использующих канатную тягу, которые возникают, несмотря на имеющуюся систему периодических осмотров и дефектоскопии стальных канатов [3–5].

Цель работы — предложить интегральный метод оценки риска эксплуатации машин с канатной тягой при обнаружении дефектов и их сочетании с использованием компьютерного зрения в стальном канате при проведении регламентных работ.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели в ходе данного исследования:

1. Описать существующие регламенты по визуально-измерительному контролю стальных канатов на машинах с канатной тягой.
2. Предложить метод визуально-измерительного контроля с использованием компьютерного зрения в стальном канате.
3. Показать, что компьютерное зрение является технологией искусственного интеллекта.
4. Дать определение интеллектуальной системе поддержки принятия решений (ИСППР – IDSS) применительно к предложенному методу оценки риска эксплуатации машин с канатной тягой при обнаружении дефектов и их сочетании с использованием компьютерного зрения в стальном канате при проведении регламентных работ.
5. Применить один из известных методов риск-анализа для интегральной оценки технического состояния стальных канатов.
6. Предложить алгоритм и вычислительную процедуру для интегральной оценки риска эксплуатации стального каната с наличием дефектов на фиксированной длине равной шести и тридцати номинальных диаметров каната.

Отправной точкой создания продукта явились возникающие проблемы с лифтами (и другими машинами на канатной тяге) и возможность применения аналитики видеоинформации, которая основана на алгоритмах глубокого обучения по распознаванию образов. Это позволит значительно повысить объективность получаемой информации о параметрах технического состояния стального каната, уравнивающих устройств, креплений концов заделок и обеспечить уровень безопасности процессов эксплуатации машин на канатной тяге, устраняя при этом человеческий фактор [6, 7].

Материалы и методы. Стальные канаты подвергаются ежесменным, периодическим и специальным осмотрам во всех типах подъемных сооружений. Документом, которым пользуется персонал при проведении ремонтных и обслуживающих работ, является инструкция по эксплуатации. При ее отсутствии необходимо пользоваться Правилами безопасности или ГОСТами.

Электромеханики по лифтам, крановщики, машинисты, слесари, электромонтеры и другие категории обслуживающего персонала осуществляют ежесменные визуальные осмотры стальных канатов периодически или непосредственно перед началом работы. Осмотры проводятся в следующем порядке:

1. Ознакомление с записями в журнале (журнале ежесменного осмотра лифта; вахтенном — для грузоподъемного крана; сменном журнале — для подвесных канатных дорог и др.).
2. Проведение осмотра навитых на барабан участков каната, а также пропущенных через канатопроводящий шкив, блок, опирающихся на башмаки, закрепленных в муфтах, коушах и зажимах.

У оператора (машиниста) подъемного сооружения имеется журнал, в которых заносятся результаты осмотров.

Периодичность дефектоскопии стальных канатов для конкретных подъемных сооружений и их периодичность приведена в таблице 1.

Таблица 1

Периодичность осмотров и дефектоскопии стальных канатов¹

№ п/п	Наименование подъемного сооружения	Назначение стального каната	Периодичность дефектоскопии (месяц)	Примечание
1	Краны грузоподъемные	грузовой	12	*
		стреловой	12	**
		тяговый	12	*
		оттяжка	36	**
2	Краны кабельные	несущий	последующая каждые 24	первая при пуске в эксплуатацию
		тяговый	12	
		грузовой	12	
		оттяжка	36	
		канаты поддержек	не подвергаются	
		подвески кабелей	не подвергаются	
3	Подъемники и лебедки для подъема людей	грузовой	6	
		тяговый	12	
4	Съемные грузозахватные органы		не подвергаются	
5	Съемные грузозахватные приспособления		не подвергаются	
6	Тали электрические	грузовой	12	*
7	Лифты	тяговый	6	
		хвостовой	не подвергаются	
8	Подъемники (вышки)		не подвергаются	
9	Подвесные пассажирские (грузовые) канатные дороги	несущий, тяговый, тягово-несущий	вторая - через 36, последующая каждые 12	первая при пуске в эксплуатацию
	натяжной	не подвергаются		
10	Наклонные рельсово-канатные подъемники (фуникулеры)	тяговый	вторая - через 36, последующая каждые 12	первая при пуске в эксплуатацию
		натяжной (хвостовой)	не подвергаются	
		предохранительный	не подвергаются	
Примечание: малокрутящиеся канаты, независимо от назначения, подлежат дефектоскопии с периодичностью 12 месяцев; * при интенсивной эксплуатации в условиях агрессивной среды и повышенной температуры; ** для канатов, эксплуатирующихся без замены на кранах с истекшим сроком службы.				

Правила¹ требуют проведения периодического (в отдельных случаях — ежедневного) визуально-измерительного контроля (ВИК) стальных канатов с обнаружением внешних дефектов, сведения о которых заносятся в журнал осмотров.

¹ Об организации безопасного использования и содержания лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек), эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах / Правительство Российской Федерации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/436745439?section=text> (дата обращения: 23.01.2023).

Дефекты в стальных канатах возникают в результате:

- внешних воздействий с механическим оборудованием или внешней средой в шахте лифта, в том числе при образовании дугового электрического разряда;
- ненадлежащего качества поставляемого стального каната как комплектующего изделия;
- ненадлежащего качества монтажа стальных канатов;
- неисправности механических частей лифта, индикатором которых является канат.

Можно констатировать, что их дефекты стальных канатов являются «индикатором» технического состояния всего механического оборудования подъемного сооружения, а именно: износа ручья шкива; проскальзывания каната на шкиве, в том числе в результате нанесения излишней смазки; перекоса крепления лебедки; люфтов в элементах передаточных механизмов привода и прочее [8–12]. Возможные неисправности механических частей лифта в зависимости от браковочных показателей представлены в таблице 2.

Предложен метод ВИК, позволяющий осуществить интегральную оценку технического состояния стального каната, реализованный в виде программно-аппаратного комплекса², являющегося вычислительной рекомендательной системой принятия решения для обслуживающего персонала при выполнении ими работ по техническому обслуживанию машин с канатной тягой. Это позволяет получить необходимый уровень безопасности, при этом устраняется субъективность человеческого фактора, а именно, физиологические ограничения, связанные со зрением.

Предложенный метод предусматривает создание, развитие и внедрение искусственного интеллекта, а именно комплекса технологических решений, которые позволяют имитировать когнитивные функции человека (зрение и самообучение), включающие в себя поиск решений по идентификации выявленных дефектов стальных канатов с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Таблица 2

Возможные неисправности механического оборудования лифта в зависимости от типов дефектов

№ п/п	Браковочный показатель	«Индикатор» возможной неисправности
1	Обрывы наружных проволок	– Износ ручья шкива – Перекос канатоведущего шкива при монтаже или техническом обслуживании – Соприкосновение с внешними элементами при движении в шахте – Ненадлежащее качество поставляемого стального каната
2	Поверхностный износ каната	– Износ ручья шкива – Перекос канатоведущего шкива при монтаже или техническом обслуживании
3	Поверхностная коррозия	Воздействие факторов возникновения коррозии (кислородного, электрохимического, химического)
4	Местное уменьшение диаметра каната	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Повреждение сердечника – Повреждение внутренних прядей
5	Местное увеличение диаметра каната	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Разбухание органического сердечника от избытка влаги
6	Волнистость	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Дефекты монтажа или ненадлежащего технического обслуживания уравнивающих устройств, мест заделок их концов
7	Температурное воздействие (электрический дуговой разряд или удар молнии)	Воздействие электрического тока при монтаже, ненадлежащего технического обслуживания и в процессе эксплуатации
8	Кручение	– Перегрузка – Неправильная запасовка

² Способ визуально-измерительного контроля стального каната : патент 2775348 Рос. Федерация : D07B 1/00 ; B66B 7/1215 ; G05B 99/00 / А. А. Короткий [и др.]. № 2021107842 ; заявл. 23.03.2021 ; опубл. 29.06.2022, Бюл. № 19. 16 с.

№ п/п	Браковочный показатель	«Индикатор» возможной неисправности
		– Неправильная укладка нового каната на барабан
9	Удлинение (остаточное)	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Перегрузка – Повреждение сердечника – Повреждение внутренних прядей
10	Дефекты уравнивающих устройств, мест заделок их концов	Дефекты монтажа и ненадлежащего технического обслуживания

К технологиям искусственного интеллекта, в соответствии с «Национальной стратегией...»³ (подпункт «а» пункта 5), относятся технологии, основанные на использовании компьютерного зрения и интеллектуальной поддержки принятия решений.

Под искусственным интеллектом следует понимать комплекс технологических решений, который позволяет имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и выполнять конкретные задачи с результатами, сопоставимыми с результатами интеллектуальной деятельности человека или превосходящими их.

Заявленный метод включает в себя комплекс технологических решений, состоящий из компьютерного зрения, информационно-коммуникационной инфраструктуры, программного обеспечения (в том числе, реализация методов машинного обучения), процессов и сервисов по обработке данных и поиску решений.

Для интегральной оценки технического состояния стального каната применена интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР — IDSS), использующая методы искусственного интеллекта (ИИ) (рис. 1, 2).

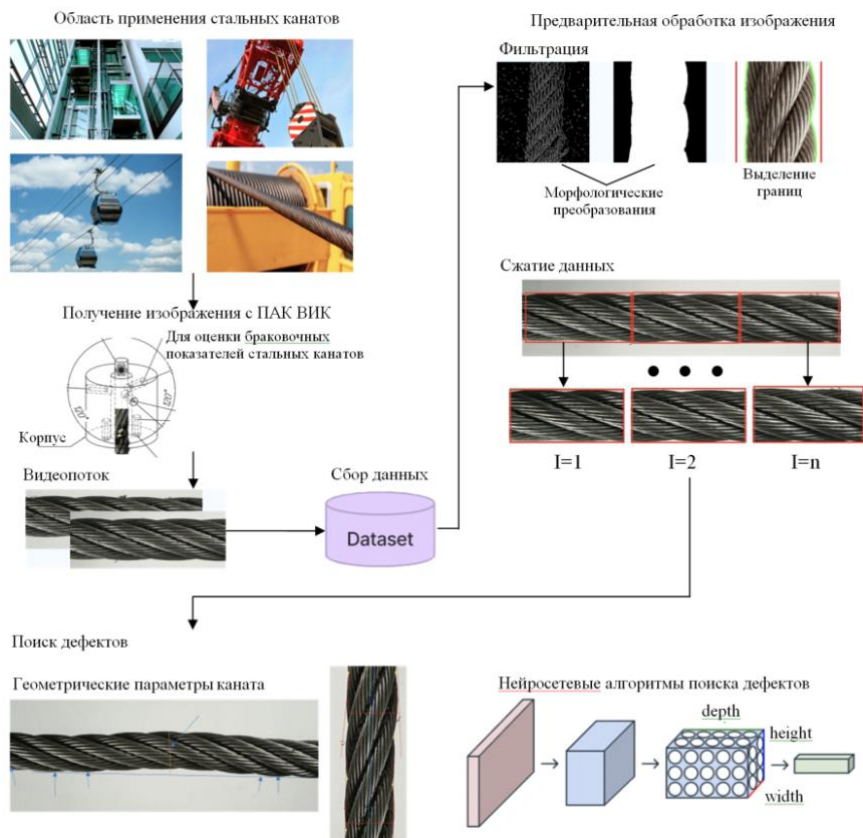


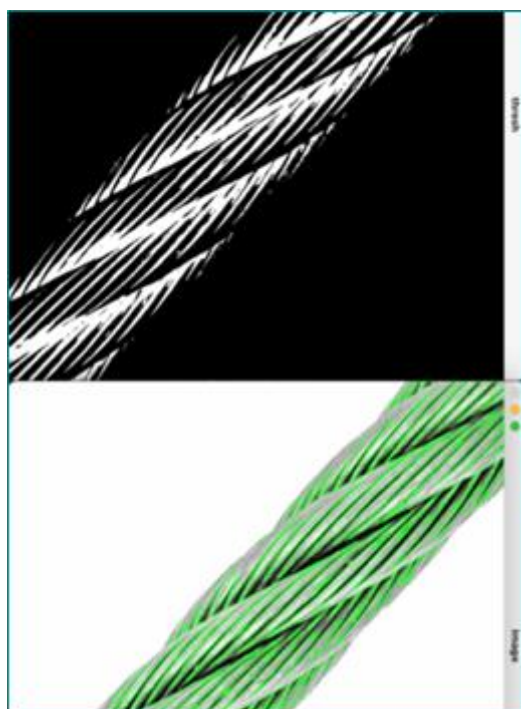
Рис. 1. Функциональная схема метода визуально-измерительного контроля стального каната

³ О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года») / Президент Российской Федерации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/563441794/titles/64U0IK> (дата обращения: 23.01.2023).

Интеллектуальная система поддержки принятия решений заменяет человека-консультанта. Она оказывает поддержку лицам, принимающим решения, путем сбора и анализа фактических данных по обнаруженным дефектам, дает предложения возможных вариантов действий и их оценку. Цель методов искусственного интеллекта, встроенных в интеллектуальную систему поддержки принятия решений, состоит в том, чтобы позволить компьютеру выполнять эти задачи, максимально имитируя человеческие возможности.

Предложенная реализации ИСППР (IDSS) основана на экспертных системах, которые кодируют знания и имитируют когнитивное поведение экспертов-людей, используя правила логики предикатов.

Экспертная система — это компьютерная система, имитирующая способность эксперта-человека принимать решения. Экспертные системы предназначены для решения сложных проблем путем рассуждения с помощью совокупности знаний, представленных в основном в виде правил «если-то», а не с помощью обычного процедурного кода. Экспертная система делится на две подсистемы — механизм вывода и базу знаний. База знаний представляет факты и правила. Механизм вывода применяет правила к известным фактам, чтобы вывести новые факты. Механизмы вывода могут также включать в себя возможности объяснения и отладки.



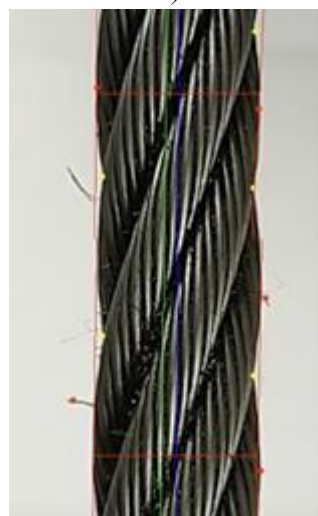
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Обнаружение дефектов средствами компьютерного зрения:
а — определение износа наружных проволок; б — обрыв проволоки;

в — температурное воздействие; г — местное уменьшение / увеличение диаметра

Создаваемый метод позволяет автоматизировать процессы при оценке безопасности использования именно стального каната на машинах на канатной тяге. Это дает возможность предоставить пользователям (персоналу) визуальную рекомендательную систему принятия решения в виде веб-приложения, на которое не оказывает влияние человеческий фактор. Это обеспечивает рост безопасности и снижение затрат. Данный метод автоматизирует и объединяет два метода контроля: визуальный и инструментальный [14–16].

Экспертная система по оценке риска может быть реализована на основе известных методов, таких как⁴: метод Делфи (Delphi); анализ видов и последствий отказов (FMEA); анализ видов, последствий и критичности отказов (FMECA); техническое обслуживание на основе надежности (RCM); индексы риска; сценарный анализ; структурированный метод «Что, если?» (SWIFT); методы нечеткой логики и др.

Вне зависимости от применяемой методики, оценку рисков осуществляют с использованием матрицы оценки рисков или аналогичного инструмента (например, см. ГОСТ Р 58 771⁴ или ГОСТ Р 55 234.3⁵, или ГОСТ 12.0.230.5⁶).

Осями матрицы могут являться как вероятность и последствия риска, так и любые другие технические параметры механического оборудования, характеризующие их важность или критичность.

По результатам такой оценки риску, как правило, присваивают один из трех уровней — высокий (красный), средний (желтый) или низкий (зеленый).

Возможно увеличение количества уровней. Названия цветов приведены как часть наиболее распространенной схемы.

В рекомендациях по стандартизации⁷ также предусматривают использование цветовой гаммы при оценке риска.

Для оценки уровней риска и выработки стратегий технического обслуживания и выбраковки на основе рекомендательной системы принятия решений применим подход RIMAP — процедуры контроля технического состояния и обслуживания, основанные на риск-ориентированном подходе (рекомендован ГОСТ 55 234.3⁵). Подход позволяет успешно сочетать все известные методы оценивания риска и принятия решений.

Применение подхода RIMAP решает следующие задачи:

- определение опасностей;
- определение механизмов возникновения дефектов и отказов;
- определение вероятности отказа;
- определение последствий отказа;
- оценка уровня риска.

Главной опасностью для канатных систем является риск обрыва каната, а также разрушение мест заделки концов каната.

В таблице 3 представлены браковочные показатели стальных канатов и механизмы развития повреждений.

Далее необходимо определить вероятность отказа. Для этого требуются исходные данные по различным дефектам, указанным в таблицах 2 и 3.

⁴ ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска / НП «РусРиск»; Технический комитет по стандартизации ТК 010 «Менеджмент риска»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (дата обращения: 23.01.2023).

⁵ ГОСТ Р 55234.3-2013. Практические аспекты менеджмента риска. Процедуры проверки и технического обслуживания оборудования на основе риска / АНО «НИЦ КД»; Технический комитет по стандартизации ТК 010 «Менеджмент риска»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108150> (дата обращения: 23.01.2023).

⁶ ГОСТ 12.0.230.5-2018. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии; Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160465> (дата обращения: 23.01.2023).

⁷ Р 50.1.090-2014. Менеджмент риска. Ключевые индикаторы риска / НП «РусРиск»; Технический комитет по стандартизации ТК 010 «Менеджмент риска»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200120834> (дата обращения: 23.01.2023).

Браковочные показатели стальных канатов и механизмы развития повреждений

Обозначение	Наименование вида дефекта	Нормы браковки согласно нормативно-технических документов	Механизмы развития повреждений
A (на длине 6d) B (на длине 30d)	Обрывы наружных проволок	Согласно руководству по эксплуатации каната (в зависимости от типа и марки)	Усталостный износ, механический износ, коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
C	Поверхностный износ каната	Уменьшение диаметра наружных проволок на 40 % и более	Механический износ
D	Поверхностная коррозия	Уменьшение диаметра каната на 7 % и более;	Коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
E	Местное уменьшение диаметра каната	Уменьшение на 3 – 6 % диаметра каната от номинального	Повреждение сердечника, повреждение внутренних прядей
F	Местное увеличение диаметра каната	Увеличение на 3 -6 % диаметра каната от номинального	Разбухание органического сердечника от избытка влаги
G	Волнистость	При совпадении направления спирали волнистости с направлением свивки каната и равенства шага волнистости и шага свивки каната при $d_w \geq 1,08d_k$ (где d_w и d_k , соответственно, диаметр волнистости и диаметр каната). В остальных случаях при $d_w \geq 1,33d_k$	Изгиб в ручьях шкивов малых радиусов
H	Температурное воздействие	При обнаружении на поверхности каната сажи, обгорелости, характерного изменения цвета	Статический электрический разряд, удар молнии, нагрев
I	Кручение	1) При запасовке 1:1 — 0,5 оборота на 10 метров 2) При запасовке 2:1 — 0,5 оборота на 20 метров 3) Для канатов с органическим сердечником — 1 оборот на 10 метров	Перегрузка, неправильная запасовка, неправильная укладка нового каната на барабан
J	Удлинение (остаточное)	При остаточном удлинении более чем на 0,5 % рабочей длины после приработки	Перегрузка, повреждение сердечника, повреждение внутренних прядей
K	Дефекты уравнивающих устройств, мест заделок канатов	Отклонение положения и формы от первоначального расположения элементов	Перегрузка, износ деталей и элементов

Для получения достоверной выборки данных на основе имеющихся результатов дефектации канатов использован метод Монте-Карло, с помощью которого была сгенерирована выборка объемом 1000 участков каната, кратных его 6 номинальным диаметрам, позволяющая рассмотреть все сочетания и вариации дефектов. Оценка суммарной вероятности отказа по выборке выполнялась в соответствии с алгоритмом, представленном

на рис. 3. Полученная выборка была применена для обучения нейронной сети с целью реализации метода индексации рисков подхода RIMAP.

Поскольку выходные данные имеют дискретный характер, то нейронная сеть должна решать задачу классификации. В качестве типа нейронной сети выбран многослойный персептрон.

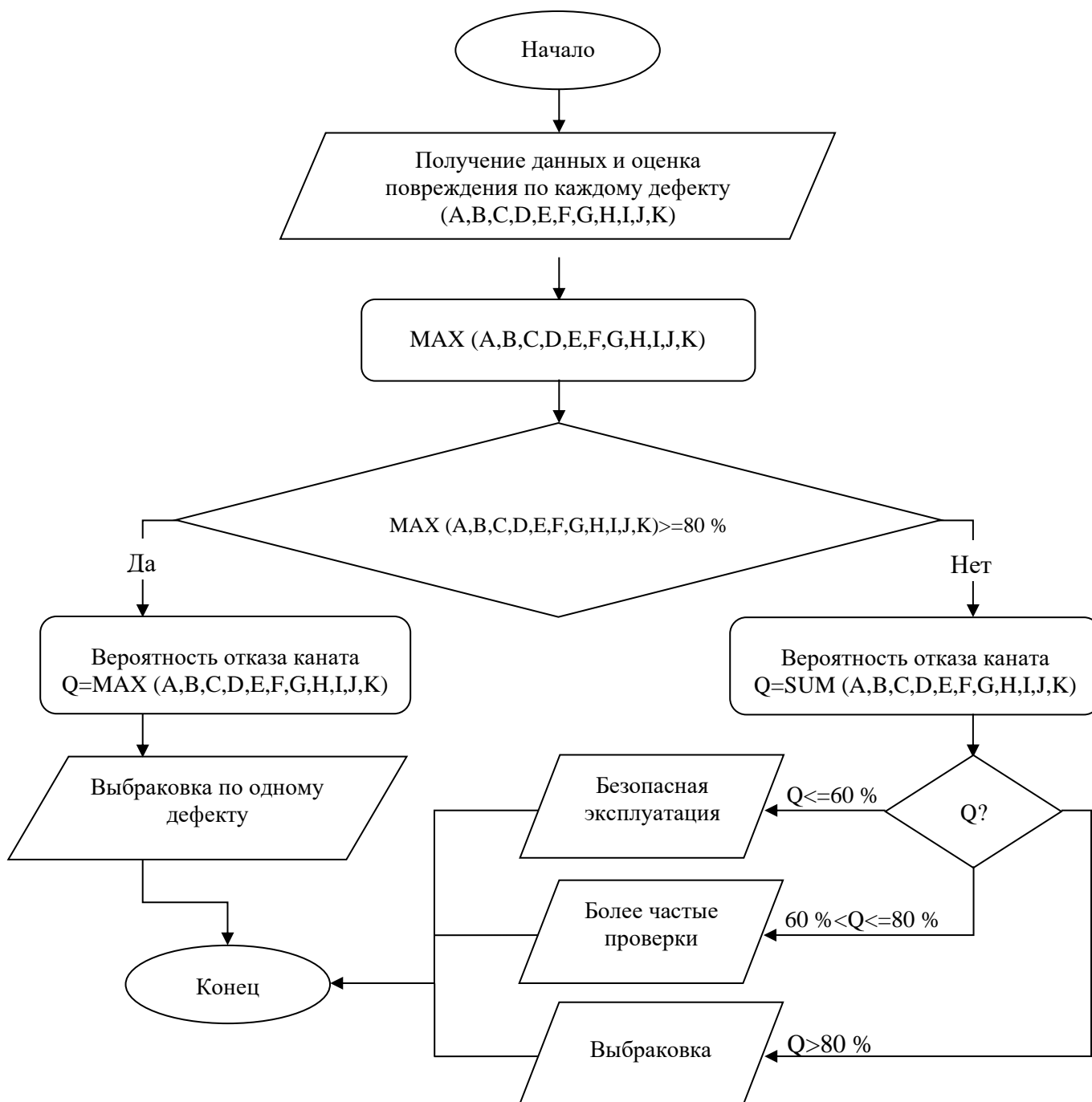


Рис. 3. Алгоритм оценки суммарного повреждения участка каната

В ходе обучения было получено 20 нейронных сетей, из которых автоматически было отобрано пять лучших (рис. 4).

Среди полученных нейронных сетей можно выделить сеть MLP 11–9–3, имеющую наилучшую производительность на тестовой выборке 96 %, а по обучающей и контрольной выборкам — 98 %.

Summary of active networks (Spreadsheet in Risk_Estimation)								
Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	MLP 11-4-3	95,85714	95,33333	98,00000	BFGS 36	SOS	Tanh	Identity
2	MLP 11-14-3	96,28571	94,66667	96,00000	BFGS 50	SOS	Logistic	Tanh
3	MLP 11-7-3	96,42857	95,33333	98,00000	BFGS 16	SOS	Exponential	Logistic
4	MLP 11-14-3	97,57143	94,66667	97,33333	BFGS 92	SOS	Logistic	Identity
5	MLP 11-9-3	98,14286	96,00000	98,00000	BFGS 155	SOS	Logistic	Tanh

Рис. 4. Наилучшие нейронные сети из 20 обученных

Это наилучшие показатели, поэтому для дальнейшей работы в интеллектуальной системе поддержки принятия решений будем использовать указанную нейронную сеть. Указанная нейронная сеть имеет 11 нейронов во входном слое (по количеству дефектов на входе), 9 нейронов в скрытом слое, а также 3 нейрона в выходном слое (по количеству возможных оценок риска дальнейшей эксплуатации стального каната). В качестве функции активации нейронов скрытого слоя применена логистическая функция, а для выходного слоя — тангенциальная функция.

Анализ чувствительности нейронной сети MLP 11–9–3 к изменению влияющих показателей износа показал, что наибольшее влияние оказывают изменения показателей J (удлинение), I (кручение), E (местное уменьшение диаметра каната) и G (волнистость) (рис. 5).

Networks	Sensitivity analysis (Spreadsheet in Risk_Estimation)										
	Samples: Train										
	J	I	E	G	A	F	K	H	C	D	B
1.MLP 11-4-3	4,09029	3,78539	3,538596	2,999158	2,547528	2,325594	1,647709	1,675373	1,173743	1,138040	1,004637
2.MLP 11-14-3	3,10473	2,80809	2,788032	2,397576	1,973580	1,837489	1,595495	1,540505	1,102962	1,130396	1,012868
3.MLP 11-7-3	3,28691	2,97724	2,869449	2,475196	2,139719	2,020911	1,700607	1,700192	1,151866	1,085886	1,003372
4.MLP 11-14-3	7,30974	6,61641	6,316661	5,374687	4,347702	3,728140	2,721447	2,575235	1,506436	1,705318	1,137510
5.MLP 11-9-3	11,24972	10,23045	9,817238	8,400586	7,023844	5,798566	5,965579	5,509112	2,803276	2,617175	1,092058
Average	5,80828	5,28351	5,065995	4,329440	3,606475	3,142140	2,726167	2,600083	1,547656	1,535363	1,050089

Рис. 5. Анализ чувствительности нейронной сети MLP 11–9–3

На программный код нейронной сети получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ⁸.

Результаты исследования. Создана система интегральной оценки риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения, позволяющая своевременно обнаруживать дефекты стальных канатов, оценивать существующий риск дальнейшей эксплуатации и давать рекомендации специалистам эксплуатирующих организаций в режиме реального времени. Это позволит резко снизить риск аварий, травмирования и гибели людей на объектах, использующих стальные канаты.

Данная система является ядром продукта — программно-аппаратный комплекс (ПАК) (рис. 6) автоматизации процессов оценки безопасности использования стальных канатов, дефектов уравнивающих устройств и мест заделок их концов на машинах с применением канатной тяги, который представляет собой визуальную рекомендательную систему принятия решения для специалистов. При этом устраняется человеческий фактор, что обеспечивает повышение безопасности и снижение затрат.

Основное функциональное назначение ПАК состоит в автоматическом обнаружении дефектов стальных канатов, уравнивающих устройств и креплений концов заделок канатов специальными оптическими средствами (фото- и видеофиксации) с последующей обработкой полученной цифровой информации методом фото- и видеоаналитики на основе машинного обучения, в том числе, интегральной оценкой пригодности к дальнейшей эксплуатации методами риск-анализа, которая транслируется в цветовую гамму оценки риска на мобильные устройства пользователей.

⁸ Интегральная оценка технического состояния стального каната : прогр. для ЭВМ. Свид. № 2022683712 / А. А. Короткий [и др.]; Инженерно-консультационный центр «Мысль». № 2022683761 ; заявл. 07.12.2022 ; опубл. 07.12.2022, Бюл. № 12.

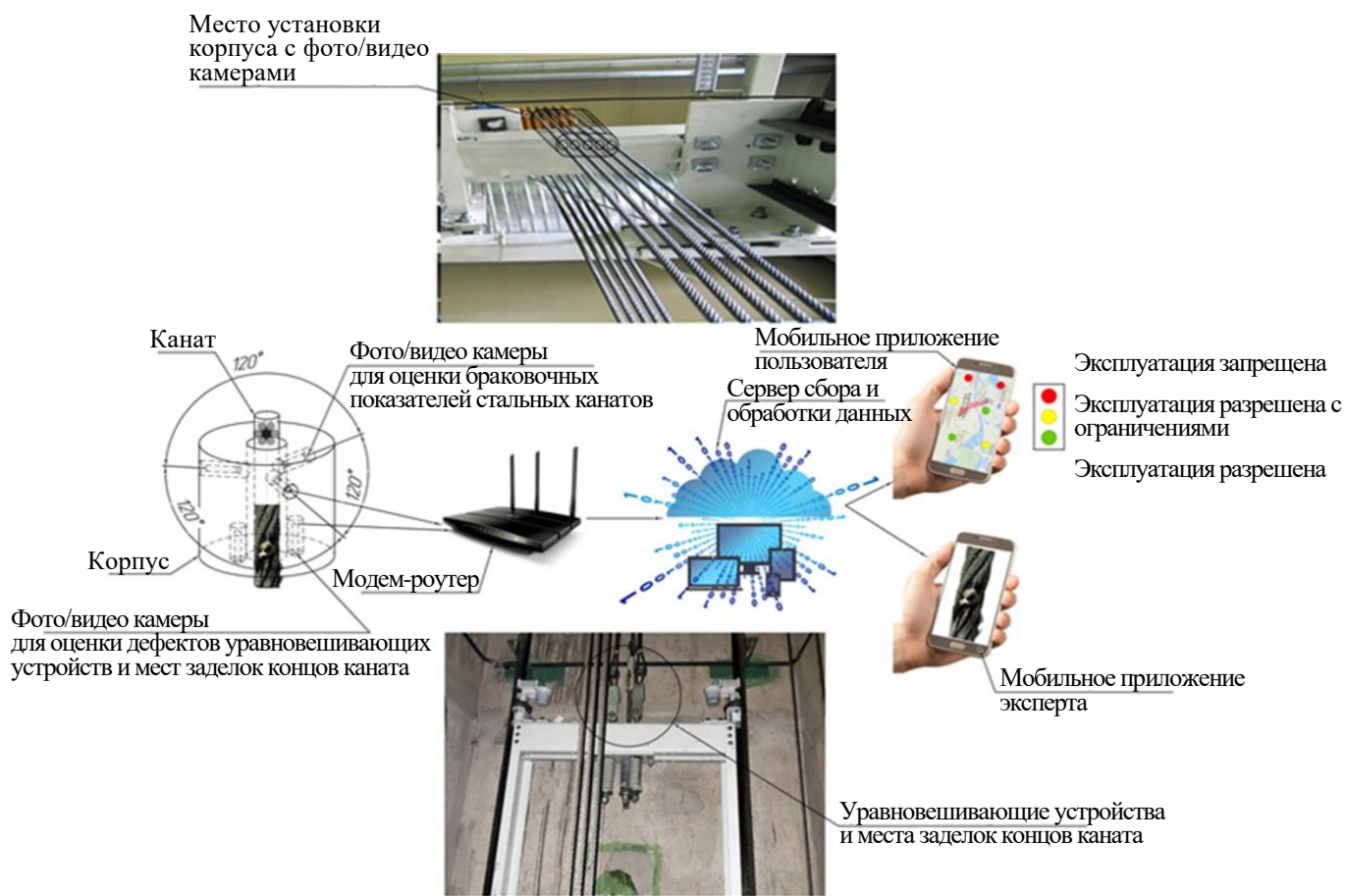


Рис. 6. Функциональная схема ПАК

Обсуждение и заключения. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения с учетом ее преимуществ перед традиционной системой визуально-инструментального контроля будет востребована отраслью машин на канатной тяге. Этот рынок является целевым для использования на нем создаваемого авторами продукта. Например, количество пассажирских лифтов, находящихся в эксплуатации на территории Российской Федерации, составляет 450 тыс. ед. Обслуживанием лифтов занимаются более 50 тыс. организаций. На каждый лифт необходима аппаратная часть комплекса, т.е. объем рынка потребителей составляет 450 тыс. шт. Программная часть необходима каждой обслуживающей организации, т.е. 50 тыс. лицензий. Мобильное приложение необходимо специалистам каждой обслуживающей организации, в которой, как минимум, должны быть не менее трех специалистов, т.е. 150 тыс. лицензий. Учитывая технологические и экономические преимущества (цена порядка 55 тыс. рублей), разработанная система займет прочную позицию в отрасли машин на канатной тяге.

Список литературы

1. Journey Safety Assessment to Urban Aerial Ropeways Transport Systems Based on Continuous Inspection During Operation / R. Martinod, D. Estepa, C. Paris, A. Trujillo // Journal of Transportation Safety & Security. — 2015. — No. 7. — P. 279–290. [10.1080/19439962.2014.942018](https://doi.org/10.1080/19439962.2014.942018)
2. Ferrarese M. Demand, business profitability and competitiveness in the cableway system: A multidimensional framework / M. Ferrarese, E. Loner, M. Pulina // Research in Transportation Economics. — 2021. — Vol. 90. — 101041. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101041>
3. Failure analysis of a ropeway accident focussing on the wire rope's fracture load under lateral pressure / G. Piskoty, Ch. Affolter, M. Sauder, M. Nambiar, B. Weisse // Engineering Failure Analysis. — 2017. — Vo. 82. — 648–656. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.003>

4. Failure analysis of the journal bearing pulley of the cargo cable way / P. Peterka, J. Krešák, M. Vojtko, M. Mantič // Engineering Failure Analysis. — 2020. — Vol. 111. — 104329. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104329>
5. Mapelli, C. Failure analysis of a cableway rope / C. Mapelli, S. Barella // Engineering Failure Analysis. — 2009. — Vol. 16, No. 5. — 1666–1673. [10.1016/j.engfailanal.2008.12.011](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.12.011)
6. Панфилов, А. В. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода / А. В. Панфилов, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 48–55.
7. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода / А. В. Панфилов, О. А. Бахтеев, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020, № 2. — С. 19–29. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-19-29>
8. О критериях и нормах браковки канатов пассажирских канатных дорог / А. В. Панфилов, А. А. Короткий, Б. Ф. Иванов, Э. А. Панфилова // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2021. — №1. — С. 53–65.
9. Dynamic behavior of ropeway string / P. J. Shakti, I. Mohd, B. Subbaratnam, K. Naresh // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 998 — 2020 — 012068. [10.1088/1757-899X/998/1/012068](https://doi.org/10.1088/1757-899X/998/1/012068)
10. Modelling and analysis of helical ropeway string / M. A. Kattimani, M. Ibrahim, M. A. Ahmed, M. A. Salam // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. — 2022. — Vol. 9, No. 6, — P. 357–365. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/361612084> **MODELLING AND ANALYSIS OF HELICAL ROPEWAY STRING**
11. Fontanari, V. Study of the lightning damage produced in a full-locked wire rope of an aerial cableway / V. Fontanari, C. Menapace, E. Pedrotti // Engineering Failure Analysis. — 2019. — Vol. 103. — P. 530–539, [10.1016/j.engfailanal.2019.05.002](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.002)
12. Experimental prediction of wire rope damage by energy method / A. Wahid, N. Mouhib, A. Ouardi, F. Sabah, H. Chakir, M. E. Lghorba // Engineering Structures. — 2019 — Vol. 201. — 109794. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109794>
13. Prediction of fatigue fractures diffusion on the cableway haul rope / P. Peterka, P. Kačmáry, J. Krešák, J. Šimoňák, P. Bindzár, D. Mitrík // Engineering Failure Analysis. — 2016. — Vol 59. — P. 185–196, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.006>
14. Collini, L. MRT detection of fretting fatigue cracks in a cableway locked coil rope / L. Collini, F. Degasperi // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. — 2014. — Vol. 2. — P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2014.09.001>
15. A New Detection Method of the Surface Broken Wires of the Steel Wire Rope Using an Eddy Current Differential Probe / Kou Yanfei, Guo Jiujiang, Li Jingjing, Jiao Shaoni, Liu Jiquan, Yan Zhiwei, Zhu Kun // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 63619– 63625. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183097>
16. Kumar, K. Effect of Key Parameters on Fretting Behaviour of Wire Rope / K. Kumar, D. Goyal, S. S. Banwait // Archives of Computational Methods in Engineering. — 2020. — No. 27, — P. 549–561, <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09326-y>

Поступила в редакцию 11.01.2023

Поступила после рецензирования 16.01.2023

Принята к публикации 16.01.2023

Об авторах:

Панфилов Алексей Викторович, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ScopusID](https://orcid.org/0009-0001-9210-1000), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9210-1000), panfilov@ikcmvsl.ru

Николаев Николай Николаевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ResearcherID](https://orcid.org/0009-0001-9210-1000), [ScopusID](https://orcid.org/0009-0001-9210-1000), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9210-1000), nneks@yandex.ru

Юсупов Александр Рашидович, старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника», Донского государственного технического университета (РФ, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9210-1000), temple_black@mail.ru
<https://www.bps-journal.ru>

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ScopusID](#), [ORCID](#), korot@novoch.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Панфилов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования; Н. Н. Николаев — подготовка данных, подготовка текста, формирование выводов; А. Р. Юсупов — подготовка данных, подготовка текста, подготовка иллюстраций; А. А. Короткий — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.