

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕФЕКТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СТАЛЬНОГО КАНАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Короткий А.А., Панфилов А.В., Хван Р.В., Юсупов А.Р.

Донской государственный технический университет, Ростов-на Дону

Ключевые слова: дефекты стальных канатов, браковочные показатели, работоспособность каната, искусственные нейронные сети, интегральный метод, эксплуатационные факторы.

Аннотация. Существует проблема учета комбинации нескольких дефектов и их взаимного влияния при контроле и браковке стальных канатов. В существующих стандартах даны рекомендации точечного характера для учета совместного влияния дефектов на работоспособность канатов. Цель работы – разработка метода оценки влияния различных комбинаций дефектов на работоспособность стального каната с использованием искусственных нейронных сетей. Использование нейронных сетей позволило дать комплексную оценку степени повреждения стальных канатов, основанную на опыте эксплуатации стальных канатов (статистическая база данных), экспертной оценке, рекомендациях существующих стандартов, функциональных и корреляционных зависимостях.

INTEGRAL METHOD OF ASSESSING DEFECTS ON THE OPERABILITY OF STEEL ROPE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Korotkiy A.A., Panfilov A.V., Khvan R.V., Yusupov A.R.

Don State Technical University, Rostov-on-Don

Keywords: defects of steel ropes, rejection indicators, rope operability, artificial neural networks, integral method, operational factors.

Abstract. There is a problem of taking into account the combination of several defects and their mutual influence in the control and rejection of steel ropes. In the existing standards, recommendations of a point nature are given to take into account the joint effect of defects on the operability of ropes. The aim of the work is to develop a method for assessing the impact of various combinations of defects on the performance of a steel rope using artificial neural networks. The use of neural networks made it possible to give a comprehensive assessment of the degree of damage to steel ropes, based on the experience of operating steel ropes (statistical database), expert assessment, recommendations of existing standards, functional and correlation dependencies.

Введение

РД РОСЭК 012-97 «Канаты стальные. Контроль и нормы браковки» содержит требования по браковке стальных канатов различного назначения. Документ содержит в себе справочные таблицы и рекомендации, позволяющие определять браковочные показатели по различным критериям. Основные виды дефектов стальных канатов и их допустимые значения занесены в таблице 1 [1].

При этом исходными данными при определении браковочных показателей являются: режим работы механизма подъема, согласно паспорту крана и конструкция каната, определенная по сертификату на канат по ГОСТ 2688-80 [2].

Существует проблема учета комбинации нескольких дефектов и их взаимного влияния при контроле и браковке стальных канатов. В существующих стандартах даны рекомендации точечного характера для учета совместного влияния дефектов на работоспособность канатов.

В вышеупомянутом руководящем документе [1] даются следующие рекомендации:

– при наличии у каната поверхностного износа или коррозии допустимое число обрывов проволок должно быть уменьшено в соотношении с процентом износа (при износе 30% – допустимое число обрывов проволок уменьшается на 50%);

– износ одной проволоки на 40% и более приравнивается к обрыву;

– канат, у которого направление спирали волнистости совпадает с направлением свивки каната, бракуется при единичном обрыве проволоки на данном участке.

Табл. 1. Основные виды дефектов стальных канатов

Обозначение	Браковочный показатель	Предельное значение
X1	Обрывы наружных проволок	Число обрывов на фиксированной длине $6d, 30d$, где d – диаметр стального каната
X2	Поверхностный износ каната	Уменьшение диаметра каната на 7%. Уменьшение диаметра наружных проволок на 40% и более
X3	Поверхностная коррозия каната	Уменьшение диаметра каната на 7%. Уменьшение диаметра наружных проволок на 40% и более
X4	Местное уменьшение диаметра каната	Уменьшение на 3% диаметра каната
X5	Местное увеличение диаметра каната	Увеличение на 7% диаметра каната
X6	Волнистость	При $d_g \geq 1,08d_k$. В остальных случаях при $d_g \geq 1,33d_k$
X7	Температурное воздействие	Форма дефекта и цветовая гамма повреждения
X8	Кручение	Эксплуатация запрещена
X9	Удлинение (остаточное)	Более чем на 0,5% рабочей длины
X10	Дефекты уравнивающих устройств	Отклонения положения и формы от первоначального значения

В ГОСТ 33718-2015 «Проволочные канаты. Уход и техническое обслуживание, проверка и отбраковка» [3] в справочном Приложении Д предлагается следующий метод оценки влияния комбинации нескольких дефектов на степень повреждения каната:

1) определить степень повреждения каждого выявленного дефекта на фиксированном участке каната в процентах от предельных значений;

2) суммировать проценты степени повреждения всех выявленных дефектов на фиксированном участке каната;

3) при достижении степени повреждения каната 100% – канат бракуется.

При этом приводится пример: наличие на одном участке каната обрывов проволок со степенью повреждения 40% и увеличения диаметра со степенью повреждения 40% (суммарно 80%) менее опасно, чем наличие обрывов проволок со степенью повреждения 80%. Также дается следующий комментарий: метод является достаточно простым, но не единственным способом оценки состояния каната. Компетентный специалист может использовать собственный способ оценки комбинации нескольких дефектов.

Материалы и методы исследований

Нами предлагается использовать искусственные нейронные сети (ИНС) для комплексной оценки влияния различных дефектов на состояние стальных канатов и возможность их дальнейшей эксплуатации [4, 5]. На рисунке 1 представлена схема учета комбинации нескольких дефектов (браковочных показателей) стальных канатов с использованием нейронных сетей.

В настоящее время проблемы управления надежностью и безопасностью технических систем, диагностики их технического состояния находят свое решение с помощью современных средств искусственного интеллекта [6-9].

Нейронная сеть, представленная на рисунке 1, состоит из входного слоя, двух скрытых (промежуточных) слоев и выходного слоя. Во входной слой входят девять нейронов, соответствующих девяти браковочным показателям стального каната из таблицы 1. Выходной слой содержит три нейрона, соответствующих трем возможным состояниям каната: 1. Работоспособное – эксплуатация разрешена. 2. Дефекты в допустимых пределах – эксплуатация разрешена с ограничениями. 3. Достиг предельного состояния – эксплуатация запрещена.

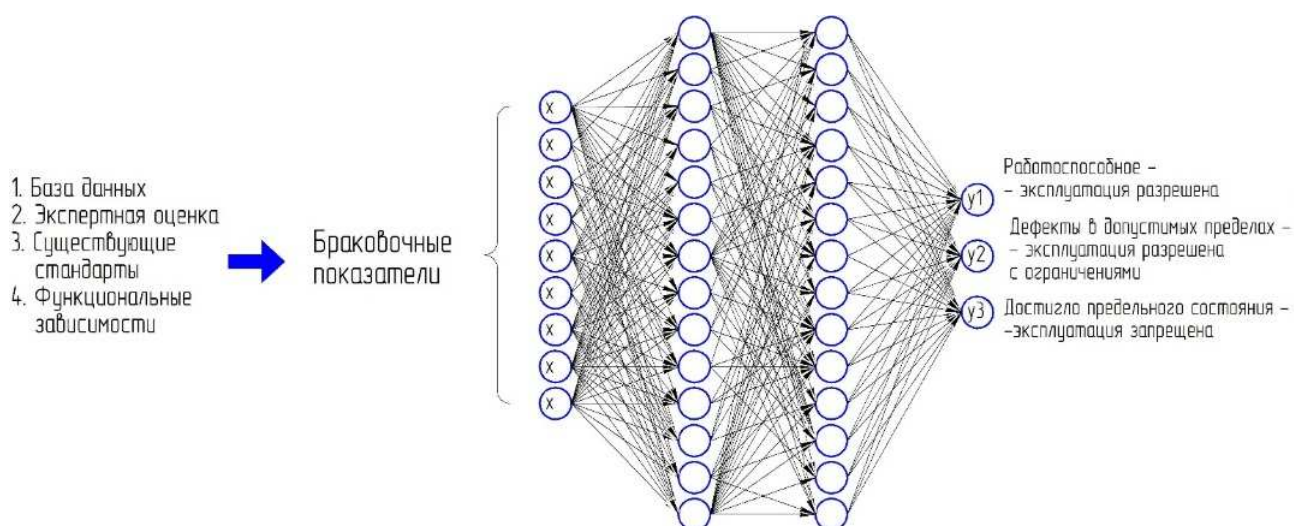


Рис. 1. Схема учета комплекса браковочных показателей стальных канатов с использованием ИНС

Использование нейронных сетей позволит дать комплексную оценку степени повреждения стальных канатов, основанную на опыте эксплуатации стальных канатов (статистическая база данных), экспертной оценке, рекомендациях существующих стандартов, функциональных и корреляционных зависимостях [10].

Подготовлено 100 обучающих выборок (в таблице 2 представлен неполный набор выборок) для нейронной сети. Входной слой нейронной сети включает в себя 16 параметров (X1-X16). Выходной слой состоит из трех параметров (нейронов) соответствующих трем возможным состояниям стального каната: «1» – работоспособное, эксплуатация разрешена (зеленый цвет); «2» – дефекты в допустимых пределах, эксплуатация разрешена с ограничениями (желтый цвет); «3» – достиг предельного состояния, эксплуатация запрещена (красный цвет).

Табл. 2. Выборки данных для обучения нейронной сети

№ п/п	X1	X2	X3	...	X10	Состояние	n_{cm}	D/d	$v, \text{ м/с}$	$\sigma, \text{ МПа}$	$N, \text{ ц/сут}$	$H, \text{ м}$
							X11	X12	X13	X14	X15	X16
1	66	0	36	0	0	3	11	86	4	1540	612	782
2	10	0	10	0	0	1	7	94	9	1524	262	77
3	0	100	0	74	0	3	12	111	9	1372	235	697
4	83	0	0	0	0	2	8	107	10	1777	614	150
5	45	100	0	7	0	3	6	85	12	1540	611	952
6	0	31	31	0	34	2	6	86	12	1250	400	150
7	0	65	90	81	0	3	9	112	4	1214	202	579
8	19	0	0	0	0	1	12	85	9	1458	382	267
9	0	56	0	0	0	1	9	97	12	1744	405	100
10	0	61	0	0	0	2	6	113	5	1644	241	308
.....	0	15	0	70	0	1	12	92	11	1479	351	134
98	0	33	0	0	0	2	11	80	8	1545	491	262
99	0	0	76	0	0	3	8	120	6	1332	339	177
100	0	0	28	0	0	3	8	103	11	1507	679	150

Примечание: n_{cm} – статический запас прочности каната; D/d – отношение диаметра шкива к диаметру каната; v – скорость подъема; σ – временное сопротивление проволоки; N – число циклов подъема в сутки; H – высота подъема.

Первые 10 входных параметров (X1-X10) являются браковочными показателями стальных канатов, выраженных в процентах от предельных значений. То есть, таким образом, учитывается комбинация различных дефектов. Каждой такой комбинации соответствует определенное состояние каната. Данная статистика была получена посредством опросных

листов экспертов в области оценки технического состояния стальных канатов. На первом этапе нейронная сеть обучена только на браковочных показателях стальных канатов. Для построения и обучения нейронных сетей использован язык программирования Python, и бесплатная библиотека программного обеспечения для машинного обучения Scikit-learn.

Результаты

После обучения нейронной сети был проведен анализ чувствительности выходных параметров сети (состояние каната) к входным параметрам (браковочным показателям). Результаты приведены в таблице 3, из которой видно, что наиболее значимыми браковочными показателями оказались обрывы наружных проволок, износ наружных проволок и поверхностная коррозия стального каната.

Для проверки работы нейронной сети было подготовлено 10 тестовых выборок браковочных показателей и соответствующих им состояний канатов. Результаты работы нейронной сети на 10-ти тестовых выборках представлены в таблице 4. В столбце «Состояние каната – Целевая» – заранее известное состояние каната; в столбце «Состояние каната – Выход» – результат работы нейронной сети; последующие столбцы указывают доверительные вероятности определения того или иного состояния каната, которые соответствуют уровням активации выходных нейронов сети.

Табл. 3. Анализ чувствительности выходных параметров сети

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
49,3	45,0	38,4	30,8	30,6	29,9	30,2	28,0	25,7	22,4

Табл. 4. Результаты работы нейронной сети

Выборка (тест)	Целевая	Выход сети	Состояние каната - 1 (доверительный уровень)	Состояние каната - 2 (доверительный уровень)	Состояние каната - 3 (доверительный уровень)
1	3	3	0,21	0,21	0,58
2	2	2	0,22	0,57	0,21
3	2	2	0,22	0,56	0,22
4	2	2	0,29	0,46	0,25
5	3	3	0,21	0,22	0,57
6	1	1	0,57	0,22	0,21
7	3	3	0,21	0,22	0,57
8	3	3	0,15	0,42	0,43
9	2	2	0,21	0,58	0,21
10	1	2	0,39	0,41	0,20

Как видно из таблицы 4 нейронная сеть правильно определила состояние стального каната 9 раз из 10, т.е. тестовая производительность сети оказалась равна 90%. Целевое значение десятой тестовой выборки было «1» – работоспособное состояние, тогда как нейронная сеть определила его как «2» – эксплуатация разрешена с ограничениями (более частые проверки и техническое обслуживание). При этом среднее значение доверительного уровня определения состояния каната составило 0,53.

На втором этапе исследования во входной слой добавлены параметры (нейроны) с X11 по X16 соответствующие эксплуатационным факторам стальных канатов: n_{cm} – статический запас прочности каната; D/d – отношение диаметра шкива к диаметру каната; v – скорость подъема; σ – временное сопротивление проволоки; N – число циклов подъема в сутки; H – высота подъема. Статистические данные влияния эксплуатационных факторов на срок службы стальных канатов приведены в диссертационной работе [4] по более чем 1500 стальных канатов. Большой объем статистических данных был использован для построения корреляционных зависимостей срока службы канатов от эксплуатационных факторов. Уравнения множественной регрессии для срока службы канатов приведены в следующем виде:

– для канатов с органическим сердечником:

$$T_{1668} = 384,7 + 23,95 \cdot n_{cm} + 7,16 \cdot D/d - 5,05 \cdot v - 0,27 \cdot \sigma - 0,5 \cdot N - 0,35 \cdot H, \quad (1)$$

– для канатов с металлическим сердечником:

$$T_{7669} = 461,4 + 7,77 \cdot n_{cm} + 1,96 \cdot D/d - 10,76 \cdot v - 0,24 \cdot \sigma - 0,53 \cdot N - 0,34 \cdot H. \quad (2)$$

Корреляционные зависимости срока службы от эксплуатационных факторов каната обобщают результаты наблюдений более чем 1500 канатов и позволяют сформировать обучающие данные нейронной сети для дальнейшей комплексной оценки состояния каната.

В процессе обучения на вход нейронной сети были загружены 100 обучающих выборок, содержащих разнородные данные (10 браковочных показателей и 6 эксплуатационных факторов). Обучающие данные сформированы таким образом, что каждой комбинации браковочных показателей соответствуют, предположительно предопределившие текущее состояние каната, эксплуатационные факторы. Задача нейронной сети в процессе обучения обобщить загруженные данные для принятия верного решения о дальнейшей эксплуатации стального каната.

После обучения нейронной сети проведен анализ чувствительности состояния стальных канатов к входным параметрам сети (браковочным показателям и эксплуатационным факторам). Результаты представлены в таблице 5, Из которой видно, что наиболее значимыми параметрами оказались «X1» – обрывы наружных проволок; N – число циклов нагружения в сутки; «X6» – волнистость; H – высота подъема. Для проверки работы нейронной сети были также подготовлены 10 тестовых выборок. Результаты работы нейронной сети на 10-ти тестовых выборках сведены в таблице 6.

Табл. 5. Анализ чувствительности состояния стальных канатов

X1	X15	X6	X16	X5	X8	X3	X2	X4	X9	X14	X7	X13	X10	X11	X12
7,4	6,7	5,5	5,1	4,8	4,8	4,7	4,5	4,0	3,8	3,8	3,7	3,7	3,4	3,0	1,7

Табл. 6. Результаты работы нейронной сети 2

Выборка (тест)	Целевая	Выход сети	Состояние каната - 1 (доверительный уровень)	Состояние каната - 2 (доверительный уровень)	Состояние каната - 3 (доверительный уровень)
1	3	3	0,15	0,18	0,67
2	2	2	0,29	0,53	0,18
3	2	2	0,22	0,65	0,13
4	2	2	0,13	0,59	0,28
5	3	3	0,19	0,21	0,60
6	1	1	0,55	0,31	0,14
7	3	3	0,20	0,21	0,59
8	3	3	0,20	0,22	0,58
9	2	2	0,26	0,61	0,13
10	1	1	0,43	0,30	0,27

Из таблицы 6 видно, что нейронная сеть правильно определила состояние стального каната по браковочным показателям и эксплуатационным факторам в 10 из 10 случаях, т.е. тестовая производительность составила 100%. Это говорит о значительном влиянии добавления во входной слой сети эксплуатационных факторов на правильность определения состояния стальных канатов. При этом среднее значение доверительных уровней определения состояния канатов выросло с 0,53 до 0,58.

Выводы и перспектива исследования

Для более точной оценки степени повреждения стальных канатов предлагается использовать интеллектуальную систему поддержки принятия решений (ИСППР) для контроля состояния стальных канатов. Это позволит определять степень повреждения каната

не только по браковочным показателям, но и использовать для этих целей дополнительные разнородные данные.

ИСППР для контроля состояния стальных канатов представлена на рисунке 2.

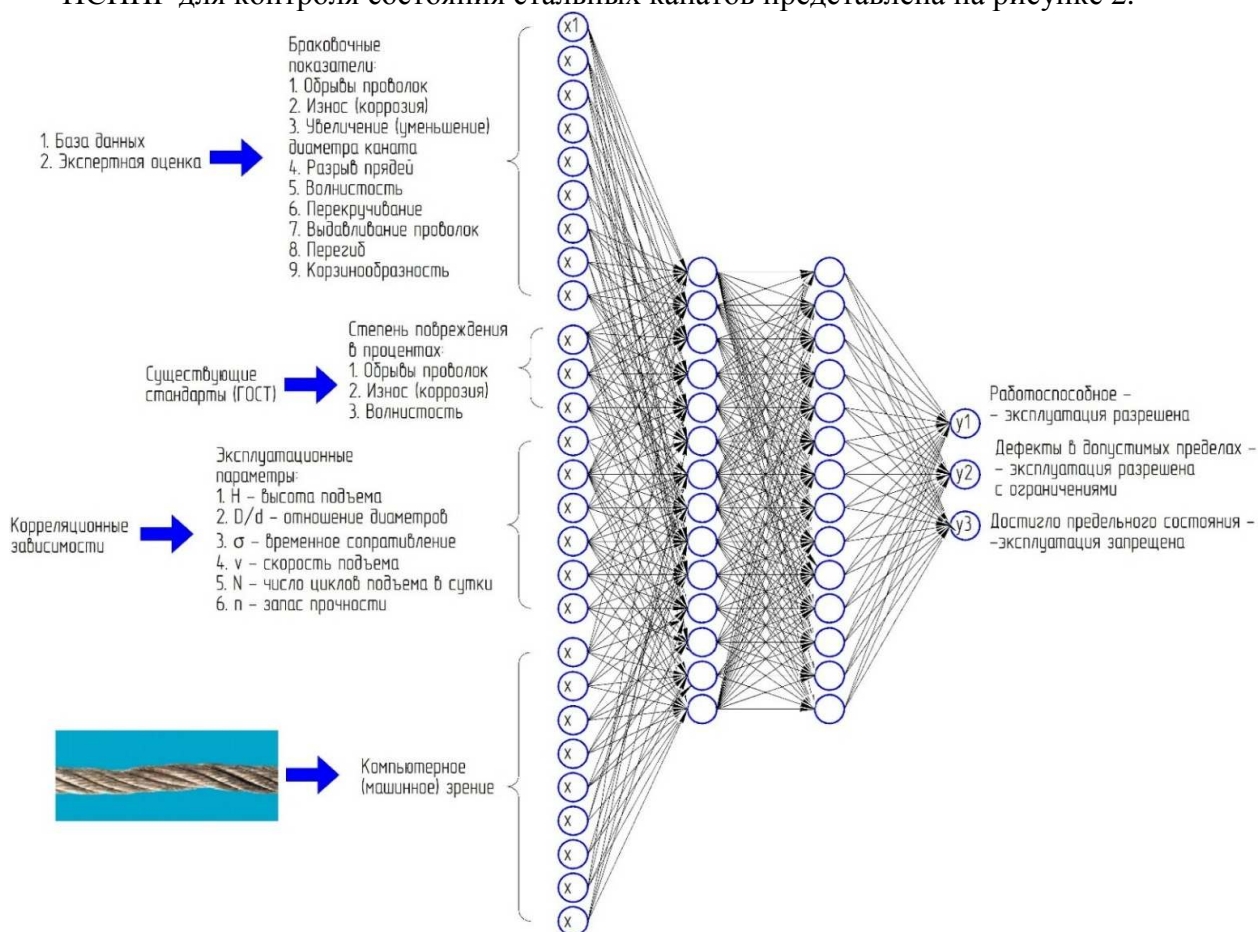


Рис. 2. Интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР) для контроля состояния стальных канатов

Система, представленная на рисунке 2, включает в себя комплекс разнородных данных, позволяющих дать соответствующую оценку состояния стальных канатов при совместном влиянии различных факторов, в том числе эксплуатационных.

На вход нейронной сети подаются браковочные показатели стального каната, суммарная степень повреждения (по различным дефектам) как рекомендуется в [3], а также эксплуатационные факторы, представленные в [4].

Перспективным направлением является применение компьютерного (машинного) зрения для диагностики состояния стальных канатов. Машинное зрение позволит выявлять браковочные показатели каната с помощью фотовидеофиксации части каната. Для этого необходимо заранее обучить нейронную сеть, используя базу данных фотографий различных дефектов стального каната.

Заключение

Таким образом, ИСППР для контроля состояния стальных канатов, вычислительным ядром которой является нейронная сеть, способна воспринимать и обрабатывать различные, разнородные данные (браковочные показатели, экспертную оценку, рекомендации государственных стандартов, корреляционные зависимости, результаты работы машинного зрения) для принятия верного решения о дальнейшей эксплуатации стального каната.

Представленный подход позволяет комплексно (интегрально) оценивать состояние стального каната не только по различным сочетаниям дефектов, но и с учетом различных эксплуатационных факторов для принятия верного решения о дальнейшей эксплуатации стального каната.

Список литературы

1. РД РОСЭК 012-97 Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. – М.: РОСЭК, 1997. – 49 с.
2. ГОСТ 2688-80. Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции 6x19(1+6+6/6)+1 о.с. Сортамент с Изменениями N1,2). – М.: Издательство стандартов, 2002. – 9 с.
3. ГОСТ 33718-2015. Краны грузоподъемные. Проволочные канаты. Уход и техническое обслуживание, проверка и отбраковка. – М.: Стандартиформ, 2016. – 45 с.
4. Короткий А.А. Исследование стойкости шахтных подъемных канатов с металлическим сердечником и разработка мероприятий по ее увеличению: Дисс. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1984. – 219 с.
5. Короткий А.А., Хван Р.В. Определение остаточного ресурса грузоподъемных машин с учетом деградации механических свойств стали и возможностей искусственного интеллекта // Актуальные проблемы науки и техники. 2021. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 613-614.
6. Воронцов В.А., Федоров Е.А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата // Труды МАИ. – 2015. – №82. – С. 35.
7. Горева Т.И., Портнягин Н.Н., Пюкке Г.А. Нейросетевые модели диагностики технических систем // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2012. – Вып. 1(4). – С. 31-43.
8. Жернаков С.В. Применение технологии нейронных сетей для диагностики технического состояния авиационных двигателей // Интеллектуальные системы в производстве. – 2006. – №2. – С. 70-83.
9. Викторова Е.В. Применение нечетких нейронных сетей для технической диагностики дорожных машин // Вестник ХНАДУ. – 2012. – №56. – С. 5.
10. Касьянов В.Е., Косенко Е.Е., Косенко В.В., Демченко Д.Б., Хван Р.В. Метод определения надежности машины с использованием интегрального показателя // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. – 2020. – №5. – С. 25-30.

References

1. RD ROSEK 012-97 Steel ropes. Control and standards of rejection. – M.: ROSEK, 1997. – 49 p.
2. GOST 2688-80. Double-twisted rope type LC-R design 6x19(1+6+6/6)+1 O.S. Assortment with Changes N1,2). – M.: Publ. house of Standards, 2002. – 9 p.
3. GOST 33718-2015 Lifting cranes. Wire ropes. Care and maintenance, inspection and rejection. – M.: Standartinform, 2016. – 45 p.
4. Korotkiy A.A. Investigation of the durability of mine lifting ropes with a metal core and the development of measures to increase it: Diss. ... cand. of tech. sc. – Novocherkassk, 1984. – 219 p.
5. Korotkiy, A.A., Khvan R.V. Determination of the residual life of lifting machines taking into account the degradation of the mechanical properties of steel and the capabilities of artificial intelligence // Actual problems of science and technology. 2021. Materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference. – Rostov-on-Don: DSTU, 2021. – P. 613-614.
6. Vorontsov V.A., Fedorov E.A. Development of a prototype of an intelligent system for operational monitoring and technical condition of the main onboard systems of the spacecraft // Proceedings of MAI. 2015, no. 82, p. 35.
7. Goreva T.I., Portnyagin N.N., Pyukke G.A. Neural network models of diagnostics of technical systems // Bulletin of KRAUNTS. Physical and Mathematical Sciences. 2012, iss. 1(4), pp. 31-43.
8. Zhernakov S.V. Application of neural network technology for diagnostics of the technical condition of aircraft engines // Intelligent systems in production. 2006, no. 2, pp.70-83.
9. Viktorova E.V. Application of fuzzy neural networks for technical diagnostics of road vehicles // Bulletin of KHNADU. 2012, no 56, p. 5.
10. Kasyanov V.E., Kosenko E.E., Kosenko V.V., Demchenko D.B., Khvan R.V. A method for determining the reliability of a machine using an integral indicator // Truck: transport complex, special equipment. 2020, no. 5, pp. 25-30.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Короткий Анатолий Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика»	Korotkiy Anatoly Arkadyevich – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of operation of transport systems and logistics
Панфилов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика»	Panfilov Alexey Viktorovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of operation of transport systems and logistics
Хван Роман Владимирович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика»	Khvan Roman Vladimirovich – candidate of technical sciences, assistant at the Department of operation of transport systems and logistics
Юсупов Александр Рашидович – старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника» khvanroman@yandex.ru	Yusupov Alexander Rashidovich – senior lecturer of the Department of robotics and mechatronics

Получена 23.01.2023