

НЕЙРО-НЕЧЕТКАЯ СЕТЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Побединский^{1, 2✉}, Г.А. Иовлев², С.В. Ляхов^{1, 3}, И.И. Голдина²

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, г. Екатеринбург,

ул. Сибирский тракт, д. 37

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», 620075, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42

³ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002,

г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

pobed@e1.ru

Рассмотрена проблема совершенствования технической эксплуатации транспортно-технологических машин, в частности диагностика технического состояния тракторных двигателей и определения его остаточного ресурса. Цель исследований заключалась в создании нейро-нечеткой сети для определения остаточного ресурса двигателей тракторов BELARUS-80.1/82.1 и ХТЗ-17221 по величине износов коленчатых валов двигателей. Был проведен анализ опыта использования приложений интеллектуальных систем для диагностирования транспортно-технологических машин и возможного их применения в других областях; экспериментально определен износ коленчатых валов тракторов; статистически обработаны экспериментальные данные и расчетно определен ресурс тракторов. Ресурсные показатели определялись для наиболее ответственного узла, коленчатого вала по главным параметрам — величине его износа в местах крепления шатунных и коренных шеек. Параметры износа в работе определены в ходе экспериментальных исследований с последующей статистической обработки. Получены функции распределений величины износа в четырех ответственных местах коленчатого вала. Экспериментальные данные послужили исходными данными для нейро-нечеткой сети, которая реализована в среде MATLAB. Представлены экспериментальные данные по износам агрегатов двигателей тракторов и полученные на их основе значения остаточного ресурса двигателей.

Ключевые слова: трактор BELARUS-80.1/82.1, трактор ХТЗ-17221, износ коленчатого вала, интеллектуальная система, нейро-нечеткая сеть

Ссылка для цитирования: Побединский В.В., Иовлев Г.А., Ляхов С.В., Голдина И.И. Нейро-нечеткая сеть для оценки остаточного ресурса тракторных двигателей // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 2. С. 120–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-120-130

В сельском хозяйстве России наиболее широко применяются тракторы малой мощности, преимущественно марки Минского тракторного завода (Белоруссия) — BELARUS-80.1/82.1. Кроме того, в эксплуатации находится большой парк тракторов Харьковского тракторного завода (Украина) — ХТЗ-17221. Такие тракторы, а также технологические машины на их базе находят применение и в лесопромышленном комплексе. Поскольку затраты на техническое обслуживание и ремонт тракторов во много раз превосходят расходы на покупку сельскохозяйственной техники, актуальность приобретает задача совершенствования ее технической эксплуатации. Стратегия технической эксплуатации максимально зависит от остаточного ресурса машины и прежде всего его энергосиловой установки — двигателя. Ресурс двигателя можно определить по износам шеек коленчатого вала, исследованию его посвящены многие работы [1–5]. При этом данные по износам коренных шеек коленчатых валов для моделей BELARUS-80.1/82.1 и ХТЗ-17221 отсутствуют. Получение таких данных позволит повысить эффективность технической эксплуатации благодаря правильно назначенному превентивному

обслуживанию техники, что повлечет за собой сокращение затрат на ее ремонт.

Конкретные значения износов требуют соответствующей интерпретации и установления функциональной их связи с показателями ресурса, что указывает на еще одну научную проблему. Главной причиной проблемы служит большое количество факторов, характеризующихся свойствами неопределенности с точки зрения математики и теории нечетких множеств и их взаимной связи с другими параметрами, а для задач с такими условиями предназначены методы интеллектуальных систем и нейросетей.

Использование интеллектуальных систем для диагностирования двигателей ныне привлекает внимание многих исследователей, поэтому идут активные разработки подобных им объектов. Особенность здесь состоит в том, что требуется индивидуальный подход в каждом конкретном случае, и в частности в рассматриваемом.

Для указанных двух моделей тракторов, прежде всего, необходимы данные по износу коленчатых валов, которые соответствующим образом следует обработать и выявить функциональную связь величины износов с показателями ресурса двигателя, считая, что наиболее достоверным может быть подход к решению проблемы подход

на основе интеллектуальных экспертных систем или нейросетей.

Цель работы

Цель работы — создание нейронной сети для определения ресурсов двигателей сельскохозяйственных тракторов BELARUS-80.1/82.1 и ХТЗ-17221 по износу коленчатых валов их двигателей.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1) проведение анализа опыта использования приложений интеллектуальных систем для диагностирования транспортно-технологических машин и возможного их применения в других областях практики;

2) экспериментальное определение износов коленчатых валов тракторов;

3) статистическая обработка экспериментальных данных и расчетное определение значений ресурсов тракторов;

4) подготовка экспериментальных данных для формирования обучающих выборок нейронной сети;

5) разработка нейронной сети;

6) глубокое обучение нейронной сети;

7) тестирование нейронной сети и проверка ее адекватности.

Исследования проводились с помощью теории эксперимента, методов оценки технического состояния тракторных двигателей и обработки статистических данных. Учет факторов неопределенностей в исходных параметрах и их формализацию осуществляли согласно теории нечетких множеств, а интеллектуальную систему разрабатывали по методам проектирования продукционных нейро-нечетких сетей гибридного типа ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System).

Результаты и обсуждение

Результаты анализа обзора работ по теме исследований. Вопросам совершенствования технической эксплуатации и диагностирования машин посвящены многие работы [6–10]. В частности, в работе [6] рассматривается проблема использования нейронных сетей и предлагается сверточная нейронная сеть для интеллектуального мониторинга состояния дизельных двигателей. Однако авторы анализируют отличительные особенности сигналов вибрации путем сверточного вычисления и операции объединения данных от нескольких отдельных нейронных сетей.

Анализ отказов техники и исследование особенностей детального повреждения коленчатого вала дизельного двигателя, особенности влияния фреттинг-износа на зарождение трещин в конструкции двигателя представлены в работе [1].

К тому же этими авторами исследовано влияние на надежность коленчатого вала крышки коренного подшипника и определено качество предварительной затяжки болтов.

Перспективы повышения доступности данных и облачных технологий для возможностей моделирования рабочих процессов в интеллектуальном производстве рассмотрены коллективом авторов [7]. В работе [7] предлагается структура анализа данных для диагностики основных причин первичного качества (FTQ), т. е. качество детали, измеренное впервые после выполнения всех процессов и операций на производственной линии. Авторами выполнен поиск ключевых факторов, влияющих на качество коленчатого вала двигателя. После предварительной обработки данных, полученных в реальном времени, и их анализа в работе [7] предложена модель на языке Python прогнозирования FTQ с помощью алгоритмов машинного обучения.

Причины зарождения и развития усталостной трещины, усталостного разрушения кривошипно-шатунного механизма дизельного двигателя, указаны в работе [2]. Исследования выполнялись с использованием метода конечных элементов, что позволило определить причину преждевременного усталостного разрушения, в частности установлена многоцикловая усталость материала во внешней зоне шейки кривошипа, для которой был рассчитан малый радиус конструкции. Кроме того, в этой работе сформулированы рекомендации по увеличению усталостной долговечности коленчатого вала.

Рациональная методика проведения испытаний коленчатого вала и соответствующее устройство для их проведения предложены в работе [8]. Авторами экспериментально определено статистическое распределение усталостных повреждений коленчатого вала, описанное наиболее достоверно для данных испытаний с помощью трехпараметрического распределения Вейбулла.

Все перечисленные результаты исследований дополняют имеющиеся знания о проблеме усталостной прочности коленчатого вала.

Модельная оценка сил реакции в упругой системе, поддерживающей крупногабаритные коленчатые валы, предложена в работе [9], авторы которой в своих исследованиях использовали математические модели (функции полигармонического, сплайнового полигармонического и моногармонического вида), для определения геометрических измерений коленчатых валов. Доказано, что моногармоническая модель достаточно адекватно описывает экспериментальные исходные данные для исследуемого коленчатого вала. При различных положениях в процессе вращения коленчатого вала для определения сил реакции опоры использовался метод конечных элементов.

Дефектам коленчатого вала дизельного двигателя посвящена работа [3]. В ходе экспериментальных исследований были выявлены микротрещины в его конструкции и проанализированы причины с помощью метода конечных элементов. Полученные в ходе исследований результаты позволили сделать вывод о том, что основной причиной преждевременного износа двигателя являются резонансные колебания коленчатого вала.

В работе [4] представлены результаты анализа усталостного разрушения коленчатого вала, выполненного как теоретическим, так и экспериментальным методом. Определены высокие напряжения в его конструкции, которые обусловили усталостные разрушения.

Оценка усталостных характеристик коленчатого вала дизельного двигателя, накатанного на галтели, выполнена в работе [11]. Исследованы влияние конструкционных материалов, типа прокатки высокопрочного чугуна и уровней напряжений на усталостные характеристики коленчатых валов. Расчеты выполнены по методу конечных элементов.

Исследования природы стохастического усталостного разрушения коленчатого вала двигателя автомобиля изложены в аналитическом обзоре [5]. Отмечен факт наличия неопределенностей в параметрах, влияющих на усталостную долговечность конструкции. Указаны факторы случайной природы, которые вносятся прочностными параметрами конструкционных материалов, геометрическими параметрами конструкции и величиной рабочих нагрузок. Обзор предоставляет базу для понимания стохастического усталостного разрушения и прогнозирования структурной целостности элементов конструкции коленчатых валов.

Исследованию долговечности и надежности, необходимому на первом этапе проектирования дизельного двигателя, посвящена работа [10]. Обобщен комплексный подход к анализу долговечности и надежности системы двигателя.

Сравнительное исследование критериев усталости для прогнозирования разрушения конструкции двигателя приведено в работе [12]. Авторы разработали численную процедуру для прогнозирования усталостного разрушения головки блока цилиндров. При этом выявили, что значительного превосходства между рассматриваемыми моделями многоосной усталости не наблюдается.

Новый подход к совершенствованию моделей для двигателей среднего объема с искровым зажиганием с использованием нейронных сетей изложен в работе [13]. Исследования проводились с помощью современных методов моделирования с использованием концепции нейронных сетей, которые реализованы в среде Simulink. В конечном итоге, такие модели смогут точно прогнозировать

выходные данные двигателя (установившиеся и переходные состояния), в частности динамические нагрузки, крутящий момент и скорость работы двигателя в реальном времени.

Причины отказов коленчатых валов дизельных двигателей изучены авторами работы [14]. В конструкциях кованных, нормализованных и частично закаленных коленчатых валов рассмотрено влияние на усталостную прочность химического состава, микроструктуры, свойств при растяжении и вязкости по Шарпи, а также значения твердости. С помощью фрактографических исследований были предприняты попытки оценить уровень напряжения, который приводит к дальнейшему развитию усталости в области галтели шатунной шейки и перегородки. Даны рекомендации по обработке валов и конструктивным параметрам.

Анализ обзора исследований показывает, что проблема оценки долговечности была и остается актуальной, однако подавляющее большинство работ посвящено изучению механизма накопления усталостных разрушений. Наиболее популярными для численной оценки этого процесса являются компьютерные программы, разработанные на основе метода конечных элементов. Публикации за 2015–2021 гг. демонстрируют все большую популярность нейронных сетей, но для реализации той же проблемы изучения механизма развития усталостных повреждений. Важным моментом для этих работ является указание на неопределенность влияющих факторов при оценке долговечности. Как известно [15–18], для решения такого класса задач самым эффективным инструментарием является аппарат интеллектуальных систем в виде экспертных систем или нейронных сетей. Несмотря на эффективность методов на основе интеллектуальных систем и нечеткой логики, в российской науке в области диагностирования двигателей тракторов указанных марок в целях оценки остаточного ресурса такие работы практически отсутствуют.

Таким образом, создание способов оценки технического состояния двигателей и их остаточного ресурса у тракторных двигателей моделей BELARUS-80.1/82.1 и ХТЗ-17221 с учетом факторов неопределенности является важной научно-практической проблемой, а отсутствие разработок по этой теме не позволяет эффективно решать проблему и представляет собой препятствие для дальнейшего совершенствования технической эксплуатации ТТМ и конструкции их двигателей.

Проведение экспериментов и обработка статистических данных. Экспериментальные исследования были проведены в условиях ПАО «Каменское» (Свердловская обл.) при ТО-3 на тракторах с наработкой до 5000 моточас, пред-

Т а б л и ц а 1

Сгруппированные значения износа четырех ответственных мест коленчатого вала

Grouped wear values of the four critical points of the shaft

1-я коренная шейка						
Величина износа, мм	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
Количество замеров, ед.	4	14	28	21	11	2
Шатунные шейки по оси симметрии						
Величина износа, мм	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13
Количество замеров, ед.	8	15	19	19	13	6
Щеки шатунных шеек в плоскости поперечной к оси симметрии						
Величина износа, мм	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
Количество замеров, ед.	9	16	25	22	7	2
4-я коренная шейка						
Величина износа, мм	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	
Количество замеров, ед.	6	20	28	16	7	

шествующей капитальному ремонту. Ремонтно-механический завод обслуживает парк техники, включающий в себя около 1000 тракторов в год, в основном марок BELARUS-80.1/82.1 и ХТЗ-17221. Одновременно исследовали двигатели автомобилей КАМАЗ при текущем ремонте с пробегом до 200 тыс. км и автомобилей ГАЗ-3309 с пробегом 150 тыс. км.

В ходе исследований в разобранных двигателях были измерены параметры коренных и шатунных шеек коленчатых валов для определения их износа. По каждому параметру определен статистический ряд замеров. Созданная база статистических рядов обработана для получения гистограмм распределения случайной величины. Число интервалов гистограмм рассчитано по формуле Стерджесса (табл. 1). Определен вид наилучшей функции статистического распределения по критерию χ^2 (хи-квадрат).

В результате статистической обработки в среде Distribution Tools приложения MATLAB [19] по закону нормального распределения получены распределения случайных величин износа (рис. 1) со следующими параметрами:

– 1-й коренной шейки: математическое ожидание — $m = 0,067$, дисперсия — $\sigma = 0,023$;

– щеки шатунных шеек по оси симметрии: $m = 0,078$, $\sigma = 0,028$;

– щеки шатунных шеек в плоскости, поперечной к оси симметрии: $m = 0,062$, $\sigma = 0,024$;

– 4-й коренной шейки: $m = 0,059$, дисперсии $\sigma = 0,021$.

С использованием полученных статистических данных был рассчитан остаточный ресурс двигателей согласно методике, изложенной в методических указаниях [20, 21].

Постановка задачи оценки остаточного ресурса с использованием нейросети. Оценка остаточного ресурса R определяется на основе

данных по износам X_1, X_4 1-й и 4-й коренной шейки коленчатого вала, а также износам шатунной шейки по оси симметрии X_2 , и в поперечной к оси симметрии плоскости X_3 . По этим данным формируются обучающие выборки нейронной сети.

Формально постановка задачи выглядит следующим образом

$$R = f(X_1, X_2, X_3, X_4). \quad (1)$$

Для решения задачи с использованием нейронной сети следует определить обучающие выборки входных и значения выходного параметров. Рекомендованное количество примеров обучающего множества Q можно рассчитать по формуле [7]

$$Q = 7N_x + 15, \quad (2)$$

где N_x — количество входных переменных сети.

В отношении формулы (2) автор работы [15] отмечает, что она приемлема для построения регрессионных моделей, а для нейронных сетей эмпирически определено достаточное количество примеров, которое в 2–4 раза меньше.

В рассматриваемом случае обучение, т. е. обеспечение приемлемой точности, было достигнуто на 10 примерах (табл. 2, 3).

Таким образом, в качестве входных и выходных параметров нейросети для двигателей трактора BELARUS-80.1/82.1 были определены следующие показатели:

– износ 1-й коренной шейки X_1 — от 0,02 до 0,11 мм;

– износ шатунной шейки по оси симметрии X_2 — от 0,02 до 0,11 мм;

– износ шатунной шейки в поперечной к оси симметрии плоскости X_3 — от 0,03 до 0,12 мм;

– износ 4-й коренной шейки X_4 — от 0,01 до 0,10 мм.

Выходной переменной является ресурс R — от 360 до 1640 моточасов.

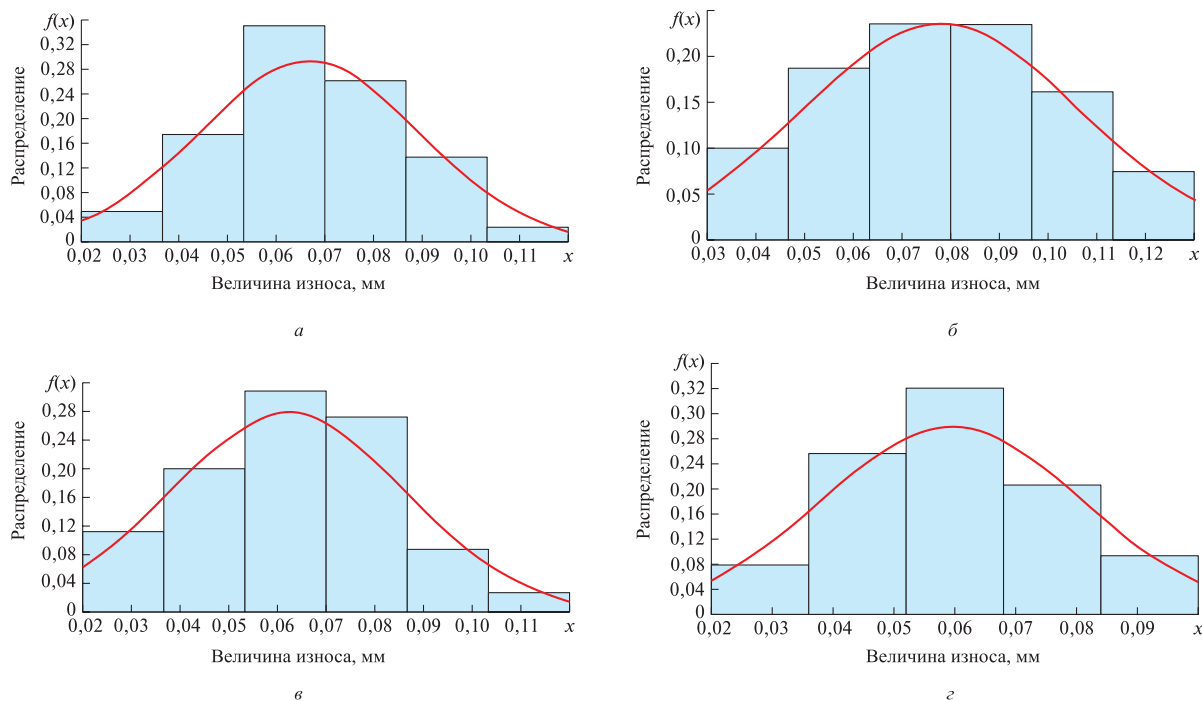


Рис. 1. Статистическое распределение значения износа: *a* — 1-й коренной шейки (математическое ожидание — $m = 0,067$, дисперсия — $\sigma = 0,023$); *б* — шек шатунных шеек по оси симметрии ($m = 0,078$, $\sigma = 0,028$); *в* — шек шатунных шеек по оси симметрии ($m = 0,062$, $\sigma = 0,024$); *г* — 4-й коренной шейки ($m = 0,059$, $\sigma = 0,021$)

Fig. 1. Statistical distribution of the wear value: *a* — of the 1st main journal (mathematical expectation — $m = 0,067$, variance — $\sigma = 0,023$); *б* — of the connecting rod jaws necks along the axis of symmetry ($m = 0,078$, $\sigma = 0,028$); *в* — of the connecting rod jaws necks along the axis of symmetry ($m = 0,062$, $\sigma = 0,024$); *г* — of the 4th main journal ($m = 0,059$, $\sigma = 0,021$)

Т а б л и ц а 2

Значения износа, вероятность появления случайной величины $P(x)$ и ресурс коленчатого вала двигателя трактора BELARUS-80.1/82.1

Wear values, probability of occurrence of a random variable $P(x)$ and the resource of the crankshaft of the tractor BELARUS-80.1/82.1

№ п/п	Износ				Ресурс R, моточас
	1-й коренной шейки X_1 , мм	шатунной шейки по оси симметрии X_2 , мм	шатунной шейки в поперечной к оси симметрии плоскости X_3 , мм	4-й коренной шейки X_4 , мм	
1	0,02	0,03	0,02	0,01	1640
2	0,03	0,04	0,03	0,02	1470
3	0,04	0,05	0,04	0,03	1180
4	0,05	0,06	0,05	0,04	1010
5	0,06	0,073	0,056	0,05	800
6	0,07	0,08	0,07	0,06	730
7	0,08	0,09	0,08	0,07	620
8	0,09	0,10	0,09	0,08	520
9	0,10	0,11	0,10	0,09	430
10	0,11	0,12	0,11	0,10	360

Для двигателей трактора ХТЗ-17221 входные данные определены в тех же пределах, как и для двигателей BELARUS-80.1/82.1, а для выходной переменной ресурс R — от 300 до 1540 моточас.

Разработка нейронной сети. Интеллектуальную систему в рассматриваемом случае строим в виде адаптивной нейро-нечеткой продукционной сети типа ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Ее преимущество перед

**Значения износа, вероятность появления случайной величины $P(x)$
и ресурс коленчатого вала двигателя трактора ХТЗ-17221**

**Wear values, probability of occurrence of a random variable $P(x)$
and the resource of the crankshaft of the tractor engine HTZ-17221**

№ п/п	Износ				Ресурс R , моточас
	1-й коренной шейки X_1 , мм	шатунной шейки по оси симметрии X_2 , мм	шатунной шейки в поперечной к оси симметрии плоскости X_3 , мм	4-й коренной шейки X_4 , мм	
1	0,02	0,03	0,02	0,01	1540
2	0,03	0,04	0,03	0,02	1290
3	0,04	0,05	0,04	0,03	1100
4	0,05	0,06	0,05	0,04	1010
5	0,06	0,073	0,056	0,05	780
6	0,07	0,08	0,07	0,06	660
7	0,08	0,09	0,08	0,07	550
8	0,09	0,10	0,09	0,08	460
9	0,10	0,11	0,10	0,09	380
10	0,11	0,12	0,11	0,10	300

простой нейронной сетью состоит в том, что она обладает свойствами как продукционных нечетких систем, основанных на базе правил, так и простых сетей, которые при работе не используют базу правил. По этому признаку сеть ANFIS относится к гибридным системам.

Для реализации модели использована среда *anfisedit* — одно из приложений (Toolbox) системы MATLAB [19]. Процесс создания сети ANFIS приведен на рис. 2, *a–d*. Вначале создается файл формата *.dat* с исходными данными в виде матрицы (рис. 2, *a*) и загружается в систему. Затем определяется структура сети, основанной на правилах с нечетким выводом по методу Сугено (рис. 2, *b*) и выполняется корректировка лингвистических переменных для всех входных параметров (рис. 2, *в*). Следует отметить, что корректировка лингвистических переменных может не выполняться, т. к. они могут приниматься по умолчанию. Но в этом случае все термножества будут треугольного типа. Запускается генерация сети, выводится ее структура (рис. 2, *г*) и база правил. Созданная база правил показана на визуальной форме пользовательского интерфейса (рис. 2, *д*).

После создания сети выполняется ее обучение (тренировка, как записано в меню интерфейса). В данном случае обучение обеспечивает точность — если исходить из примера первой выборки, то до третьего знака после запятой (рис. 3, *a, б*). Физически такая точность означает, что определен ресурс с точностью до 1 моточаса (см. рис. 3, *б*). Следовательно, сеть настроена и для оценки ее адекватности была выполнена проверка на

тестовых примерах. Параметры тестовых примеров были заданы в рабочей области MATLAB.

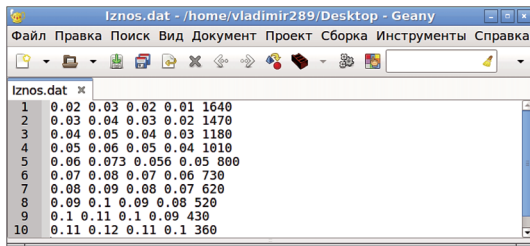
Так, для выборки $X_1 = 0,065$ мм, $X_2 = 0,075$ мм, $X_3 = 0,065$ мм, $X_4 = 0,055$ мм, $R = 793$ моточас (см. рис. 3, *б*) получено по традиционной методике расчетное значение $R = 787$ моточас, которое практически совпадает с исходным значением в тестовом примере. Задавая другие тестовые примеры по модели, можно получить значения, согласующиеся с результатами расчетов и экспериментальными данными (с расхождениями не более 0,05 %).

Такая точность обеспечивается в области значений, близких к значениям обучающей выборки. Если погрешность будет увеличиваться по мере большего отклонения тестовых значений от обучающихся, то следует провести переобучение сети с новыми данными.

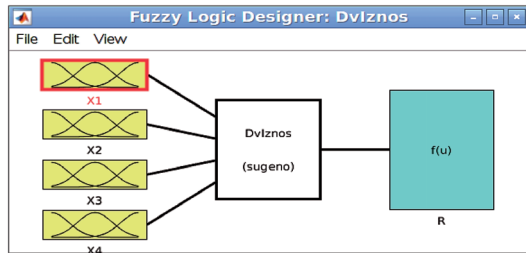
Некоторые зависимости ресурса двигателя трактора BELARUS-80.1/82.1 от износа элементов по результатам расчетов по нейронной сети приведены на рис. 4. Двухмерные графики получены от двух входных переменных, а две другие были закреплены на нулевом значении.

По методике, аналогичной вышеописанной, была разработана нейро-нечеткая сеть для определения ресурса двигателя трактора ХТЗ-17221. Полученные по этой нейронной сети зависимости приведены на рис. 5.

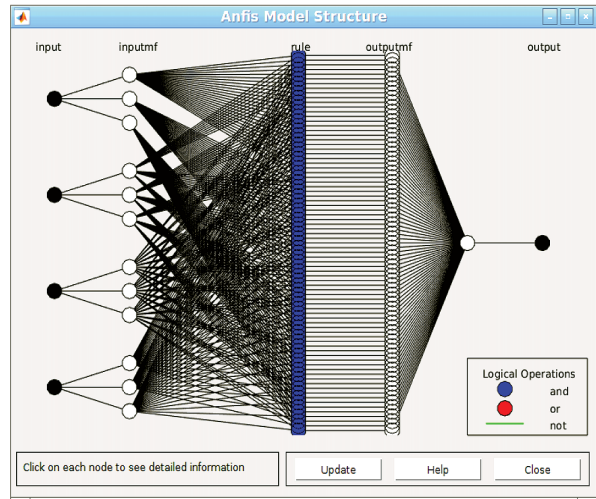
На графиках построены гиперповерхности функции ресурса также в зависимости от двух значений износа, при этом два других принимаются равными нулю.



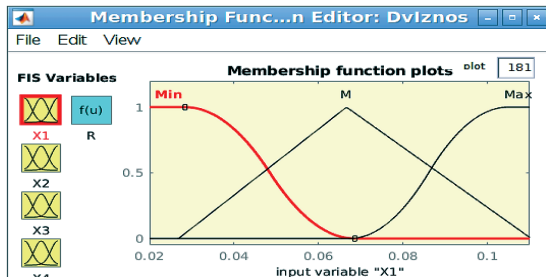
a



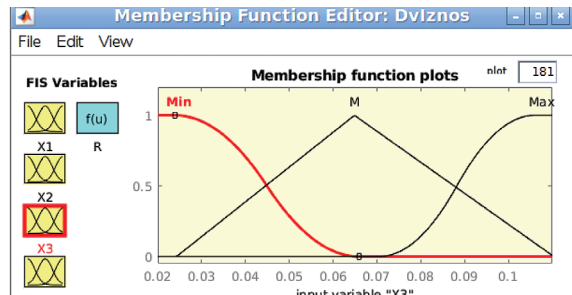
b



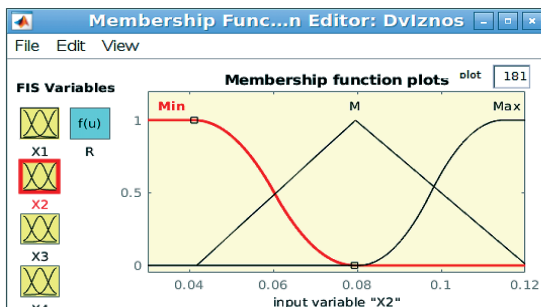
в



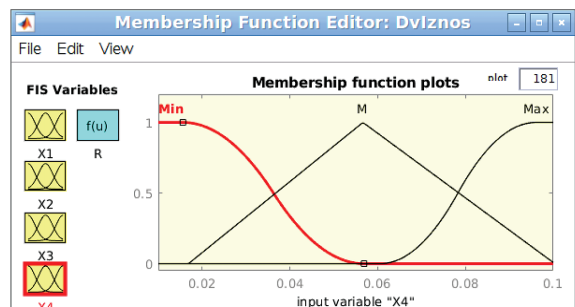
Переменная X_1



Переменная X_3

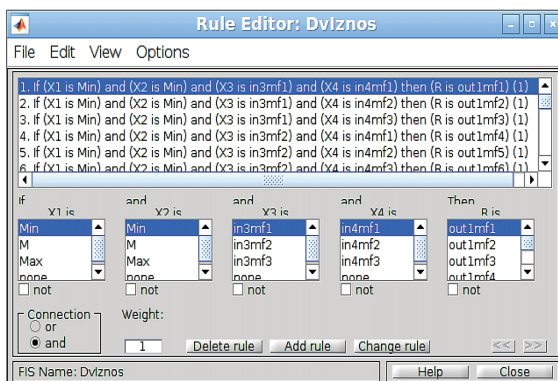


Переменная X_2



Переменная X_4

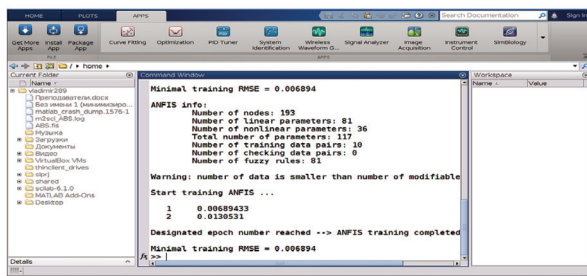
2



д

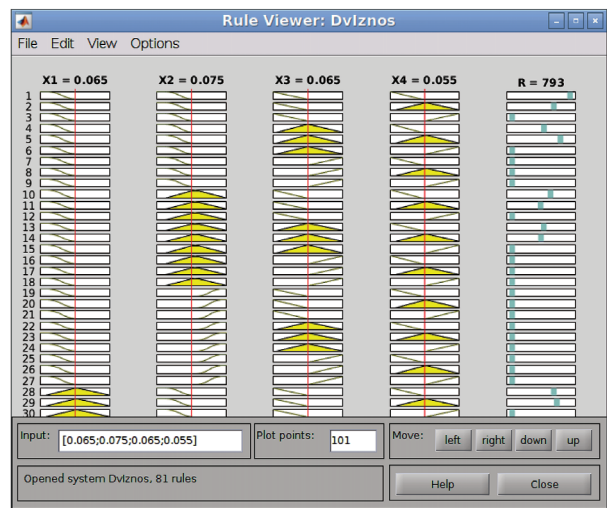
Рис. 2. Создание нейро-нечеткой сети ANFIS: а — создание файла с исходными данными; б — задание структуры сети и метода нечеткого вывода (Сугено); в — генерация нейронной сети; г — корректирование лингвистических переменных для всех входных параметров X_1-X_4 ; д — генерация базы правил

Fig. 2. Creation of ANFIS neural fuzzy network: a — creation of a file with initial data; б — setting the network structure and the method of fuzzy inference (Sugeno); в — neural network generation; г — correction of linguistic variables for all input parameters X_1-X_4 ; д — generation of the base of rules

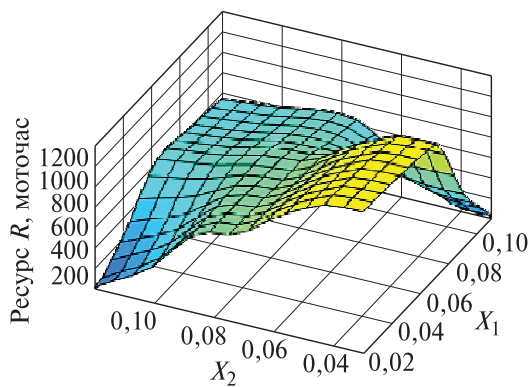


a

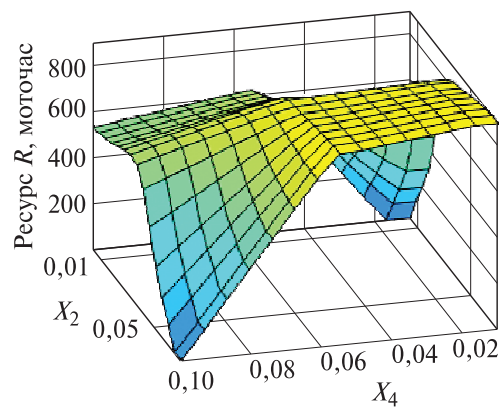
Рис. 3. Обучение нейронной сети и проверка на тестовых примерах: *a* — обучение сети и настройка под допустимое значение ошибки; *б* — проверка адекватности по тестовым примерам в процедуре Rule Viewer



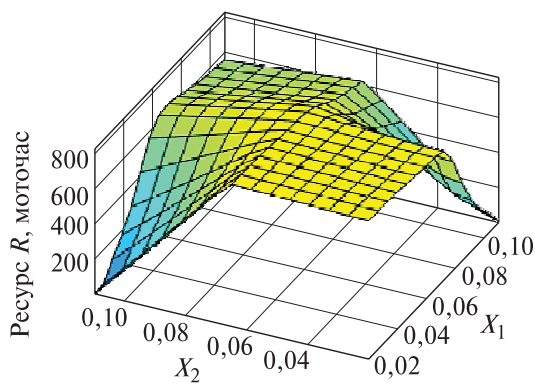
б



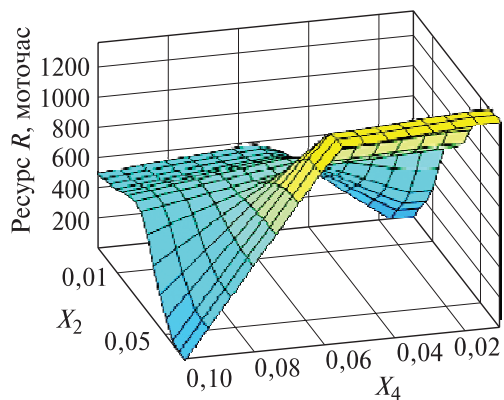
a



б



в



г

Рис. 4. Результаты расчетов по нейронной сети зависимости ресурса двигателя трактора BELARUS-80.1/82.1 от износа элементов: *a* — $R = f(X_1, X_2)$; *б* — $R = f(X_1, X_4)$; *в* — $R = f(X_1, X_3)$; *г* — $R = f(X_2, X_4)$

Fig. 4. Results of calculations for the neural network dependence of the engine resource of the BELARUS-80.1/82.1 tractor on the wear of the elements: *a* — $R = f(X_1, X_2)$; *б* — $R = f(X_1, X_4)$; *в* — $R = f(X_1, X_3)$; *г* — $R = f(X_2, X_4)$

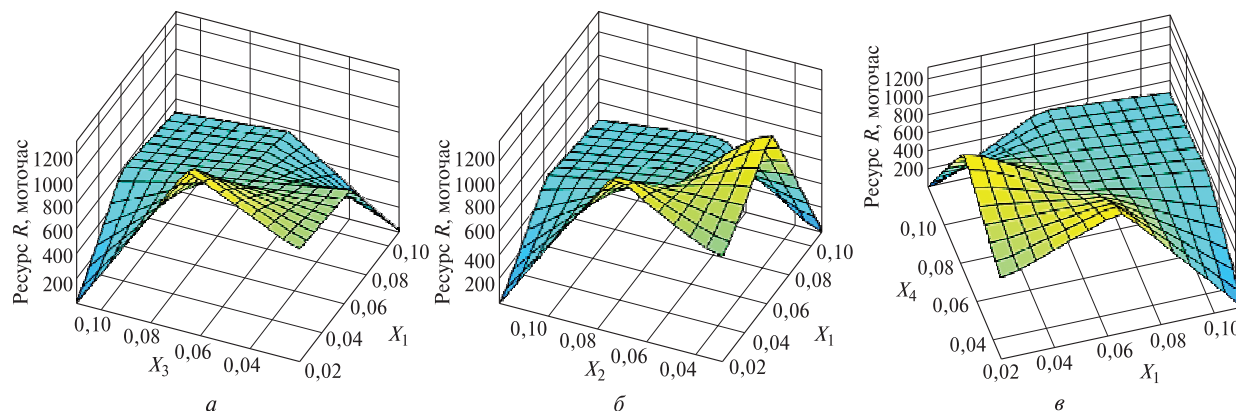


Рис. 5. Результаты расчетов по нейронной сети зависимости ресурса двигателя трактора: ХТЗ-17221 от износа элементов: а — $R = f(X_1, X_3)$; б — $R = f(X_1, X_2)$; в — $R = f(X_1, X_4)$

Fig. 5. The results of calculations on the neural network of the dependence of the resource of the tractor engine: HTZ-17221 on the wear of the elements: а — $R = f(X_1, X_3)$; б — $R = f(X_1, X_2)$; в — $R = f(X_1, X_4)$

Выводы

При выполнении проектов технической эксплуатации тракторного парка, усовершенствования конструкций двигателей, определении стратегий дальнейшего технического обслуживания, назначении превентивных мер воздействий на ТТМ следует учитывать остаточный ресурс двигателей, поскольку при отсутствии таких данных проектирование выполняется недостаточно корректно, что приводит к необоснованным решениям.

Предложенная интеллектуальная система в виде нейро-нечеткой сети для оценки ресурса двигателей построена на новых экспериментальных данных и является вполне адекватной, поэтому ее можно рекомендовать для использования в практике совершенствования конструкций двигателей и при определении стратегий дальнейшей эксплуатации, а также при проектировании ремонтно-обслуживающих баз ТТМ.

Список литературы

- [1] Fonte M., Freitas M., Reis L. Failure analysis of a damaged diesel motor crankshaft // *Engineering Failure Analysis*, 2019, v. 102, pp. 1–6.
- [2] Lucjan W., Michał S., Feliks S., Tomasz T. Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine // *Engineering Failure Analysis*, 2017, v. 82, pp. 703–712.
- [3] Lucjan W., Feliks S., Arkadiusz Z. Failure investigation of the crankshaft of diesel engine // *Procedia Structural Integrity*, 2017, v. 5, pp. 369–376.
- [4] Li W., Yan Q., Xue J. Analysis of a crankshaft fatigue failure // *Engineering Failure Analysis*, 2015, v. 55, pp. 139–147.
- [5] Singh S.S.K., Abdullah S., Nikabdullah N. The needs of understanding stochastic fatigue failure for the automobile crank-shaft: A review // *Engineering Failure Analysis*, 2017, v. 80, pp. 464–471.
- [6] Wang R., Chen H., Guan C. Random convolutional neural network structure: An intelligent health monitoring scheme for diesel engines // *Measurement*, 2021, v. 171(8). p. 108786.
- [7] Ou X., Huang J., Chang Q., Hucker S., Lovasz J.G. First Time Quality Diagnostics and Improvement through Data Analysis: A Study of a Crankshaft Line // *Procedia Manufacturing*, 2020, v. 49, pp. 2–8.
- [8] Chen X., Yu X., Hu R., Li J. Statistical distribution of crankshaft fatigue: Experiment and modeling // *Engineering Failure Analysis*, 2014, v. 42, pp. 210–220.
- [9] Nozdrzykowski K., Chybowski L., Dorobczyński L. Model-based estimation of the reaction forces in an elastic system supporting largesize crankshafts during measurements of their geometric quantities // *Measurement*, 2020, v. 155, pp. 1–14.
- [10] Xin Q. Durability and reliability in diesel engine system design // *Diesel Engine System Design*, 2013, pp. 113–202.
- [11] Çevik G., Gürbüz R. Evaluation of fatigue performance of a fillet rolled diesel engine crankshaft // *Engineering Failure Analysis*, 2013, v. 27, pp. 250–261.
- [12] Saeidi Googarchin H., Sharifi S.M.H., Forouzes F., Hosseinpour G.H.R., Etesami S.M., Zade S.M. Comparative study on the fatigue criteria for the prediction of failure in engine structure // *Engineering Failure Analysis*, 2017, v. 79, pp. 714–725.
- [13] Shamekhi A.-M., Shamekhi A. H. A new approach in improvement of mean value models for spark ignition engines using neural networks // *Expert Systems with Applications*, 2015, v. 42, iss. 12, pp. 5192–5218.
- [14] Pandey R.K. Failure of diesel-engine crankshafts // *Engineering Failure Analysis*, 2003, v. 10, iss. 2, pp. 165–175.
- [15] Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001, 760 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
- [16] Хултен Дж. Разработка интеллектуальных систем. М.: ДМК Пресс, 2019, 284 с.
- [17] Ясницкий Л.Н. Нейронные сети — инструмент для получения новых знаний: успехи, проблемы, перспективы // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2015. № 5. С. 48–56.
- [18] Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Kovalev R.N. Fuzzy simulation of forest road surface parameters // *The open access IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) provides a fast, versatile and cost-effective proceedings publication service*, 2019, v. 326. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012026.
- [19] MATLAB Release Notes for R2013a. MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes>. Highlight (дата обращения 15.02.2019).

[20] РД 50-490–84 Методические указания. Техническая диагностика. Прогнозирование остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам. М.: Издательство стандартов, 1985. 22 с.

[21] РД 50-423–83 Методические указания. Надежность в технике. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей, подверженных изнашиванию. М.: Издательство стандартов, 1984. 36 с.

Сведения об авторах

Побединский Владимир Викторович[✉] — профессор, д-р техн. наук, зав. кафедрой интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», pobed@e1.ru

Иовлев Григорий Александрович — канд. экон. наук, доцент, зав. кафедрой сервиса транспортных и технологических машин и оборудования АПК, ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», gri-iovlev@yandex.ru

Ляхов Сергей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры интеллектуальных систем, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и роботы», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», lyahovsv@m.usfeu.ru

Голдина Ирина Игоревна — ст. преподаватель кафедры сервиса транспортных и технологических машин и оборудования АПК, ФГБОУ ВО «Уральский государственный аграрный университет», gri-iovlev@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.08.2021.

Одобрено после рецензирования 18.10.2021.

Принята к публикации 17.11.2021.

NEURO-FUZZY NETWORK FOR EVALUATING TRACTOR ENGINES RESIDUAL LIFE

V.V. Pobedinsky^{1, 2✉}, G.A. Iovlev², S.V. Lyakhov^{1, 3}, I.I. Goldina²

¹Ural State Forest Engineering University, 37, Siberian tract st., 620100, Yekaterinburg, Russia

²Ural State Agrarian University, 42, Karl Liebknecht st., 620075, Yekaterinburg, Russia

³Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira st., 620002, Yekaterinburg, Russia

pobed@e1.ru

The issue of improving the technical operation of transport-technological machines, in particular, the diagnostics of the technical condition of tractor engines and determining its residual life is considered. The purpose of the research was to create a neuro-fuzzy network to determine the residual life of the tractors engines BELARUS-80.1/82.1 and KhTZ-17221 by the amount of the engine shafts wear. An analysis was made by using applications of intelligent systems for diagnosing transport and technological machines and their possible application in other areas; the wear of the tractors crankshafts was experimentally determined; experimental data were statistically processed and the resource of tractors was calculated. The resource indicators were determined for the most critical unit, the crankshaft, according to the main parameters - the amount of its wear at the points of attachment of the connecting rod and main journals. The wear parameters in the work were determined in the course of experimental studies with subsequent statistical processing. The distribution functions of the wear value in four critical places of the crankshaft are obtained. The experimental data served as the initial data for the neuro-fuzzy network, which is implemented in the MATLAB environment. Experimental data on the wear of tractor engine units and the values of the residual engine life obtained on their basis are presented.

Keywords: BELARUS-80.1/82.1 tractor, HTZ-17221 tractor, crankshaft wear, intelligent system; neuro-fuzzy network


Suggested citation: Pobedinsky V.V., Iovlev G.A., Lyakhov S.V., Goldina I.I. *Neuronechetkaya set' dlya otsenki ostatochnogo resursa traktornykh dvigateley* [Neuro-fuzzy network for evaluating tractor engines residual life]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 120–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-120-130

References

- [1] Fonte M., Freitas M., Reis L. Failure analysis of a damaged diesel motor crankshaft. *Engineering Failure Analysis*, 2019, v. 102, pp. 1–6.
- [2] Lucjan W., Michał S., Feliks S., Tomasz T. Stress and failure analysis of the crankshaft of diesel engine. *Engineering Failure Analysis*, 2017, v. 82, pp. 703–712.
- [3] Lucjan W., Feliks S., Arkadiusz Z. Failure investigation of the crankshaft of diesel engine. *Procedia Structural Integrity*, 2017, v. 5, pp. 369–376.

- [4] Li W., Yan Q., Xue J. Analysis of a crankshaft fatigue failure. *Engineering Failure Analysis*, 2015, v. 55, pp. 139–147.
- [5] Singh S.S.K., Abdullah S., Nikabdullah N. The needs of understanding stochastic fatigue failure for the automobile crankshaft: A review. *Engineering Failure Analysis*, 2017, v. 80, pp. 464–471.
- [6] Wang R., Chen H., Guan C. Random convolutional neural network structure: An intelligent health monitoring scheme for diesel engines. *Measurement*, 2021, v. 171(8). p. 108786.
- [7] Ou X., Huang J., Chang Q., Hucker S., Lovasz J.G. First Time Quality Diagnostics and Improvement through Data Analysis: A Study of a Crankshaft Line. *Procedia Manufacturing*, 2020, v. 49, pp. 2–8.
- [8] Chen X., Yu X., Hu R., Li J. Statistical distribution of crankshaft fatigue: Experiment and modeling. *Engineering Failure Analysis*, 2014, v. 42, pp. 210–220.
- [9] Nozdrzykowski K., Chybowski L., Dorobczyński L. Model-based estimation of the reaction forces in an elastic system supporting largesize crankshafts during measurements of their geometric quantities. *Measurement*, 2020, v. 155, pp. 1–14.
- [10] Xin Q. Durability and reliability in diesel engine system design. *Diesel Engine System Design*, 2013, pp. 113–202.
- [11] Çevik G., Gürbüz R. Evaluation of fatigue performance of a fillet rolled diesel engine crankshaft. *Engineering Failure Analysis*, 2013, v. 27, pp. 250–261.
- [12] Saeidi Googarchin H., Sharifi S.M.H., Forouzes F., Hosseinpour G.H.R., Etesami S.M., Zade S.M. Comparative study on the fatigue criteria for the prediction of failure in engine structure. *Engineering Failure Analysis*, 2017, v. 79, pp. 714–725.
- [13] Shamekhi A.-M., Shamekhi A. H. A new approach in improvement of mean value models for spark ignition engines using neural networks. *Expert Systems with Applications*, 2015, v. 42, iss. 12, pp. 5192–5218.
- [14] Pandey R.K. Failure of diesel-engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis*, 2003, v. 10, iss. 2, pp. 165–175.
- [15] Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001, 760 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>.
- [16] Hulten J. *Razrabotka intellektual'nykh sistem* [Development of intelligent system. Moscow: DMK Press, 2019, 284 p.
- [17] Yasnitsky L.N. *Neyronnye seti – instrument dlya polucheniya novykh znaniy: uspekhi, problemy, perspektivy* [Neural networks as a tool for obtaining new knowledge: successes, problems, prospects]. *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye* [Neurocomputers: development, application], 2015, no. 5, pp. 48–56.
- [18] Kruchinin I.N., Pobedinsky V.V., Kovalev R.N. Fuzzy simulation of forest road surface parameters. The open access IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES) provides a fast, versatile and cost-effective proceedings publication service, 2019, v. 326. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012026.
- [19] MATLAB Release Notes for R2013a. MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes.Highlight> (accessed 15.02.19).
- [20] RD 50-490-84 *Metodicheskie ukazaniya. Tekhnicheskaya diagnostika. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa mashin i detaley po kosvennyim parametram* [Methodical instructions. Technical diagnostics. Forecasting the residual life of machines and parts by indirect parameters]. Moscow: Standards Publishing House, 1985, 22 p.
- [21] RD 50-423-83 *Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metodika prognozirovaniya ostatochnogo resursa mashin i detaley, podverzhennykh iznashivaniyu* [Guidelines. Reliability in technology. Methodology for predicting the residual life of machines and parts subject to wear]. Moscow: Standards Publishing House, 1984, 36 p.

Authors' information

Pobedinskiy Vladimir Viktorovich  — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Intelligent Systems, Ural State Forest Engineering University, pobed@e1.ru

Iovlev Grigory Aleksndrovich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor, Head of the Department of Service for Transport and Technological Machines and Equipment of Agroindustrial Complex, Ural State Agrarian University, gri-iovlev@yandex.ru

Lyakhov Sergey Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Intelligent Systems, Ural State Forestry Engineering University, Associate Professor of the Department of Hoisting-and-Transport Machines and Robots of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, lyahovsv@m.usfeu.ru

Goldina Irina Igorevna — Senior Lecturer of the Department of Service for Transport and Technological Machines and Equipment of Agroindustrial Complex Ural State Agrarian University gri-iovlev@yandex.ru

Received 16.08.2021.

Approved after review 18.10.2021.

Accepted for publication 17.11.2021.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
 The authors declare that there is no conflict of interest