

Применение теории нечетких данных в задачах оценки долговечности

Application of the fuzzy data theory in durability estimation

Гадолина И.В.
Irina V. Gadolina

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Российская Федерация
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russian Federation
gadolina@mail.ru



Гадолина И.В.

Резюме. Цель. Задачи в исследованиях усталости материалов, являясь актуальными с точки зрения инженерной практики, обладают большой долей неопределенности. Кривая усталости содержит цензурирования (что означает прошедшие запланированный цикл нагружений и не разрушившиеся к концу испытаний образцы), а блок нагружения, составляемый для расчета долговечности, может быть составлен по-разному с достаточной долей субъективных решений. Блок нагружения предназначен для расчета долговечности и для составления плана испытаний и должен в полной мере отражать всю предполагаемую историю эксплуатации. Оба этих фактора рассматриваются в статье как элементы нечеткой логики. Рассмотрено создание научно обоснованного блока нагружения, который учитывал бы возможные режимы работы в правильной пропорции и с учетом вариативности. Это связано с тем, что усталостное повреждение накапливается в течение всего срока работы машины и должно быть научно оценено для адекватной оценки в вероятностном аспекте. **Методы.** Так как режимы эксплуатации некоторой конкретной детали точно не определены (и не могут быть определены по логике случайного использования машин), рассматриваются проекции случайных нечетких распределений. Удалось научно обосновано учесть конечное множество эксплуатационных режимов в их разумной пропорции. На примере анализа нагружения ответственной детали подвижного состава построены распределения и оценено возможное распределение ресурса детали. Полученные на основе разработанного метода результаты позволяют оценить риски эксплуатации и спрогнозировать потребное число запчастей. Рассмотрение цензурированных элементов выборки при построении кривой усталости позволит сделать оценку параметров кривой усталости более состоятельной. **Выводы.** Применение нечетких множеств может оказаться весьма полезным при рассмотрении кривой усталости и при оценке вариации долговечности. Показаны примеры применения предложенного подхода.

Abstract. Aim. Problems associated with the study of material fatigue, while being relevant in terms of engineering practice, have a significant degree of uncertainty. The fatigue curve is censored (which indicates the presence of items that have passed the planned load cycle and destroyed by the end of the tests), while the load block made for calculating durability can be designed in a number of ways with a sufficient share of subjective decisions. The load block is intended for calculating durability and defining test plans. It is to fully reflect the entire expected operational history. Both factors are considered in the paper as elements of fuzzy logic. The author examines the creation of a scientifically substantiated load block that would take into account the possible operating modes in a right proportion and taking into account the variability. That is due to the fact that fatigue damage accumulates over the entire life of a machine and is to be scientifically evaluated for an adequate probabilistic assessment.

Methods. As the modes of operation of a certain part are not precisely defined (and cannot be defined by virtue of the logic of random use of machines), projections of random fuzzy distributions are considered. A finite set of operating modes in a reasonable proportion was successfully scientifically substantiated. Using the example of load analysis of a critical part of rolling stock, distributions were constructed and the possible distribution of a part's life was estimated. The output of the developed method will allow assessing the operational risks and predict the required number of spare parts. By taking into account the censored sample elements in the process of fatigue curve construction, the estimation of the fatigue curve parameters can be made more consistent. **Conclusions.** The use of fuzzy sets may prove to be very useful when examining fatigue curves and estimating durability variation. Examples are given of applying the proposed method.

Ключевые слова: нечеткие множества, оценка долговечности, режимы нагружения, кластерный анализ, временные ряды.

Keywords: fuzzy sets, durability estimation, loading modes, cluster analysis, time series.

Для цитирования: Гадолина И.В. Применение теории нечетких данных в задачах оценки долговечности // Надежность. 2022. №3. С. 3-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-3-10>

For citation: Gadolina I.V. Application of the fuzzy data theory in durability estimation. *Dependability* 2022;3: 3-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-3-10>

Поступила 27.05.2022 г. / **После доработки** 22.07.2022 г. / **К печати** 19.09.2022 г.

Received on: 27.05.2022 / **Revised on:** 22.07.2022 / **For printing:** 19.09.2022.

Введение

Объектами нечисловой природы называют элементы пространств, не являющихся линейными. Примерами измерения в качественных шкалах являются ранжировки, разбиения, категоризованные данные. Объекты нечисловой природы нельзя складывать и умножать на числа, не теряя при этом содержательного смысла. Этим они отличаются от числовых данных, издавна используемых в прикладной статистике. Статистическое исследование объектов нечисловой природы является одной из парадигм современной статистики [1], наряду с непараметрической статистикой. В процессе работы с непараметрической статистикой и анализе объектов нечисловой природы [2] немаловажную роль играют нечеткие множества.

При оценке ресурса деталей машин, при которой важно рассматривать задачу в вероятностной постановке [3], одной из основных инженерных задач является задача построения научно обоснованного обобщенного блока (ОБ). ОБ представляет собой некоторый массив нагрузок, который в дальнейшем применяется совместно с гипотезами суммирования усталостных повреждений для оценки долговечности. При решении этой задачи особенно важно иметь научно обоснованный инструмент создания этого блока. Смысл конструкции ОБ заключается в том, что все возможные режимы эксплуатации должны быть отражены в нем, причем с учетом реальной пропорции конкретного режима в общем времени использования. ОБ относится к категоризованным данным, поэтому требуется работа с объектами нечисловой природы. После выделения и определения конкретных режимов, входящих в ОБ, например, с помощью кластерного анализа [4] или с применением нечетких множеств, дальнейшие исследования осуществляются с вещественными числами.

Построение обобщенного блока. Статус кво.

Большинство применяемых в настоящее время методов получения количественных расчетных характеристик нагруженности деталей основываются на замене реального случайного процесса, записанного путем тензометрирования, некоторым схематизированным процессом. Схематизированный процесс по уровню вносимого усталостного повреждения должен быть эквивалентен реальному [5]. Некоторый режим может оказаться весьма незначительным по нагрузкам, но

относительную продолжительность его эксплуатации необходимо учесть в ОБ при расчете ресурса.

Анализируя возможный процесс нагружения, например, в детали несущей конструкции рамы зерноуборочного комбайна, можно заметить, что наблюдаются участки с большей интенсивностью колебаний – «А» – они соответствуют движению комбайна по проселочной (грунтовой) дороге, и режимы работы в поле – участки «Б», которые являются щадящими с точки зрения усталостного повреждения для исследуемой детали. Это связано с тем, что чем больше амплитуды колебаний напряжения, тем более интенсивно накапливаются повреждения и тем меньше ресурс. Анализ истории нагружения детали наводит на мысль о возможности проведения ускоренных ресурсных испытаний лишь на режимах «А», при этом финальный вывод о ресурсе должен базироваться на информации о процентном соотношении времени эксплуатации в режимах «А» и «Б». Поэтому они оба должны присутствовать в обобщенном блоке ОБ, хотя бы номинально.

Существует обширная литература по вопросам построения и обоснования ОБ. В автомобилестроении ученые из ФРГ разработали систему анализа процесса нагружения с применением современных инструментов. Использовались GPS (Global Positioning System – глобальная система позиционирования), big data (большие данные) [6]. Проблемы вероятностного распределения режимов по нагрузкам исследуется также в [7, 8]. Авторы анализируют вариабельность нагрузок в зависимости от места приписки машины, при этом рассматривается вероятность события попадания машины в определенную категорию использования по месту и по перевозимому грузу. В работе [9] для надежного представления специфических требований заказчика при производстве новых транспортных средств был разработан метод, согласно которому типы дорог могут быть сопоставлены с точки зрения важнейших параметров, таких как продольная и поперечная динамика нагрузок. Типы дорог могут быть также сопоставлены и по вычисленным усталостным повреждениям и с применением гипотез накопления повреждений [3].

Ранее нами была рассмотрена задача выделения режимов с использованием кластерного анализа характерных показателей нагруженности [4]. Для анализа временных зависимостей для кластеризации применяется метод исследования временных последовательностей выборочных параметров. Обзор содержится в [10]. Кластерный анализ по биологическим пробам описан

в [11]. Методы нечеткой кластеризации обнаруживают нечеткие области, в которых наблюдения могут быть мягко отнесены к нескольким кластерам [12]. На рис. 1 показана визуализация для трех факторов, которые являются определяющими для оценки долговечности машин. На самом деле в работе [4] было использовано большее число факторов – число 3 выбрано для большей понятности и наглядности. Представленные на рис. 1 данные соответствуют задаче кластерного анализа режимов нагружения автомобилей [13].

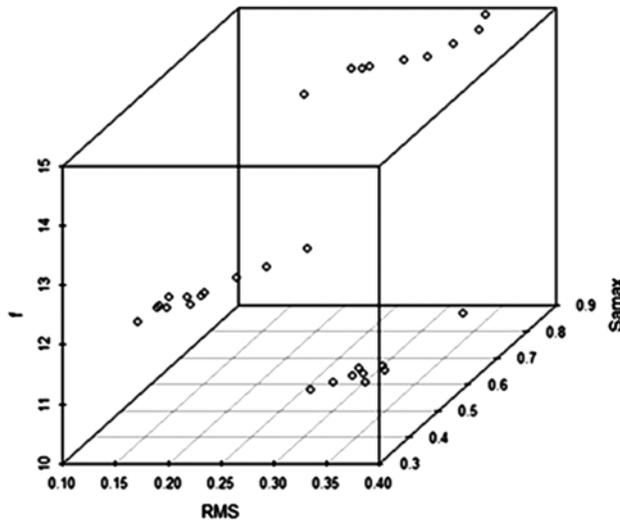


Рис. 1. Графическая интерпретация кластерного анализа с использованием трех факторов (эффективная частота, СКО, максимальная амплитуду в блоке) (пример автомобилей – модельная выборка SAE [13])

На первом этапе предлагается создать список всех возможных режимов по предложениям экспертов для данной конкретной машины. Далее на каждом режиме проводится тензометрирование напряжений в исследуемой детали с последующей обработкой записи по методу дождя [5]. Полученные распределения следует просуммировать с учетом их весов (при умножении на веса целые числа частот в гистограммах превратятся в вещественные – см. формулу (1)) и длительности записи на конкретном режиме.

Всего может быть рассмотрено k спектров в соответствии с условиями эксплуатации. Для оценки долговечности необходимо располагать обобщенным спектром, который формируется путем сложения частных спектров, соответствующих различным вариантам использования механизма с указанием доли этих вариантов в общей продолжительности эксплуатации. Проблема при этом может заключаться в том, что границы интервалов разбивки непрерывной физической величины напряжений (так называемые «карманы») для подсчета числа попадающих в них чисел циклов для разных режимов могут быть различными [14].

Возможным вариантом решений данной проблемы может явиться аппроксимация гистограммы непрерывным распределением с помощью непараметрического

ядерного сглаживания [15]. Гистограмма вместо отдельных «кубиков» в этом случае будет строиться из мини-распределений заданной формы: треугольников, нормальных распределений и т.п. Суммируя все составляющие такой «гистограммы», мы получим сглаженную кривую. В программном комплексе R для этой цели использовалась функция “density” с ядром, установленным по умолчанию, «gaussian». Сглаженные кривые для нескольких режимов эксплуатации суммируются с учетом распределения режимов.

Обобщенный блок подобен гистограмме, только число повторений событий в карманах может представлять собой положительную вещественную величину. Это связано с применением формулы (1) для расчета распределения ОБ. Коэффициенты для пересчета с целью последующего суммирования приведенных частных распределений z_i вычисляются по формуле:

$$z_i = \frac{3600}{l_i} p_i \tag{1}$$

здесь l_i – продолжительность реализации, зафиксированной на i -том режиме; p_i – доля режима в эксплуатации. Таким образом, для каждого значения амплитуд напряжений в режиме i был определен коэффициент z_i , единый для данной реализации.

Альтернативой описанному методу является использование непрерывного распределения, полученного ядерным сглаживанием гистограмм. В этом случае появляется возможность численного суммирования псевдо-непрерывных распределений. В программном комплексе R [15] имеется возможность произвести сглаживание с помощью различных ядер: гауссовского, Епанченкова, прямоугольного, треугольного, косинус. Ядра масштабируются таким образом, что их стандартное отклонение соответствует ядру сглаживания. Алгоритм, используемый в программе R по оценке плотности по умолчанию, распределяет массу эмпирической функции распределения по регулярной сетке из не менее 512 точек, а затем использует быстрое преобразование Фурье для свертки этой аппроксимации с дискретизированной версией ядра. Следующим шагом является линейная аппроксимация для оценки плотности в указанных точках.

Примем сглаживание с помощью гауссовского ядра, предлагаемого программой R по умолчанию. Форма ядра Гаусса описывается формулой:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \tag{2}$$

здесь $G(x, y)$ – значение, рассчитанное по формуле ядра Гаусса. Это значение является частью ядра, представляющего один элемент; σ – пороговое значение или значение фактора, указанное пользователем; x, y – переменные, обозначенные как x и y , относятся к координатам пикселей в изображении, y представляет вертикальное смещение или строку, а x представляет горизонтальное смещение или столбец.

На примере гистограмм амплитуд полных циклов в детали подвижного состава для пяти скоростей движения применим сглаживание гауссовским ядром. Сглаженные гистограммы для 5 режимов показаны на рис. 2.

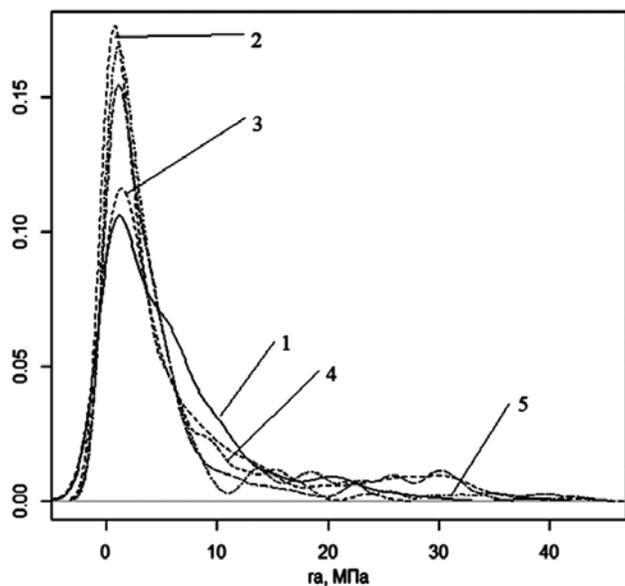


Рис. 2. Сглаженные гистограммы для распределений амплитуд полных циклов R_a для напряжений в детали несущей конструкции при движении состава с различными скоростями: 1 – $V = 45$ км/ч; 2 – $V = 54$ км/ч; 3 – $V = 63$ км/ч; 4 – $V = 90$ км/ч; 5 – $V = 99$ км/ч.

Для создания обобщенного блока псевдо-непрерывные значения сглаженных гистограмм умножаются на индивидуальные коэффициенты, рассчитываемые по формуле, аналогичной (1), при этом учитывается также продолжительность реализации, которая подвергалась схематизации по методу дождя [5]. Далее будет показано, что для оценки вариабельности вычисленного ресурса хорошо подходит аппарат нечетких множеств. В силу сделанных предположений о нечетком характере множества распределений режимов, ОБ также является нечетким.

Нечеткие множества в задаче выборов режимов

Помимо задачи с отчетливо выраженными режимами, которые можно дистанцировать непосредственно по визуальному анализу записей, либо с применением кластерного анализа, описанного в [4], существует обширный класс задач, где такое разделение является нечетким, размытым. Применим концепцию нечетких множеств. В математике нечеткие множества (они же неопределенные множества) – это множества, элементы которых имеют разные степени принадлежности.

На рис. 3 схематически показан пример функции принадлежности μ нечетких множеств. Здесь схематически показана нечеткая принадлежность индивидуума к мно-

жествам людей: А (молодой), Б (средний) и В (старый). Рассматривая функцию принадлежности, можно увидеть некоторую аналогию с вероятностями.

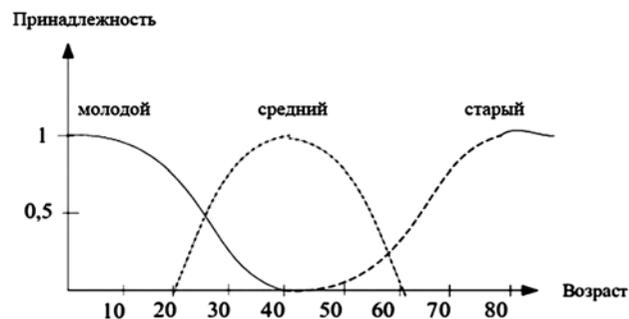


Рис.3. Схема функций принадлежности трех нечетких множеств

В [16] авторы проводят параллели между теорией вероятности и нечеткостью. Они полагают, что связь между нечеткостью и вероятностью позволит применить в нечеткой теории методы и результаты, накопленные в теории случайных множеств. И наоборот, это позволит перенести концепции и формулирование задач из первой теории на вторую, что послужит прогрессом у обоих. Подобно тому, как решению задачи о кластерах предшествует предварительное решение о числе кластеров, в задаче оценивания с применением нечетких множеств задача разбивается на две: оценивание структуры моделей и оценивание параметров при заданной структуре [16]. При этом структура – это объект нечисловой природы.

Спецификация нечеткого объекта A представляет собой вектор вида

$$P(A) = (p_1(A), \dots, p_n(A)), \quad (3)$$

где $p_i(A)$, $i = 1, n$, – количественные или качественные свойства объекта A .

Нечетким свойством объекта A является кортеж (т.е. набор данных фиксированной длины). Кортеж – это нечеткое множество, описывающее количественные значение свойства $p(A)$ и качественные $u(p(A))$. Данные параметры являются единицами измерения объекта. Совпадение объектов определяется совпадением всех параметров $i = 1, n$ [17]. Другими словами, спецификация нечеткого объекта может состоять из четко определенных (crisp) и нечетких (fuzzy) свойств. Качественные свойства являются частными случаями нечетких количественных свойств.

Рассмотрим данные на кривой усталости как нечеткие объекты типа (3). Как известно [3], на кривой усталости содержатся элементы двух типов: разрушенные и цензурированные (приостановленные, снятые с испытаний) образцы. У обоих перечисленных объектов имеется количественная характеристика – наработка t (размерность [мин], [циклы] или другая мера), а также качественная мера u , определяющая статус наблюдения:

$$u \in [0,1]. \quad (4)$$

В простейшем случае, при отсутствии уточняющей информации о статусе цензурированного образца для сломавшихся образцов $u = 1$ и для цензурированных $u = 0$. В настоящее время нами ведутся исследования по введению уточняющих параметров для u , которые могут быть получены дополнительными измерениями физических величин (томография, измерение модуля упругости, микрофотографирование). В общем случае данная характеристика представляет нечеткую характеристику, подобную изображенной на схеме рис. 3.

Авторы [16] утверждают: «Теория нечетких множеств сводится к теории случайных множеств с использованием понятия «проекция случайного множества». Каждое случайное множество может быть связано с некоторой функцией – вероятностью того, что элемент принадлежит к множеству. Эта функция имеет все свойства функции принадлежности нечеткого множества. Соответствующее нечеткое множество называется проекцией исходного случайного множества. Верно и обратное – для любого нечеткого множества можно выбрать случайное множество так, чтобы вероятность принадлежности элемента к случайному множеству повсюду совпадала с функцией принадлежности данного нечеткого множества. Такое соответствие можно установить так, чтобы результаты операций над множествами тоже соответствовали друг другу».

Метод

Классификация относится к разделению набора элементов на классы – группы элементов, похожих друг на друга. В четкой классификации каждый элемент относится к одному определенному классу. А в нечеткой классификации задана функция принадлежности элемента к разным классам. Нечеткая классификация обычно больше соответствует действительности, чем строгая [12].

В основе современной математики лежит понятие множества. Для того чтобы установить тот или иной конкретный набор режимов эксплуатации, необходимо уметь ответить по каждому режиму на вопрос:

«Принадлежит этот режим этому множеству или не принадлежит?» Но границы понятий обычно размыты, так что однозначный ответ на такой вопрос возможен далеко не всегда. Это означает, что размытие нужно описывать в терминах множества, которое немного отличается и шире, чем обычно.

В работе [9] отмечено, что распределения по режимам для грузовых автомобилей меняется от региона к регионам. Рассмотрим некоторые распределение продолжительности работы по режимам для рассматриваемого примера детали грузовых вагонов. Допустим, имеется некоторые возможные подвижки по долям времени машин по различным режимам. Схематически эта ситуация показана диаграммах табл. 1. В строке под изображениями круговых распределений показаны вероятности p_i появления режимов i в j -той комбинации:

$$\sum p_i = 1, \text{ для всех } j. \tag{5}$$

Данные вероятности являются проекциями нечетких множеств на пространство событий.

Далее проанализируем нечеткое распределение по комбинациям j . С учетом того, что распределения по p_i также нечеткое, задача может быть сформулирована как дважды размытая. Поскольку рассматриваются вероятности нахождения объекта в некотором состоянии (режиме) i , проанализируем проекцию [16] нечетких множеств.

Пусть X – случайное множество – измеримое отображение $\{K\}$ семейства элементарных исходов произвольного вероятностного пространства $\{\{Q\}, \{A\}, \{P\}\}$ в некоторое пространство $\{M\}$, элементами которого являются множества распределений, (пример в табл. 1).

Вместо вероятностей p_i поставим меру нечеткости μ_i из теории нечетких множеств [16]. Тот факт, что в отличие от теории вероятности, где справедливо соотношение (5), сумма функций принадлежности не равна единице:

$$\sum \mu_i \neq 1 \tag{6}$$

Табл. 1. Представление режимов нагружения детали железнодорожного состава как нечеткого множества

I	II	III	IV	V
4,7 % 7,0 % 16,7 % 34,4 % 37,2 %	3,3 % 6,6 % 14,0 % 38,8 % 37,2 %	4,4 % 6,8 % 19,5 % 35,1 % 34,1 %	6,8 % 7,2 % 14,9 % 31,7 % 39,4 %	3,9 % 8,7 % 13,9 % 28,1 % 45,5 %
$V_{m=6}=0,433$	$V_{m=6}=0,476$	$V_{m=6}=0,491$	$V_{m=6}=0,518$	$V_{m=6}=0,503$

это не нарушает общности рассуждений, но дает возможность оценить расстояние между нечеткими множествами A и B множества $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ [1] как

$$d(A, B) = \sum_{j=1}^k |\mu_A(x_j) - \mu_B(x_j)| \quad (7)$$

где $\mu_A(x_j)$ – функция принадлежности нечеткого множества A и где $\mu_B(x_j)$ – функция принадлежности нечеткого множества B .

Выражение (4) приведено в [1] для двух нечетких множеств. Как видно на примере рис. 3, этих множеств может быть больше в случае конечного k числа эксплуатационных режимов, диагностированных кластерами.

Результаты

Используя проекции нечетких множеств на пространство событий, оценим нечеткое событие как случайный ресурс детали. Для оценки рассеивания используется мера коэффициент полноты спектра V [18], которая вычисляется по формуле (8) для разных распределений режимов, показанных в табл. 1:

$$V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum h_i \left(\frac{\sigma_{ai}}{\hat{\sigma}_a}\right)^m} \quad (8)$$

Величина V является безразмерной. В формуле (8) m – коэффициент угла наклона кривой усталости; n – суммарное число циклов в блоке; h_i – число циклов на i -той ступени; σ_{ai} – текущее значение амплитуды напряжений; $\hat{\sigma}_a$ – максимальная амплитуда в блоке. Видно, что V зависит не только от формы блока, но и от m . Примем $m = 6$ и вычисленные значения занесем в последнюю строку табл. 1.

Распределения случайной величины V , полученной на основании анализа нечетких кластеров, показано на нормальной вероятностной бумаге на рис. 4. График построен в программной среде R [15]. По вертикали

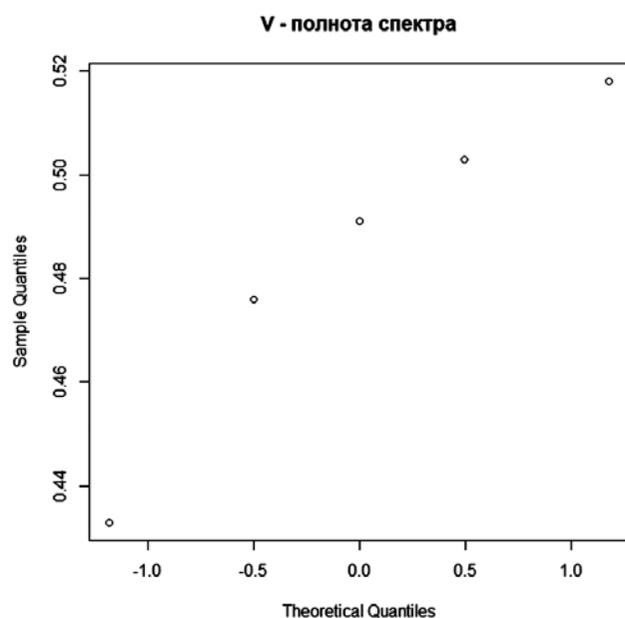


Рис. 4. Выборочные и теоретические квантили для V

отложены выборочные квантили, по горизонтали – теоретические. Характер вариации данной случайной величины подобен вариации вычисленного ресурса исследуемой детали.

Выводы

Рассмотрено применение теории нечетких множеств к задачам усталости. Рассмотрено два типа задач: 1) построение кривой усталости с учетом цензурированных; 2) задача нечеткой кластеризации режимов нагружения. В задаче о построении кривой усталости предложено рассматривать цензурирования как нечеткие элементы с функцией принадлежности, лежащей в интервале $[0, 1]$, где 0 – это чистое цензурирование, а 1 – безусловный отказ (четкие данные). Промежуточные варианты предлагается оценивать с использованием перспективных физических методов исследования. Распределение общего времени эксплуатации по режимам также является нечетким в силу до конца не определенных условий эксплуатации. Рассмотрение данной задачи с точки зрения нечетких данных позволило предварительно оценить расчетное рассеивание ресурса детали.

Библиографический список

1. Орлов А.И. Искусственный интеллект: нечисловая статистика: учебник. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. 446 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/117028.html>
2. Орлов А.И. Смена парадигм в прикладной статистике // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. № 87(7). С. 6-7. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-7-6-7>
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М. Машиностроение, 1993. 364с.
4. Gadolina I.V., Petrova I.M. Cluster Analysis of the Loading Time-Series with the Aim of Consistent Durability Estimation. In: Hu, Z., Wang, B., Petoukhov, S., He, M. (eds) Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPe 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 119. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97064-2_2
5. Гадолина И.В., Козлов А.Д., Монахова А.А. и др. Оптимальный способ ЦОС в задачах оценки долговечности // Вестник РГГУ. Серия: Информатика. Информационная безопасность. Математика. 2019. № 1. С. 78-93. DOI: [10.28995/2686-679X-2019-1-78-93](https://doi.org/10.28995/2686-679X-2019-1-78-93)
6. Michael Burger, Klaus Dreßler, Michael Speckert. Load assumption process for durability design using new data sources and data analytics // International Journal of Fatigue. 2021. Vol. 145. Pp. 7-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106116>
7. Dressler Klaus, Speckert Michael, Müller R. et al. Customer loads correlation in truck engineering. Conference: World automotive Congress 2008. At: München Volume: Springer automotive Media / GWV Fachverlage GmbH. F200812198.

8. E. Bellec et al. Modelling and identification of fatigue load spectra: Application in the automotive industry // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 149. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106222

9. M. Stadele, B. Mundl, A. Rap, R. Großkopf et al. Derivation and categorization of road quality in view of operation loads to consider customer requirements for customer-focused sales // *Proceedings of the Fourth International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading (VAL4)*; 2020 Mar 30 – Apr 1; Darmstadt, Germany. Berlin: DVM, 2020. Pp. 175-183.

10. Saeed Aghabozorgi, Ali Seyed Shirkhorshidi, Teh Ying Wah. Time-series clustering – A decade review // *Information Systems*. 2015. Vol. 53. Pp. 16-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.is.2015.04.007>

11. Плющенко В.П., Шахматов Д.Г., Родин И.А. Алгоритм сочетания хромато-спектрометрического ненаправленного профилирования и многомерного анализа для выявления веществ-маркеров в образцах сложного состава // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020. Т. 86. № 7. С. 12-19. DOI: <http://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-12-19>

12. D. Meyer, E. Dimitriadou, K. Hornik et al. E1071: Misc Functions of the Department of Statistics. Probability Theory Group, TU Wien, 2017. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=e1071>. R package version 1.6-8.

13. Tucker L., Bussa S. The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program / In book *Fatigue under Complex Loading*. Ed. R.M. Wetzel. 1977. Society of Automotive Engineering. Pp. 1-44.

14. Петрова И.М., Гадолина И.В. Создание обобщенного спектра нагружения при различных вариантах нагружения в эксплуатации / В сборнике: Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в рамках Уральской декады. Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. 2018. С. 318-321.

15. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria; 2020. URL: <https://www.R-project.org/>

16. Орлов А.И., Луценко Е.В. Системная нечеткая интервальная математика: Монография (научное издание). Краснодар: КубГАУ, 2014. 600 с.

17. Terletskyi D.A., Provotar A.I. Fuzzy Object-Oriented Dynamic Networks // *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51. No. 1. Pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9694-0>

18. Савкин А.Н. Компьютерное моделирование и анализ прочности конструкций при переменном нагружении: монография / А. Н. Савкин, А. В. Андроник, А. А. Седов. Волгоград: ВолгоГТУ, 2017. 228 с. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29743916_86611459.pdf

References

[1]. Orlov A.I. [Artificial Intelligence: Non-numerical Statistics]. Moscow: IPR Media; 2022. Available at: <https://www.iprbookshop.ru/117028.html>.

[2]. Orlov A.I. Change of paradigms in applied statistics. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials* 2021;87(7):6-7. (in Russ.)

[3]. Kogaev V.P. [Time-variable strength calculation]. Moscow: Mashinostroenie; 1993. (in Russ.)

[4]. Gadolina I.V., Petrova I.M. Cluster Analysis of the Loading Time-Series with the Aim of Consistent Durability Estimation. In: Hu Z., Wang B., Petoukhov S., He M., editors. *Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*; 119. Springer: Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97064-2_2.

[5]. Gadolina I.V., Kozlov A.D., Monakhova A.A., et al. Optimal Decision for Digital Signal Processing in the Durability Assessment Problem. *RSUH Bulletin. Series "Information Science. Information Security. Mathematics"* 2019;1:78-93. DOI: 10.28995/2686-679X-2019-1-78-93.

[6]. Burger M., Dreßler K., Speckert M. Load assumption process for durability design using new data sources and data analytics. *International Journal of Fatigue* 2021;145:7-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106116>.

[7]. Dressler K., Speckert M., Müller R. et al. Customer loads correlation in truck engineering. In: *Proceedings of the World Automotive Congress 2008. München* Volume: Springer automotive Media / GWV Fachverlage GmbH; F200812198.

[8]. Bellec E. et al. Modelling and identification of fatigue load spectra: Application in the automotive industry. *International Journal of Fatigue* 2021;149. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106222.

[9]. Stadele M., Mundl B., Rap A., Großkopf R. et al. Derivation and categorization of road quality in view of operation loads to consider customer requirements for customer-focused sales. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading (VAL4)*. Berlin: DVM; 2020. Pp. 175-183.

[10]. Aghabozorgi S., Shirkhorshidi A.S., Wah T.Y. Time-series clustering – A decade review. *Information Systems* 2015;53:16-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.is.2015.04.007>.

[11]. Plyushchenko I.V., Shakhmatov D.G., Rodin I.A. Algorithm of combining chromatography mass spectrometry-untargeted profiling and multivariate analysis for identification of marker-substances in samples of complex composition. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials* 2020;86(7):12-19. (in Russ.)

[12]. Meyer D., Dimitriadou E., Hornik K., et al. E1071: Misc Functions of the Department of Statistics. Probability Theory Group, TU Wien; 2017. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=e1071>. R package version 1.6-8.

[13]. Tucker L., Bussa S. The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program. In: Wetzel R.M., editor. Fatigue under Complex Loading; 1977.

[14]. Petrova I.M., Gadolina I.V. [Creating a generalized loading spectrum for various operating loads]. In: Luganova Yu.A., editor. In: [Process Equipment for the Mining and Oil Sectors. Proceedings of the XVI International Science and Technology Conference as part of the Urals Mining Ten-Day Event];2018:318-321. (in Russ.)

[15]. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing; Vienna (Austria). (accessed 30.10.2018). Available at: <http://www.R-project.org/>.

[16]. Orlov A.I., Lutsenko E.V. [Systemic fuzzy interval mathematics. A monograph]. Krasnodar: KubSAU; 2014. (in Russ.)

[17]. Terletskyi D.A., Provotar A.I. Fuzzy Object-Oriented Dynamic Networks. Cybernetics and Systems Analysis 2015;51(1):34-40. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9694-0>.

[18]. Savkin A.N., Andronik A.V, Sedov A.A. [Computer simulation and analysis of the strength of structures exposed to varying loading: A monograph]. Volgograd: VSTU; 2017. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29743916_86611459.pdf. (in Russ.)

Сведения об авторе

Гадolina Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: gadolina@mail.ru

About the author

Irina V. Gadolina, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: gadolina@mail.ru.

Вклад автора в статью

Автором исследовано состояние вопроса по данным из литературных источников, разработана концепция уточнения блока нагружения, оценено распределение случайной величины коэффициента полноты спектра, полученной на основании анализа нечетких кластеров.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.