

# НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.3.019.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-1-157-167



## РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ, ОСНОВАННОГО НА СУПЕРПОЗИЦИИ ФУНКЦИЙ НАДЕЖНОСТИ

Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена потребностью отечественных производителей в поиске способов продления сроков службы оборудования машиностроительной отрасли. Данная ситуация обуславливает необходимость разработки инструментов, позволяющих проводить оценку технического состояния оборудования с помощью методов теории надежности. В связи с тем, что оборудование является сложной технической системой, для узлов которой свойственны разные причины отказов, целесообразно использовать суперпозицию нескольких функций надежности. Цель исследования заключается в разработке и апробации программы, которая позволяет проводить первичную предобработку данных, рассчитывать параметры смеси двух распределений, выбирать наиболее подходящую функцию надежности и визуализировать эмпирические и теоретические графики распределений. В исследовании используются методы теории надежности – функции надежности, подчиняющиеся трем унимодальным распределениям: экспоненциальному, нормальному, Вейбулла. При проведении разведывательного анализа данных применяется статистический критерий Граббса для идентификации выбросных значений, а при выборе наиболее подходящей смеси распределений используется критерий минимизации ошибки – метод наименьших квадратов. Разработанная программа написана на языке программирования Python с использованием стандартных для анализа данных библиотек и модулей. Новизна исследования заключается в разработанном комплексном программном продукте, позволяющем проводить полный цикл анализа данных: от создания новых признаков до визуализации результатов исследования. Предлагаемый инструмент позволяет сравнивать с помощью значения невязки как гомогенные смеси двух распределений, так и гетерогенные, что расширяет класс рассматриваемых моделей в задачах надежности. Результатом работы программы является выбранная наиболее подходящая функция надежности, с помощью которой при известной вероятности наступления отказа можно прогнозировать время бесперебойной работы оборудования. Разработанная программа является готовым рабочим инструментом, который может быть полезен инженерам и специалистам в области надежности для адекватной оценки технического состояния оборудования.

**Ключевые слова:** теория надежности, функция надежности, суперпозиция (смесь) распределений, метод наименьших квадратов, критерий Граббса

© Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В., 2026

### Для цитирования

Новикова Т.А., Ляпунцова Е.В. Разработка инструмента прогнозирования технического состояния оборудования, основанного на суперпозиции функций надежности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №1. С. 157-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-157-167>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## DEVELOPMENT OF A TOOL FOR PREDICTING EQUIPMENT TECHNICAL CONDITION OF BASED ON THE SUPERPOSITION OF RELIABILITY FUNCTIONS

Novikova T.A., Lyapunsova E.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**Abstract.** The relevance of this research is determined by the need for domestic manufacturers to find ways to extend the service life of equipment in the mechanical engineering industry. This situation necessitates the development of tools that enable the assessment of the technical condition of equipment using reliability theory methods. Since equipment represents a complex technical system whose components are characterized by different causes of failure, it is advisable to use a superposition of several reliability functions. The aim of the study is to develop and test a program that allows primary data preprocessing, calculation of the parameters for six mixtures of two distributions, selection of the most suitable reliability function, and visualisation of empirical and theoretical distribution graphs. The study uses methods of reliability theory specifically reliability functions that follow three unimodal distributions: exponential, normal, and Weibull. When conducting exploratory data analysis, the Grubbs' test is used to identify outliers, and the least squares method is applied to select the most appropriate mixture distributions by minimizing the approximation error. The developed programme is written in the Python programming language using standard libraries and modules for data analysis. The novelty of the research lies in the development of a comprehensive software product that allows for a full cycle of data analysis: from the creation of new features to the visualisation of research results. The proposed tool allows comparison of both homogeneous mixtures of two distributions and heterogeneous mixtures using the residual error value, which expands the class of models considered in reliability problems. The result of the program's operation is the selection of the most suitable reliability function, which can be used to predict the time of uninterrupted operation of equipment for a given probability of failure. The developed program represents a ready-to-use tool that can be useful for engineers and reliability specialists to adequately assess the technical condition of equipment.

**Keywords:** reliability theory, reliability function, superposition of distributions, least squares method, Grubbs' test

### For citation

Novikova T.A., Lyapunsova E.V. Development of a Tool for Predicting Equipment Technical Condition of Based on the Superposition of Reliability Functions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 1, pp. 157-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-1-157-167>

### Введение

В настоящее время в условиях санкционного давления машиностроительная отрасль в России сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, по результатам опроса предприятий, проведенного Банком России в октябре 2024 года, 40 % предприятий работают с предельной загрузкой своих производственных мощностей [1]. Во-вторых, велика доля устаревших (22 %) и аварийных активов (5 %) [1]. При этом коэффициент обновления основных фондов в обрабатывающем производстве в 2024 году составил 5,6, что выше среднего показателя по всем отраслям на 1,4 пунктов [2]. Следовательно, отечественные производители в условиях максимального использования производственных активов работают в двух направлениях. С одной стороны, стараются обновлять основные фонды, но делают это постепенно из-за финансовых трудностей, обусловленных в том числе высокой ключевой ставкой. С другой стороны, ищут способы продлить срок службы парка машин, которые уже находятся на балансе предприятия. Следует

отметить, что процесс увеличения периода, в течение которого оборудование способно выполнять заявленные функции, имеет свои пределы, так как степень износа основных фондов в обрабатывающем производстве составляет более 50 % [2].

Увеличение срока полезного использования парка машин возможно с помощью эффективной организации системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которая определяет объем и сроки выполнения ремонтных мероприятий. Успешность процесса планирования данных мероприятий зависит от корректной и своевременной оценки технического состояния оборудования, проведение которой возможно с помощью методов теории надежности. Одним из таких методов является использование математической модели – функции надежности, определяющей вероятность безотказной работы системы за некоторое время.

В теории надежности в качестве функции надежности используются различные дискретные и непрерывные распределения. На практике наибольшее распространение получили следующие законы: экспонен-

циальное, нормальное, логнормальное, усеченное нормальное, равномерное, гамма-, биномиальное, геометрическое распределения, а также распределения Вейбулла, Рэлея и Пуассона [3, 4]. Каждое из перечисленных распределений имеет свои достоинства, недостатки и ограничения в области использования.

Например, в период форсированного изнашивания деталей целесообразно применять нормальный, логнормальный законы и закон Вейбулла [4, 5]. На этапе приработки можно использовать распределение Вейбулла и экспоненциальное распределение [5]. В период нормального изнашивания, для которого характерны внезапные отказы, применяется экспоненциальное распределение [3, 5]. Для оценки доли брака в выборочном контроле качества применяют биномиальное распределение, для идентификации отказов в стареющих системах может использоваться гамма-распределение и закон Рэлея, редкие и внезапные отказы случайной величины описываются распределением Пуассона, а для оценки погрешностей измерений возможно применение равномерного закона [5-7]. Таким образом, одиночные распределения, имеющие наибольшее практическое применение, невозможно использовать на разных этапах изнашивания деталей.

Следует отметить, что некоторые распределения не учитывают износ оборудования (равномерное, экспоненциальное, Пуассона, геометрическое), некоторые сложны при расчетах и интерпретации параметров (усеченное нормальное, логнормальное, гамма, Вейбулла). Кроме того, большинство перечисленных распределений (кроме равномерного) являются унимодальными (имеют одно значение моды), при этом эмпирические данные могут быть многомодальными. Ситуация, при которой реальные данные имеют несколько мод, может быть связана со следующими факторами. Во-первых, в рамках одной партии оборудования возможна гетерогенность, обусловленная разными поставщиками комплектующих, ремонтными бригадами, условиями и периодами эксплуатации. Во-вторых, оборудование машиностроительного комплекса является сложной технической системой, состоящей из различных деталей, узлов, агрегатов, каждый из которых имеет свою природу отказов, вызванных различными причинами (внезапные, постепенные, механические, электрические, связанные с условиями эксплуатации). Таким образом, ни одно унимодальное распределение не обеспечивает удовлетворительного соответствия эмпирическим данным, в связи с чем возникает ограниченность использования данных моделей на практике.

Для преодоления вышеописанных особенностей реальных данных может использоваться суперпозиция (смесь) нескольких функций надежности, которая представляет собой линейную комбинацию нескольких распределений. Плотность распределения суперпозиции можно найти по формуле [8]

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^k c_i \cdot f_i(x), \quad (1)$$

где  $f_i(x)$  – плотности распределения известных функций надежности;  $c_i$  – доля  $i$ -й плотности в суперпозиции,  $\sum_{i=1}^k c_i = 1$ .

При использовании суперпозиции каждый компонент взвешенной суммы может описывать конкретную причину отказа или определенную фазу изнашивания деталей, что позволяет нивелировать ограниченность применения унимодальных распределений.

Практическое применение суперпозиции описано в следующих исследованиях. Одной из первых работ по данной тематике является работа Кубарева А.И., в которой рассмотрена методика оценки параметров суперпозиционных законов методом разложения [9]. Особенности расчета параметров суперпозиции двух наиболее популярных распределений (нормального и экспоненциального, двух нормальных законов, двух законов Вейбулла, нормального закона и закона Вейбулла) представлены в работе Ставровского М.Е. [10]. В статье Артюшенко В. М. и Брускова А. А. для оценки надежности космических аппаратов предлагается использовать параметрическую модель, включающую несколько распределений Вейбулла и позволяющую описывать сложные технические системы со скрытыми внутренними дефектами [11]. Исследование Садыхова Г.С. и Кудрявцевой С.С. подтверждает расчет показателей надежности невозстанавливаемых изделий, функция надежности которых подчиняется суперпозиции двух экспоненциальных распределений [12]. Следует отметить, что подобное исследование – оценка надежности системы с учетом периода приработки с использованием смеси двух экспоненциальных законов – было проведено Бабаевым С.Г. Кроме того, Бабаевым С.Г. рассматривается оценка параметров суперпозиционной функции с помощью метода моментов в ситуации, когда аналитический вид функции распределения неизвестен [8]. Продолжением данного исследования являются работы Федотовой И.М., Вайнштейна В.И., Вайнштейна Ю.В. и Цибульско-го Г.М., в которых разработан алгоритм точечного оценивания методом моментов неизвестных параметров в смесях, образованных двумя или тремя распределениями (экспоненциальным, Эрланга, Рэлея, Максвелла) [13]. В результате проведенного анализа публикаций можно сделать вывод о том, что ни одно из исследований не предлагает математические выкладки для более чем четырех видов гетерогенных распределений. Кроме того, во всех работах, кроме работы Ставровского М.Е., рассматриваются гомогенные смеси (суперпозиция двух экспоненциальных законов, суперпозиция двух законов Вейбулла или суперпозиция  $n$  законов Эрланга, Рэлея, Максвелла).

Необходимо отметить, что указанные ученые в области надежности подчеркивают сложность оценки параметров суперпозиционной функции. Кубарев А.И. отмечает, что оценка параметров смеси функции по эмпирическим данным может быть затруднительной из-за многопараметричности данной функции [9]. Бабаев С.Г. отмечает, что наибольшей проблемой при оценке параметров суперпозиционных законов распределений является определение доли ( $C_i$ ) каждой функции в суперпозиции [8]. Федотова И.М., Вайнштейн В.И., Вайнштейн Ю.В. и Цибульский Г.М. подчеркивают, что оценка параметров суперпозиции усложняется при решении задачи расщепления смеси, при которой необходимо определить как вид распределений, входящих в смесь, так и их количество [13]. В связи с этим Ефремов Л.В. подчеркивает, что решение задачи суперпозиции практически невозможно без использования программных средств [14].

Следовательно, актуальной является разработка программного продукта, способного рассчитывать параметры смеси двух распределений, которые определяются путем комбинации трех наиболее популярных законов: экспоненциального, нормального, Вейбулла. Предлагаемый инструмент позволит из шести функций надежности выбирать одну смесь, которая максимально точно описывает эмпирические данные. Необходимо добавить, что на практике первичные данные об отказах оборудования могут включать в себя выбросные и пропущенные значения, которые требуют предварительной обработки перед включением признаков в математическую модель. В связи с этим целесообразно предусмотреть модуль, который будет выполнять разведочный анализ данных. Кроме того, следует разработать модуль, с помощью которого можно визуализировать полученные результаты.

Таким образом, целью данного исследования является разработка и апробация алгоритма, реализо-

ванного в виде программы для ЭВМ и способного проводить первичную предобработку данных, рассчитывать параметры шести смесей распределений, выбирать наиболее подходящую суперпозиционную функцию и визуализировать итоговое решение.

### Материалы и методы исследования

Разработка программы выбора наиболее подходящей функции надежности, подчиняющейся суперпозиции двух распределений, была реализована с помощью одного из самых популярных языков программирования в области анализа данных – Python (версия 3.10.12) и его основных модулей и библиотек (Numpy, Math, Scipy, Pandas, Matplotlib) [15, 16]. Алгоритм разработанной программы представлен на рис. 1. Программа включает в себя три компонента-модуля, которые выполняются последовательно, друг за другом.

Для демонстрации работоспособности разработанной программы был использован набор данных, в котором содержится информация о неисправностях трубонарезных станков с ЧПУ QK1327 за три года. Рассматриваемый станок используется для обработки крупногабаритных труб и валов на предприятиях машиностроительной отрасли. Станок предназначен для выполнения высокоточных операций, таких как нарезание резьбы (включая коническую и метрическую), подрезка торцов, проточка канавок и фасонное точение. Характеристики станка позволяют обрабатывать заготовки с максимальным диаметром до 1000 мм и весом до 6000 кг. Ключевыми узлами станка являются основание (станина), коробка подач, шпиндельная бабка, суппорт с резцедержателем и система ЧПУ, управляющая всеми перемещениями. Для определения неисправности конкретного элемента станок оснащен датчиками вибрации, температуры, давления.

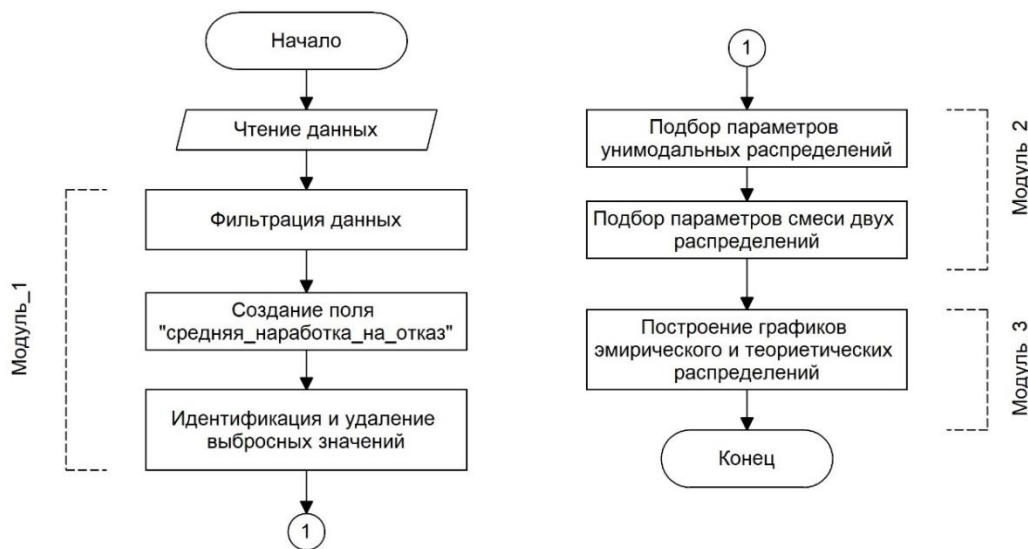


Рис. 1. Алгоритм программы выбора наиболее подходящей функции надежности  
 Fig. 1. Algorithm for selecting the most suitable reliability function

В рассматриваемом наборе содержится информация о неисправностях четырех станков. Набор включает в себя 876 записей и 9 полей: идентификатор станка (*machine*), название станка (*machine\_name*), идентификатор и наименование узла, в котором произошла неисправность (*unit* и *unit\_name* соответственно), тип неисправности (*message\_type*), подробное описание неисправности, составленное сотрудником, обслуживающим станок (*notes*), дата начала и окончания простоя оборудования (*begin\_date* и *end\_date*), код неисправности (*code*) (**рис. 2**).

Следует отметить, что в категориальной переменной «тип неисправности» возможно два значения: неисправности, приводящие к остановке станка (M1), и неисправности, не приводящие к остановке станка (M3). В свою очередь, в переменной, содержащей код неисправности (*code*), возможно четыре варианта значения: технические и технологические, плановые и неплановые. В рамках данного исследования были выбраны все неплановые неисправности (технические и технологические), приводящие к простоям оборудования (M1).

Рассмотрим особенности работы каждого модуля разработанной программы. Первый модуль проводит

разведочный анализ данных, в ходе которого обрабатываются пропущенные значения, идентифицируются и удаляются выбросные значения, создаются новые признаки и формируется набор данных, который можно использовать в математической модели. Во-первых, первоначальный набор фильтруется по двум полям: *message\_type* = M1 и *code* = «Технические неплановые» или *message\_type* = M1 и *code* = «Технологические неплановые». Во-вторых, создается новое поле – «время безаварийной работы станка» (*uptime\_period\_in\_days*) как разность между датой окончания и начала простоя оборудования:  $uptime\_period\_in\_days = end\_date - begin\_date$ .

В-третьих, проводится предварительная работа, необходимая для исключения из выборки выбросных значений для поля «время безаварийной работы станка», – создаются индексы строк. Следует отметить, что в теории анализа данных для принятия решения о необходимости удаления выбросных значений часто используется диаграмма размаха. На **рис. 3** построены подобные диаграммы для каждого из станков, на которых явно определяются выбросные значения.

machine	machine_name	unit	unit_name	message_type	notes	begin_date	end_date	code
0	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №1	TURN-0015-SP-01	ГЛАВНЫЙ ШПИНДЕЛЬ	M1	аварийный останов: перегрузка шпинделя при рас...	2019-01-21 0:00:00	2019-01-22 0:00:00	ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ
1	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №2	TURN-0032-TS-01	СИСТЕМА ПОДАЧИ И СЖАТОГО ВОЗДУХА	M3	падение давления воздуха, останов подачи охлаж...	2019-01-21 12:26:08	2019-02-25 0:00:00	ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ
2	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №3	TURN-0058-CS-01	СИСТЕМА ЧПУ SINUMERIK 840D	M3	сбой загрузки управляющей программы, требует п...	2019-01-21 15:35:26	2019-01-23 11:00:00	ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ
3	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №4	TURN-0074-TP-01	ЛЮНЕТ ПОДВИЖНЫЙ	M1	ошибка позиционирования люнета, датчик предела...	2019-02-21 16:33:00	2019-02-22 0:00:00	ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ
4	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №1	TURN-0015-LUB-01	СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СМАЗКИ	M1	авария по низкому уровню масла в системе смазк...	2019-03-07 16:36:01	2019-03-08 15:35:26	ТЕХНИЧЕСКИЕ НЕПЛАНОВЫЕ

Рис. 2. Пример данных, представленных в наборе

Fig. 2. An example of the data presented in the set

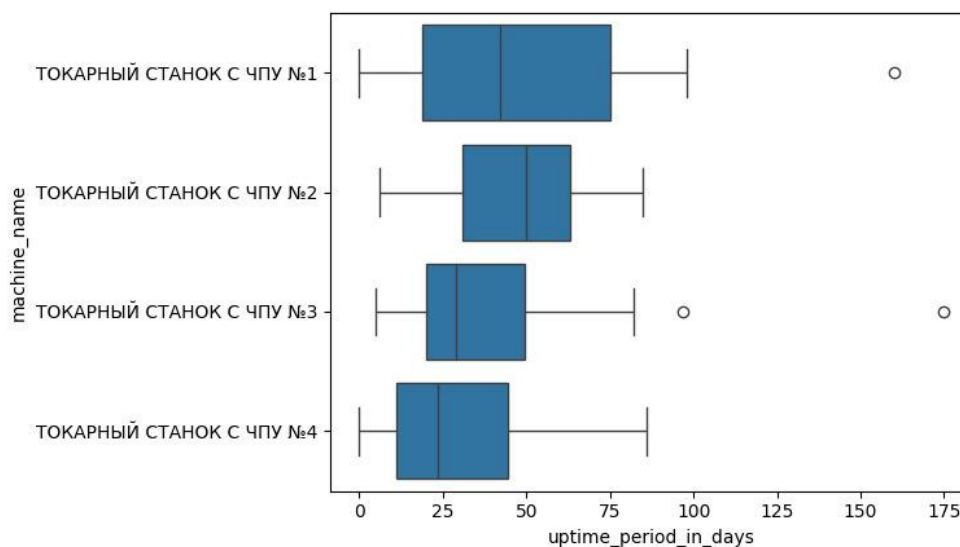


Рис. 3. Диаграмма размаха времени безотказной работы станков

Fig. 3. Box plot of machine uptime

Использование диаграммы размаха в автоматизированном анализе данных без визуального контроля со стороны исследователя является затруднительным, в связи с чем в разработанном модуле выбросные значения определяются с помощью критерия Граббса. Нулевая гипотеза для данного статистического теста предполагает, что в рассматриваемом наборе нет выбросных значений. Альтернативная гипотеза формулируется исходя из предположения, что не менее одного выбросного значения присутствует в рассматриваемой выборке. С помощью данного критерия можно идентифицировать значения, значительно отличающиеся от среднего. Данная процедура необходима в связи с потенциальным искажением статистик в результате проведения анализа при наличии выбросных значений. Критерий Граббса определяет максимальное абсолютное отклонение величины от выборочно-среднего, нормированное на среднеквадратичное отклонение [17]:

$$G = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{\sigma}, \quad (2)$$

где  $\bar{X}$  – выборочное среднее;  $X_i$  –  $i$ -е значение выборки;  $\sigma$  – среднее среднеквадратичное отклонение.

В-четвертых, в рамках работы первого модуля удаляются значения переменной «время безаварийной работы станка», связанные с некачественно проведенным ремонтом. Критерием для удаления является предположение о том, что если неисправность повторилась в течение суток после проведения ремонтных мероприятий – она не была полностью устранена, что привело к повторной остановке станка. В-пятых, формируется новый набор данных, содержащий два столбца (наименование станка и время безаварийной работы станка), который подается в качестве входных параметров для второго модуля.

Основное назначение второго модуля разработанной программы заключается в выборе наиболее подходящей функции надежности. Во-первых, рассчитываются параметры трех унимодальных распределений: экспоненциального, нормального и Вейбулла. В данном исследовании принято допущение о том, что тип распределений, входящих в суперпозиционную функцию, описывается одной из указанных функций. Определение параметров происходит с помощью встроенного метода `fit()`, который можно загрузить из стандартной библиотеки `scipy.stats`. Данный метод подбирает параметры теоретического распределения, которые наилучшим образом описывают эмпирические данные с помощью критерия максимального правдоподобия. Для выбранных распределений необходимо оценить следующие параметры: для экспоненциального закона – интенсивность или обратный коэффициент масштаба ( $1/\lambda$ ) и коэффициент сдвига ( $\mu$ ); для нормального закона – коэффициент сдвига ( $\mu$ ) и коэффициент масштаба ( $\sigma$ ); для зако-

на Вейбулла – коэффициент масштаба ( $\lambda$ ), коэффициент формы ( $k$ ) и коэффициент сдвига ( $\mu$ ).

Во-вторых, подбираются параметры суперпозиции двух распределений, которые могут быть представлены в виде формулы

$$F_{mix} = p \cdot func_1 + q \cdot func_2, \quad (3)$$

где  $p$  – вес первой функции распределения в смеси;  $q = (1 - p)$  – вес второй функции распределения в смеси;  $func_1$  и  $func_2$  – первая и вторая функции надежности.

Для определения параметров смеси была разработана пользовательская функция `fit_mixture()`, для которой в качестве аргументов передаются следующие переменные: массив данных (`data`), первое распределение ( $func_1$ ), второе распределение ( $func_2$ ), начальные параметры (`initial_guess`).

В качестве массива данных используется значение переменной «время безаварийной работы станка» (`uptime_period_in_days`), рассчитанное в первом модуле программы. Пара распределений ( $func_1$  и  $func_2$ ) определяется перебором возможных комбинаций трех унимодальных законов. Рассчитываются параметры следующих суперпозиционных функций: смесь двух экспоненциальных законов, смесь экспоненциального и нормального законов, смесь экспоненциального закона и закона Вейбулла, смесь двух нормальных законов, смесь нормального закона и закона Вейбулла, смесь двух законов Вейбулла.

Начальные параметры включают в себя вес каждого компонента смеси ( $p$ ,  $q$ ) и параметры унимодальных распределений, входящих в смесь (коэффициент сдвига, масштаба, формы), которые были определены на предыдущем этапе. Следует отметить, что начальные значения весов для разных законов ( $func_1 \neq func_2$ ) равны ( $p = q = 0,5$ ), в то время как для смеси гомогенных законов ( $func_1 = func_2$ ) начальные значения весов задаются следующим отношением:  $p = 0,25$  и  $q = 0,75$ .

Для определения параметров наиболее подходящей смеси необходимо выбрать критерий минимизации ошибки расхождения теоретической и эмпирической функций распределения. В качестве такого критерия был выбран метод наименьших квадратов (МНК), который подразумевает минимизацию суммы квадратов разности значений эмпирического и теоретического распределений:

$$\sum_{i=1}^i (F_{mix}(t_i) - e_i)^2, \quad (4)$$

где  $e_i$  – значение эмпирической функции распределения для  $i$ -го элемента набора данных;  $F_{mix}(t_i)$  – значение теоретической функции смеси для  $i$ -го элемента.

Для минимизации суммы используется встроенная функция `minimize` из библиотеки `scipy.optimize`, в которую необходимо передать значения целевой функции (`residuals` – сумма квадратов разности), начальные параметры (`initial_guess`), область возможных значений параметров (`bounds`) и алгоритм оптимизации (`method`). В данной работе в качестве алгоритма оптимизации используется встроенный в `scipy.optimize` квазиньютоновский метод L-BFGS-B.

Таким образом, для всех станков определяются параметры шести смесей двух распределений, рассчитывается значение невязки и выбирается наиболее подходящая смесь, для которой значение невязки минимально. Следует отметить, что под невязкой понимается разница между фактическим наблюдаемым значением и значением, спрогнозированным моделью. Результат проведенных расчетов аккумулируется в табличной форме, где указываются значения начальных и подобранных параметров, а также значение невязки для всех смесей и всех станков.

В-третьих, на заключительном этапе работы второго модуля все значения, полученные в результате работы предыдущих шагов, собираются и записываются в словарь.

Третий модуль с помощью встроенного метода `ECDF()` из библиотеки `statsmodels.distributions.empirical_distribution` позволяет построить графики теоретического (подобранная суперпозиционная функция) и эмпирического (реальные данные) распределений. На данном шаге выполнение разработанной программы завершается.

### Полученные результаты и их обсуждение

Результатом работы алгоритма, реализованного с помощью программы ЭВМ для рассмотренного набора данных являются следующие данные. Итоговым результатом работы первого модуля программы является набор данных (`dataframe`), включающий два поля: `machine_name` и `uptime_period_in_days`. Результаты выполнения второго модуля программы можно разбить на промежуточные и итоговые. На первом этапе выполнения второго модуля подбираются параметры трех унимодальных распределений, которые используются в качестве первоначальных параметров смеси двух распределений. Результат подбора данных

параметров является промежуточным и представлен на **рис. 4**.

На втором этапе работы второго модуля программы на основе подобранных параметров унимодальных распределений рассчитываются параметры смеси двух распределений. Данные результаты являются итоговыми и представлены в **табл. 1**. Следует отметить, что для примера представлен результат расчетов для первого станка №1. В таблице указано значение веса первой функции ( $p$ ), значение второй функции в смеси можно рассчитать как разность единицы и веса первой функции ( $1 - p$ ). Если  $p = 0$ , то смесь вырождается в одну функцию распределения (вторую). Если  $p = 1$ , то смесь вырождается в одну функцию распределения (первую).

Наиболее подходящая функция надежности для станка №1 описывается смесью нормального распределения и распределения Вейбулла, так как данной смеси соответствует минимальное значение невязки.

Результатом работы третьего модуля программы являются построенные графики эмпирического и теоретических распределений, которые представлены на **рис. 5** для станка №1. На графиках используются следующие обозначения: `ECDF` (от англ. `Empirical Cumulative Distribution Function`) – эмпирическая функция распределения, `Fitting` – теоретическая функция распределения (суперпозиция двух функций).

Следует отметить, что для демонстрации целесообразности использования суперпозиции двух распределений были рассчитаны параметры трех унимодальных распределений для рассматриваемых станков. В **табл. 2** представлены значения функции невязки для всех станков и всех распределений.

Цветом выделены минимальные значения невязки для каждого станка. Можно определить, насколько в среднем лучше суперпозиция двух функций аппроксимирует теоретические данные по сравнению с унимодальным распределением. Для станка №1 точность повышается на 96%, для станков №2-4 – на 82%. Таким образом, использование суперпозиции повышает точность прогноза в среднем на 85%.

Таким образом, для станков №1, 2 и 4 наиболее подходящая функция надежности описывается смесью нормального распределения и распределения Вейбулла, а для станка №3 – смесью двух распределений Вейбулла.

	<code>machine_name</code>	<code>expon_loc</code>	<code>expon_scale</code>	<code>norm_loc</code>	<code>norm_scale</code>	<code>weibull_c</code>	<code>weibull_loc</code>	<code>weibull_scale</code>
0	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №1	0.0	46.786684	47.793684	29.659446	1.679252	-3.005898E+00	55.619061
1	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №2	0.0	35.010526	35.010526	25.898789	1.291301	-2.970057E-01	38.069036
2	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №3	1.0	34.341463	35.341463	22.347161	1.612871	5.821181E-04	39.433547
3	ТОКАРНЫЙ СТАНОК С ЧПУ №4	0	29.322222	29.322222	22.781975	0.670072	-5.612590E-25	19.111894

Рис. 4. Результат расчета параметров трех унимодальных распределений  
Fig. 4. The result of calculating the parameters of three unimodal distributions

Таблица 1. Результаты работы второго модуля для станка №1  
 Table 1. Results of the second module for machine №1

Начальные приближения			Подобранные параметры			Значение невязки
Вес	Параметры 1-го распределения	Параметры 2-го распределения	Вес	Параметры 1-го распределения	Параметры 2-го распределения	
Аппроксимация смесью экспоненциальное + экспоненциальное						
$p = 0,25$	$\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 23,39$	$\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 70,18$	$p = 0,46$	$\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 48,43$	$\mu = 10,57$ $\frac{1}{\lambda} = 48,42$	0,32
Аппроксимация смесью экспоненциальное + нормальное						
$p = 0,5$	$\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 46,79$	$\mu = 47,76$ $\sigma = 29,66$	$p = 0,74$	$\mu = 4,47$ $\frac{1}{\lambda} = 33,61$	$\mu = 76,72$ $\sigma = 6,68$	0,02
Аппроксимация смесью экспоненциальное + Вейбулла						
$p = 0,5$	$\mu = 0$ $\frac{1}{\lambda} = 46,79$	$k = 1,68$ $\mu = -3,01$ $\lambda = 55,62$	$p = 0,74$	$\mu = 4,33$ $\frac{1}{\lambda} = 34,14$	$k = 11,54$ $\mu = 9,58$ $\lambda = 69,48$	0,022
Аппроксимация смесью нормальное + нормальное						
$p = 0,25$	$\mu = 23,39$ $\sigma = 14,83$	$\mu = 70,18$ $\sigma = 44,49$	$p = 0,54$	$\mu = 20,94$ $\sigma = 13,76$	$\mu = 75,59$ $\sigma = 13,3$	0,037
Аппроксимация смесью нормальное + Вейбулла						
$p = 0,5$	$\mu = 46,79$ $\sigma = 29,66$	$k = 1,68$ $\mu = -3,01$ $\lambda = 55,62$	$p = 0,26$	$\mu = 77,14$ $\sigma = 6,89$	$k = 1,06$ $\mu = 3,56$ $\lambda = 34,47$	0,019
Аппроксимация смесью Вейбулла + Вейбулла						
$p = 0,25$	$k = 0,84$ $\mu = -1,5$ $\lambda = 27,81$	$k = 2,51$ $\mu = -4,51$ $\lambda = 83,43$	$p = 0,57$	$k = 1,54$ $\mu = 0,1$ $\lambda = 26,49$	$k = 6,87$ $\mu = 0$ $\lambda = 81,16$	0,025

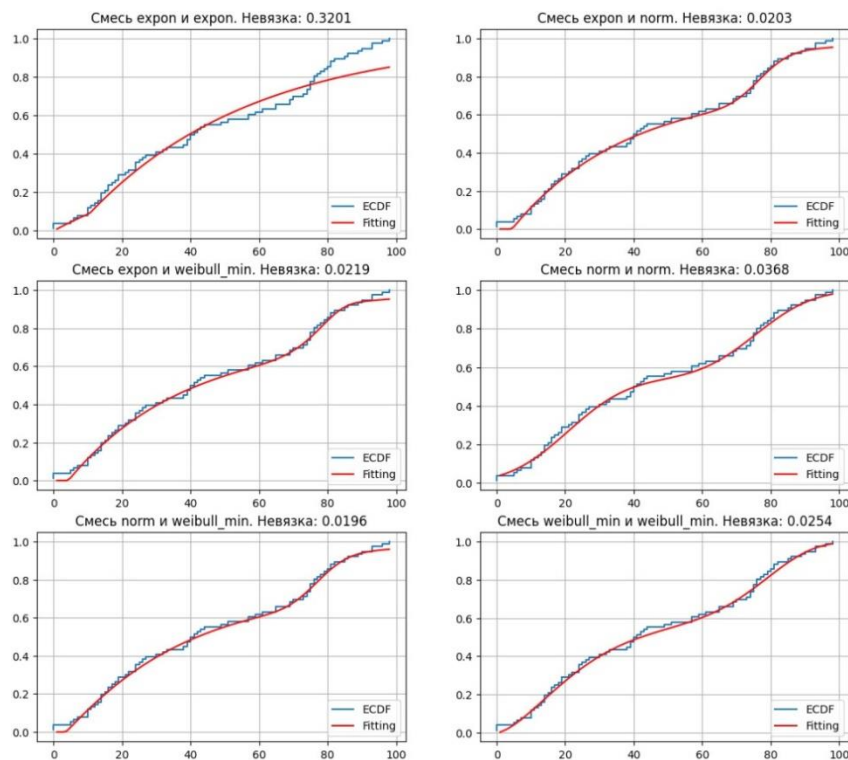


Рис. 5. Графики эмпирического и теоретических распределений для станка №1  
 Fig. 5. Graphs of empirical and theoretical distributions for machine №1

Таблица 2. Значение невязки для всех единиц оборудования всех распределений  
 Table 2. The residual error value for all equipment units across all distributions

Функция надежности	Станок №1	Станок №2	Станок №3	Станок №4
	Значение невязки			
Унимодальные распределения				
Экспоненциальное	0,735	1,369	0,379	0,176
Нормальное	0,511	0,063	0,371	0,238
Вейбулла	0,447	0,062	0,087	0,085
Суперпозиция двух распределений				
Экспоненциальное + экспоненциальное	0,320	0,046	0,066	0,121
Экспоненциальное + нормальное	0,020	0,014	0,030	0,019
Экспоненциальное + Вейбулла	0,022	0,014	0,071	0,017
Нормальное + нормальное	0,037	0,014	0,017	0,015
Нормальное + Вейбулла	0,019	0,011	0,016	0,015
Вейбулла + Вейбулла	0,025	0,011	0,016	0,017

При известной функции надежности можно прогнозировать отказ оборудования. В табл. 3 представлены результаты прогнозирования периодов выхода из строя для четырех станков. Следует отметить, что функция надежности прогнозирует момент наступления отказа для заданной вероятности, то есть через  $N$  дней наступит отказ с вероятностью  $A$ . В качестве данного уровня вероятности было выбрано значение, равное 60%.

Таблица 3. Результаты прогнозирования периодов наступления отказов для четырех станков  
 Table 3. Results of predicting failure periods for four machines

Номер станка	Наиболее подходящая функция надежности	Время бесперебойной работы, дни
Токарный станок с ЧПУ №1	Смесь нормального распределения и распределения Вейбулла	59
Токарный станок с ЧПУ №2	Смесь нормального распределения и распределения Вейбулла	54
Токарный станок с ЧПУ №3	Смесь двух распределений Вейбулла	33
Токарный станок с ЧПУ №4	Смесь нормального распределения и распределения Вейбулла	33

При известном времени бесперебойной работы парка оборудования можно планировать объем и частоту ремонтных мероприятий.

### Заключение

В рамках проведенного исследования была достигнута поставленная цель – разработана программа, позволяющая выбирать наиболее подходящую функцию надежности, подчиняющуюся законам суперпозиции. Можно выделить две особенности разработанного инструмента. Во-первых, программа интегриру-

ет три модуля: предобработка данных, выбор суперпозиции двух распределений и визуализация полученных результатов. Во-вторых, осуществлена комплексная параметризация и сравнительный анализ шести смесей унимодальных функций надежности (экспоненциальной, нормальной и Вейбулла). Практическая ценность работы подтверждена апробацией программы на реальных данных. Разработанный инструмент может быть использован инженерами и специалистами в области надежности для повышения точности прогнозирования технического состояния оборудования, оптимизации стратегии ТОиР и планирования жизненного цикла изделий.

### Список источников

1. Данные опросов /Мониторинг предприятий [Электронный ресурс]. [http://www.cbr.ru/Content/Document/File/135603/mp\\_survey\\_data.xlsx](http://www.cbr.ru/Content/Document/File/135603/mp_survey_data.xlsx). Проверено 08.12.2025.
2. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. <https://rosstat.gov.ru>. Проверено 08.12.2025.
3. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Аухадеев А.Э. Практическое применение нормального закона распределения в теории надежности технических систем // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 4. С. 96-99.
4. Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Т. 1. С. 35-38.
5. Случанинов Н.Н., Федоров И.В., Кошкин С.В. Определение основных показателей надежности функционально-структурных схем механизмов и машин // Специальная техника и технологии транспорта. 2020. № 6(44). С. 161-167.
6. Обоскалов В.П., Кокин С.Е., Кирпикова И.Л. Применение вероятностно-статистических методов и теории графов в электроэнергетике: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 271 с.

7. Надежность изделий и систем / Велеулов З.А., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В., Фирюлин Д.Р. СПб.: Университет ИТМО, 2023. 184 с.
8. Бабаев С.Г., Габиров И.А., Меликов Р.Х. Основы теории надежности нефтепромышленного оборудования: учебник / под общ. ред. С.Г. Бабаева. Баку: Изд-во АГНА, 2015. 400 с.
9. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1977. 264 с.
10. Основы функционирования систем сервиса: учебник для вузов / М.Е. Ставровский [и др.]; под ред. М.Е. Ставровского. М.: Юрайт, 2025. 190 с.
11. Артюшенко В.М., Брусков А.А. Применение распределения Вейбулла для оценок надежности космических аппаратов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 2. С. 89-102.
12. Садыхо Г.С., Кудрявцева С.С. Расчет и оценка показателей надежности невосстанавливаемых объектов при наработках, распределенных как смесь двух экспоненциальных распределений // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 1. С. 29-31.
13. Функция восстановления при наработках с распределениями как смесь  $n$  экспоненциальных распределений. Нахождение параметров смесей методом моментов / И.М. Федотова, В.И. Вайнштейн, Г.М. Цибульский, Ю.В. Вайнштейн // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 104-112.
14. Ефремов Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб.: Наука, 2008. 216 с.
15. Усачева А.Б., Галиаскаров Д.Р. Библиотеки Python для анализа данных // Colloquium-Journal. 2020. № 29-1(81). С. 58-59.
16. Ларин С.Э., Белаш В.Ю. Библиотеки Python для анализа данных: предобработка и подготовка данных // Дневник науки. 2023. № 12(84).
17. Ширяева Л.К. О некоторых свойствах распределения двусторонней статистики Граббса // Российская наука: актуальные исследования и разработки: сборник научных статей XI Всероссийской научно-практической конференции. Самара, 25 февраля 2021 года. В 2-х частях. Часть 1. Самара: Самарский государственный экономический университет, 2021. С. 43-47.
5. Sluchaninov N.N., Fedorov I.V., Koshkin S.V. Determination of the main reliability indicators of functional and structural schemes of mechanisms and machines. *Spetsialnaya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special equipment and transport technologies]. 2020;(6(44)):161-167. (In Russ.)
6. Oboskalov V.P., Kokin S.E., Kirpikova I.L. *Primenenie veroyatnostno-statisticheskikh metodov i teorii grafov v elektroenergetike: ucheb. posobie* [Application of probabilistic statistical methods and graph theory in the electric power industry: textbook]. Yekaterinburg: Publishing house of UrFU, 2016, 271 p. (In Russ.)
7. Veleulov Z.A., Kinzhagulov I.Yu., Fedorov A.V., Firyulin D.R. *Nadezhnost izdeliy i sistem* [Reliability of products and systems]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2023, 184 p. (In Russ.)
8. Babaev S.G., Gabibov I.A., Melikov R.X. *Osnovy teorii nadezhnosti neftepromyslovogo oborudovaniya. Uchebnik* [Fundamentals of the theory of reliability of oilfield equipment. Textbook]. Baku: AGNA Publishing house, 2015, 400 p. (In Russ.)
9. Kubarev A.I. *Nadezhnost v mashinostroenii* [Reliability in mechanical engineering]. Standards publishing house, 1977, 264 p. (In Russ.)
10. Stavrovskiy M.E. *Osnovy funktsionirovaniya sistem servisa: uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of the functioning of service systems: textbook for universities]. Moscow: Yurait Publishing house, 2025, 190 p. (In Russ.)
11. Artyushenko V.M., Bruskov A.A. Application of the Weibull distribution for spacecraft reliability estimates. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and Information Technology]. 2024;(2):89-102. (In Russ.)
12. Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. Calculation and evaluation of reliability indicators of non-recoverable objects at operating times distributed as a mixture of two exponential distributions. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium]. 2020;1:29-31. (In Russ.)
13. Fedotova I.M., Vainshtein V.I., Tsibulskiy G.M., Vainshtein Yu.V. The recovery function for operating time with distributions as a mixture of  $n$  exponential distributions. Finding the parameters of mixtures by the method of moments. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2019;(3):104-112. (In Russ.)
14. Efremov L.V. *Praktika veroyatnostnogo analiza nadezhnosti tekhniki s primeneniem kompyuternykh tekhnologiy* [The practice of probabilistic reliability analysis using computer technology]. Saint Petersburg: Nauka, 2008, 216 p. (In Russ.)
15. Usacheva A.B., Galiaskarov D.R. Python libraries for data analysis. *Colloquium-Journal* [Colloquium-Journal]. 2020;(29-1(81)):58-59. (In Russ.)
16. Larin S.E., Belash V.Yu. Python libraries for data analysis: data preprocessing and preparation. *Dnevnik nauki* [Diary of science]. 2023;(12(84)). (In Russ.)

### References

1. Survey data. *Monitoring predpriyatiy* [Enterprises monitoring]. Available at: [http://www.cbr.ru/Content/Document/File/135603/mp\\_survey\\_data.xlsx](http://www.cbr.ru/Content/Document/File/135603/mp_survey_data.xlsx). (Accessed on December 08, 2025).
2. Federal State Statistics Service. Available at: <https://rosstat.gov.ru>. (Accessed on December 08, 2025).
3. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Aukhadeev A.E. Practical application of the normal distribution law in the theory of reliability of technical systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2016;(4):96-99. (In Russ.)
4. Litvinenko R.S., Idiyattullin R.G., Aukhadeev A.E. Analysis of the use of exponential distribution in the theory of reliability of technical systems. *Trudy mezhdunarodnogo*

17. Shiryayeva L.K. On some properties of the distribution of two-way Grubbs statistics. *Rossiiskaya nauka: aktualnye issledovaniya i razrabotki: Sbornik nauchnykh statey XI Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Russian science: current research and development. Collection of scientific articles of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference]. Samara: Samara State University of Economics, 2021, pp. 43-47. (In Russ.)

Поступила 10.12.2025; принята к публикации 17.02.2026; опубликована 31.03.2026  
Submitted 10/12/2025; revised 17/02/2026; published 31/03/2026

**Новикова Татьяна Алексеевна** – аспирант,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Email: boiko\_tatjana@mail.ru. ORCID 0000-0003-1734-2827

**Ляпунцова Елена Вячеславовна** – доктор технических наук, профессор,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Email: lev77@me.com. ORCID 0000-0002-3420-3805

**Tatyana A. Novikova** – Postgraduate Student,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Email: boiko\_tatjana@mail.ru. ORCID 0000-0003-1734-2827

**Elena V. Lyapunsova** – DrSc (Eng.), Professor,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Email: lev77@me.com. ORCID 0000-0002-3420-3805