

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ДЕТАЛИ РЕАКТИВНОГО НАПЁРСТКА

Гусейнов А.Г.¹, Асадов Ш.А.¹, Гусейнзаде М.Б.², Мирзазаде Н.М.²

¹Азербайджанский технический университет, Баку;

²Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, Баку

Ключевые слова: теория надёжности, нормальное распределение, распределение Вейбулла, статистический анализ, реактивный напёрсток, ресурсные показатели, критерий Пирсона, трибологический износ.

Аннотация. В статье проведён статистический анализ показателей надёжности прецизионной детали реактивного напёрстка на основе нормального закона распределения и распределения Вейбулла. С использованием критерия согласия Пирсона χ^2 выполнено сопоставление экспериментальных и теоретических данных. Установлено, что нормальное распределение наиболее адекватно описывает ресурсные характеристики исследуемой детали.

OPTIMIZATION OF THE CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS OF THE PRECISION PART OF THE JET THIMBLE

Huseynov A.G.¹, Asadov Sh.A.¹, Huseynzade M.B.², Mirzazade N.M.²

¹Azerbaijan Technical University, Baku;

²Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku

Keywords: reliability theory, normal distribution, Weibull distribution, statistical analysis, reactive thimble component, service life indicators, Pearson criterion, tribological wear.

Abstract. This article presents a statistical analysis of the reliability parameters of a precision thimble component based on the normal and Weibull distributions. The Pearson χ^2 goodness-of-fit test is used to compare experimental and theoretical data. It is established that the normal distribution most adequately describes the service life characteristics of the component under study.

Введение

Надёжность и эксплуатационная устойчивость современных технических систем, особенно для высоконагруженных и прецизионных деталей, напрямую зависят от правильной оценки и прогнозирования их ресурсных показателей. Конструктивные элементы, работающие в системах специального назначения, подвергаются интенсивным механическим, тепловым и трибологическим нагрузкам. В результате этого на рабочих поверхностях возникают износ, нарушение размерной стабильности и снижение функциональных характеристик. В связи с этим статистический анализ показателей надёжности и установление законов распределения имеют важное научно-практическое значение для оценки ресурса деталей и повышения эксплуатационной надёжности.

Поскольку показатели надёжности носят случайный характер, их исследование должно основываться на статистических законах распределения. В практике анализа надёжности технических систем наиболее широко применяются нормальный закон распределения и распределение Вейбулла. Нормальное распределение позволяет описывать симметричный характер производственно-эксплуатационной изменчивости, тогда как распределение Вейбулла более

адекватно отражает нелинейный и зависящий от времени характер процессов изнашивания и отказов.

Оценка соответствия экспериментальных данных теоретическим моделям проводится с использованием статистических критериев согласия, в частности критерия Пирсона χ^2 . Такой подход позволяет определить, какой закон распределения наиболее точно описывает эмпирические данные, а также повысить точность прогнозирования показателей надёжности.

Целью настоящего исследования является изучение возможностей применения нормального закона и распределения Вейбулла для статистического анализа ресурсных показателей детали реактивного напёрстка прецизионных деталей и сравнительная оценка их соответствия экспериментальным данным.

Методика исследования. Объектом исследования являются показатели надёжности и ресурса детали прецизионной детали, формирующиеся в процессе эксплуатации. В ходе исследования статистическими методами анализировались изменения, возникающие на рабочей поверхности детали под воздействием трибологического износа, термоэрозии и ударно-абразивных нагрузок [1].

Для определения статистического распределения показателей надёжности использован нормальный закон распределения, функция плотности вероятности которого имеет вид [2]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение, $\bar{x}$ – среднее значение, x – показатель надёжности.

По интервалам статистического ряда были рассчитаны значения функции плотности вероятности и функции распределения, на основе которых построены дифференциальные и интегральные графики. С помощью интегральной функции была выполнена оценка ожидаемого числа отказавших деталей на заданном интервале.

Для сглаживания эмпирических данных было использовано распределение Вейбулла, функция плотности которого записывается следующим образом:

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b},$$

где a и b – параметры распределения.

Согласованность статистических моделей с экспериментальными данными оценивалась по критерию Пирсона χ^2 [3]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_b} \frac{(m_i - m_{Ni})^2}{m_{Ni}},$$

где m_i – экспериментальная частота, m_{Ni} – теоретическая частота.

Результаты исследования. В результате проведённого статистического анализа установлено, что среднее значение ресурсного показателя прецизионной детали составляет приблизительно 32,7 мм, а стандартное отклонение – $\sigma \approx 0,1$. Небольшое значение дисперсии свидетельствует об общей устойчивости параметров исследуемой выборки.

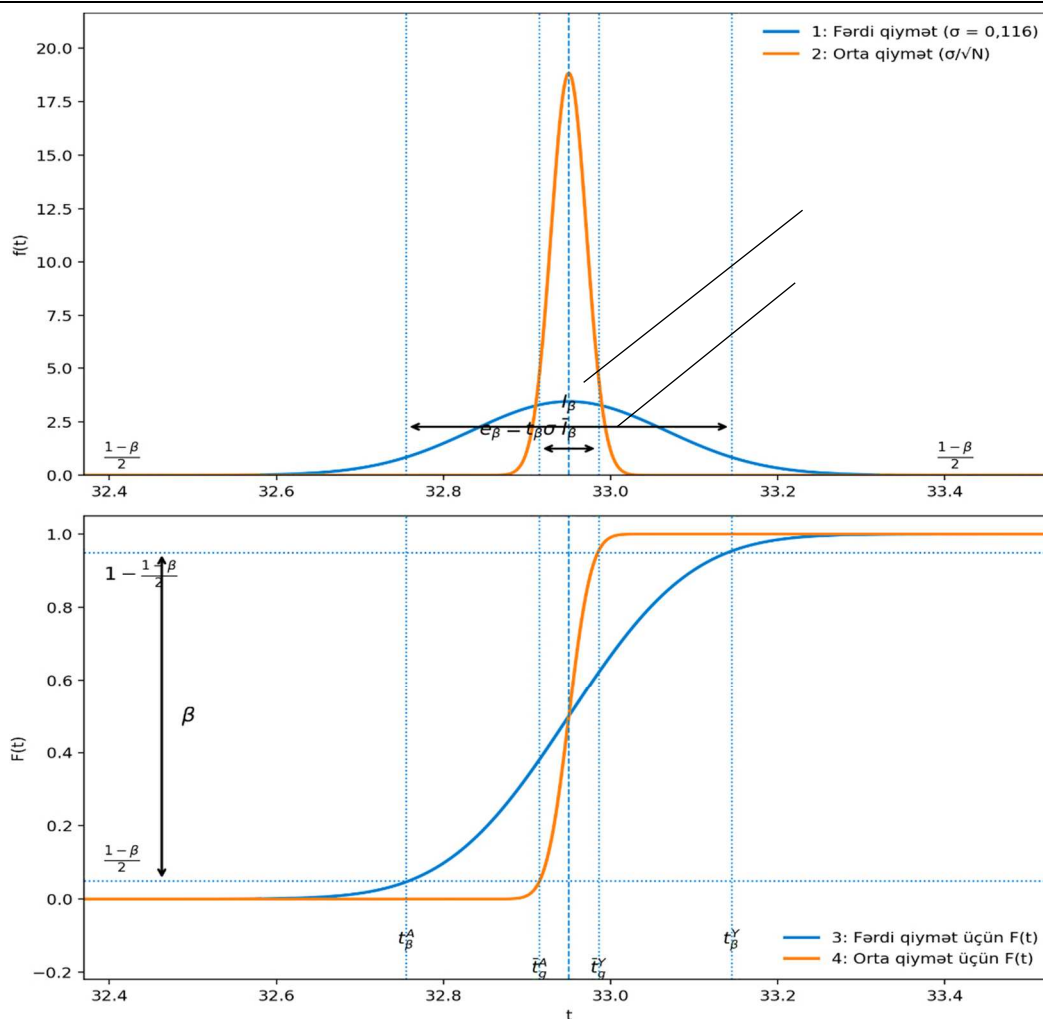


Рис. 1. Доверительные интервалы единичных и средних значений показателя надежности: 1 и 3 – дифференциальные и интегральные функции единичного значения; 2 и 4 – дифференциальные и интегральные функции среднего значения; А – закон нормального распределения; В – закон распределения Вейбулла

В результате выполненного исследования был проведён статистический анализ показателей надёжности прецизионной детали. Установлено, что ударно-абразивный износ, термоэрозия и термопластические деформации, возникающие на рабочей поверхности детали, приводят к снижению её эксплуатационного ресурса.

Сравнительный анализ эмпирических данных (рис. 1), на основе нормального закона и распределения Вейбулла показал, что для описания ресурсных показателей прецизионной детали более целесообразно использовать нормальный закон распределения.

Выводы

1. Определение доверительных границ и доверительного интервала позволяет оценить диапазон изменения показателей надёжности, снизить эксплуатационные риски и оптимизировать интервалы технического обслуживания.

2. Предложенный статистический подход может быть использован для повышения надёжности машин и оборудования с применением прецизионных элементов.

3. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования ресурсных показателей и обоснования конструктивно-технологических мероприятий по совершенствованию прецизионных деталей.

Список литературы

1. Huseynov A.G., Asadov Sh.A., Nazarov I.A. Assessment of the wear of the working surface of the reactive thimble // Universum: Технические науки. – 2022. – №2(95). – С. 9-11.
2. Huseynov A.G., Asadov Sh.N., Huseynli F.S., Asadov Sh.A. Modeling of the thermo-deformation behavior in a laser-hardened “Plunger-Barrel” pair considering wear effects // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri. 2025, vol. 17, no. 4, pp. 42-50. <https://journal.ama.com.az/index.php/pub/article/view/325/299>.
3. Huseynov A., Huseynli F., Safarov M. Reliability Prediction of Precision Parts of Fuel Pumps with Enhanced Surface Hardness Achieved Through Laser Technology // Tribologia - Finnish Journal of Tribology. 2025, vol. 42(1-2), pp. 64-71. doi.org/10.30678/fjt.152491.

Сведения об авторах:

Гусейнов Алекпер Гюльяхмед оглы – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Специальные технологии и оборудование»;

Асадов Шамхал Азер оглу – ассистент кафедры «Специальные технологии и оборудование»;

Гусейнзаде Микаил Бабек оглы (Huseynzade Mikail) – докторант;

Мирзазаде Нахид Мирза оглы (Mirzazade Nihad) – докторант.