

Касьянов Валерий Евгеньевич

Kasajnov Valerii. E

Ростовский государственный строительный университет

Rostov State University of Civil Engineering

Профессор / Professor

Доктор технических наук, профессор

Теплякова Светлана Викторовна

Teplyakova Svetlana. V.

Ростовский государственный строительный университет

Rostov State University of Civil Engineering

Аспирант / Aspirant

E-Mail: svetlana.kotova.89@mail.ru

05.05.04 Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Методы обеспечения абсолютной безотказности деталей машин

Methods of reliability of machine parts

Аннотация: В статье предлагается метод обеспечения абсолютной безотказности деталей и машин. Применение изложенного метода обеспечивает ноль отказов за заданный ресурс детали 20 тыс. ч. и незначительное увеличение цены детали примерно на 2-4%.

The Abstract: The article proposes a method to ensure absolute reliability of parts and machines. Application of the above method provides zero failures during the specified resource parts 20 thousand hours and a slight increase the prices of details about 2-4%.

Ключевые слова: Выборка, совокупность, ресурс, безотказность, Вейбулл.

Keywords: Sample, population, resource, reliability, Weibull.

Проблема создания машины без отказов занимала умы многих исследователей на протяжении многих лет. Создаваемые и эксплуатируемые машины (узлы и детали) в разных отраслях промышленности в первой половине XX в. первоначально в небольших объемах выпуска довольно часто отказывали и требовали соответственно тех или иных затрат на ремонт. Кроме того, машины того периода характеризовались довольно большим объемом технического обслуживания.

К концу XX в. машины уже выпускались мировыми производителями сотнями тысяч и миллионами штук в год. При таких объемах производства машин затраты на ремонт по отдельным видам достигали 30-40% и более от стоимости новых машин. Из-за этого эффективность эксплуатации машин в СССР с плановой экономикой при отсутствии конкурентного поля существенно снизилась.

Данное положение вызвало необходимость проведения интенсивных научных исследований для создания машин без отказов на фоне исторически сложившейся системы (в указанный выше период) «если машина работает, то она обязательно ломается и требует ремонта».

Попытки поиска литературы, посвященной созданию машин без отказов, не дали

результатов. С одной стороны действительно отсутствовали публикации на эту тему, а с другой имела место коммерческая тайна, обеспечивающая производителям машин необходимую конкурентоспособность. Поэтому научный коллектив нашей кафедры с начала 70-х годов начал проводить исследования в области разработки метода создания машины абсолютной безотказности [1].

Рассмотрим предварительные замечания.

Особенностью науки и практики обеспечения надежности машин и их составных частей является использование одного из направлений математики – теории вероятностей и математической статистики. Основание этому – значительные объемы статистической информации из-за сравнительно больших генеральных совокупностей машин – это от 100 и до миллионов единиц и выборки из них – 10-100 и более.

Кроме этого значительное влияние на эти объемы информации имеет факт того или иного рассеивания ряда параметров.

В большинстве учебной литературы по теории вероятностей и математической статистике рассматриваются генеральные совокупности бесконечного объема.

Для аппроксимации полигонов вероятностных распределений случайных величин бесконечного объема используют ряд законов с пределами - ∞ , 0, $+\infty$: нормальный, логнормальный, Вейбулла с двумя параметрами и др.

Человек же в своей деятельности (работа, быт, спорт, хобби и др.) оперирует с генеральными совокупностями конечного объема, т.к. и продолжительность жизни не бесконечна. Лишь в некоторых учебниках и монографиях эти разделы математики рассматривают генеральные совокупности конечных объемов (величин). При этом используются законы с ограничениями.

Если генеральная совокупность больше 10^2 , то обработку статистических данных обычно выполняют по выборкам в объеме от 5 до 100-200. При аппроксимации полигона распределения выборочных случайных величин объемом более 50 (требование критерия Мизеса ω^2) следует использовать вероятностные законы с ограничениями в области левой или правой ветвей кривой распределения, например, закон Вейбулла с тремя параметрами или закон Фишера-Типпета.

Анализ компьютерных экспериментов по формированию выборок из генеральных совокупностей $N_c=10^3-10^5$ показал, что среднее квадратическое отклонение выборок всегда меньше, чем у генеральной совокупности и, соответственно, сдвиги распределений прочности и ресурса завышены.

Это позволило объяснить ранние отказы машин, принадлежащих генеральной совокупности.

На рис. 1 представлены функции распределения ресурсов генеральных совокупностей конечного объема (далее совокупностей) деталей машины. На ней обозначен заданный ресурс машины, интервал рассеивания моделированных сдвигов ресурсов совокупностей конечного объема. Для установления требований к минимальному ресурсу i -ой детали необходимо сдвинуть интервал рассеивания на 15% от минимального ресурса и получить в результате этого ресурс i -ой детали с запасом 15% (15% принято по аналогии со статическим расчетом на прочность с коэффициентом запаса $K_3=1,15$).

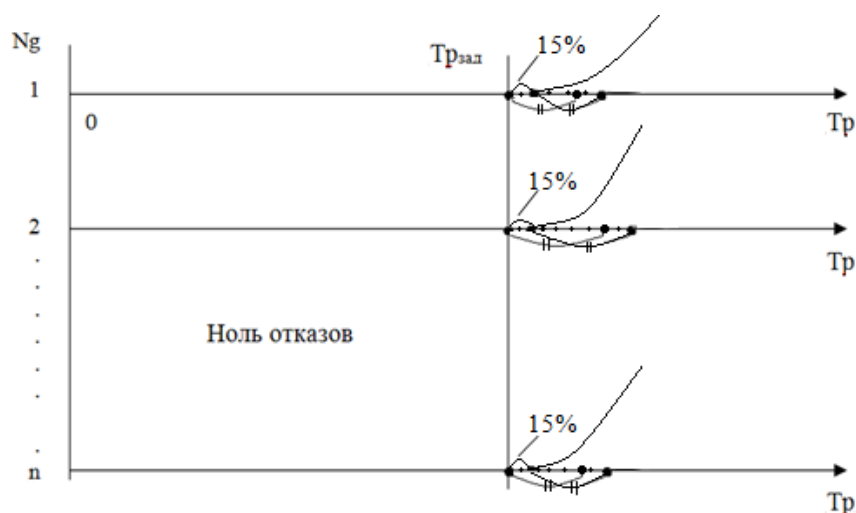


Рис. 1. Функции распределения ресурсов совокупностей деталей машины

Вместе с тем для ответственных деталей, узлов и машины в целом может оказаться недостаточным требование на ВБР $0,99 - 0,95$. В этом случае возникает задача определения необходимого увеличения цены ответственных деталей узлов машины при условии отсутствия отказов за заданный ресурс, т.е. получения ВБР $P(T_{рз})=1$.

Обычно машина состоит из нескольких групп деталей (элементов): базовых, сложных, стандартизированных, типовых и простых. В принципе необходимо для каждой детали найти оптимальные параметры по прочности и нагруженности для заданного ресурса на деталь и соответственно на машину.

Ранее выполненные расчеты, связанные с оптимальными параметрами или оптимальным гамма-процентным ресурсом детали показали, что для многих деталей вероятность безотказной работы составляет $P=0,99-0,95$. Больше значение вероятности безотказной работы $P=0,94-0,95$ соответствовали базовым деталям. Это означает, что допускается один отказ на 10 тыс. или 100 тыс. деталей. Вместе с тем для обеспечения безопасности базовых деталей важно получить их параметры, которые бы имели вероятность отказа $Q=0$. При этом немаловажно оценить величину увеличения цены такой детали. В случае 5 – 20% увеличения цены целесообразно повысить прочность или снизить нагруженность, обеспечив тем самым 0 отказов за заданный ресурс T_r детали.

Около 30 лет назад была подготовлена статья [2] о принципах создания практически безотказных машин. В данной статье для аппроксимации статистических данных об отказах деталей применен закон Вейбулла, позволяющий определить минимальное значение ресурса деталей как сдвиг распределения Вейбулла. При этом статистические данные об отказах получены по выборке деталей в количестве 20-50 единиц [3]. Вместе с тем известно, что обычно эксплуатируются сотни, тысячи, десятки тысяч и т.п. одинаковых единиц, образующих совокупность. Поэтому при оптимизации вероятности безотказной работы деталей следует использовать параметры трехпараметрического закона Вейбулла, определенных по совокупности, а не по выборке [4].

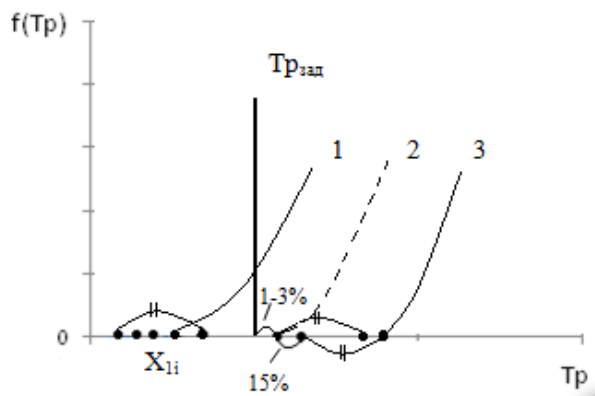


Рис. 2. Гарантированный безотказный ресурс детали для совокупности: 1, 2, 3 – распределение ресурса данной детали; после увеличения ресурса; гарантированный ресурс смещен еще на 15%

Для гарантии при сдвиге полученного расположения отказов и особенно минимального значения, необходимо обеспечить $T_{p\text{min}}$ больше $T_{p\text{зад}}$ хотя бы на 1-3%.

На рис.2 показано точками рассеивание минимальных значений ресурса деталей и новое положение этих точек после увеличения ресурса. Для гарантии отсутствия отказов за заданный ресурс $T_{p\text{зад}}$ начало распределения ресурса смещено еще на 15%.

Таким образом, можно сформулировать основные принципы обеспечения абсолютной безотказности деталей машин.

1. Применение выборочных вероятностных распределений вместо распределений генеральной совокупности, как следствие, завышает прочность и ресурс и занижает нагруженность, вызывая преждевременные отказы.

2. Использование в вероятностных расчетах, как в любой деятельности человека, генеральной совокупности конечного объема, а не бесконечного.

3. Применение в вероятностных расчетах распределений (со сдвигом) Вейбула с тремя параметрами и Фишера-Типпета.

4. Использование экстремальных значений совокупности вместо аналогичных выборочных значений прочности, нагруженности и ресурса.

5. Увеличение оптимального ресурса на 15-30%, т.е. получение $T_{p\text{опт}} > T_{p\text{зад}}$ с запасом.

6. Увеличение значения $\gamma=99-99,999\%$ до величины $\gamma=100\%$ для заданного ресурса, обеспечивая ноль отказов.

В качестве иллюстрации метода обеспечения абсолютной безотказности деталей машин рассмотрен пример для ответственной детали одноковшового экскаватора – стрелы с усталостным ресурсом до списания $T_p=20$ тыс. ч.

Для расчета этого ресурса используется известная формула Велера-Когаева. В эту формулу подставляются выборочные значения предела выносливости и действующего напряжения. Далее находится оптимальное значение вероятности безотказной работы $P(T_p)=0,999$ и соответственно вероятность отказа $F(T_p)=1-0,999=0,001$, представленная на вероятностной бумаге на рис. 3.

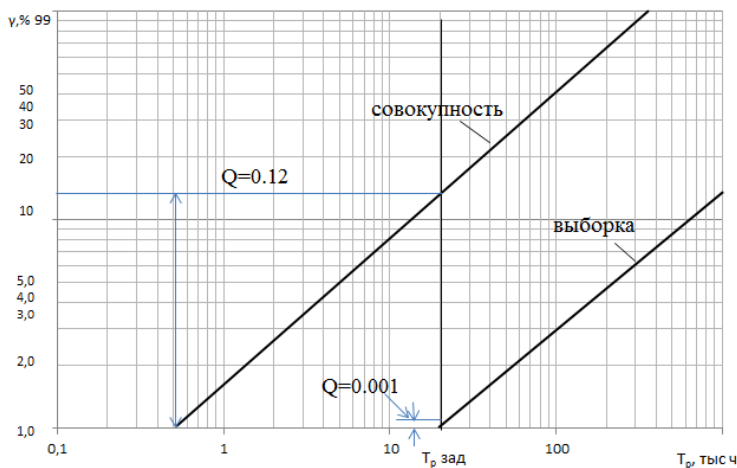


Рис. 3. Вероятностные распределения ресурса по выборке и совокупности

При оптимизации вероятности безотказной работы деталей следует использовать параметры трехпараметрического закона Вейбулла, определенных по совокупности, а не по выборке [6]. Поэтому выполняется переход согласно алгоритму (рис. 4) с использованием вместо параметра сдвига, первого значения вариационного ряда параметров формулы Велера-Когаева к совокупности конечного объема ресурса.

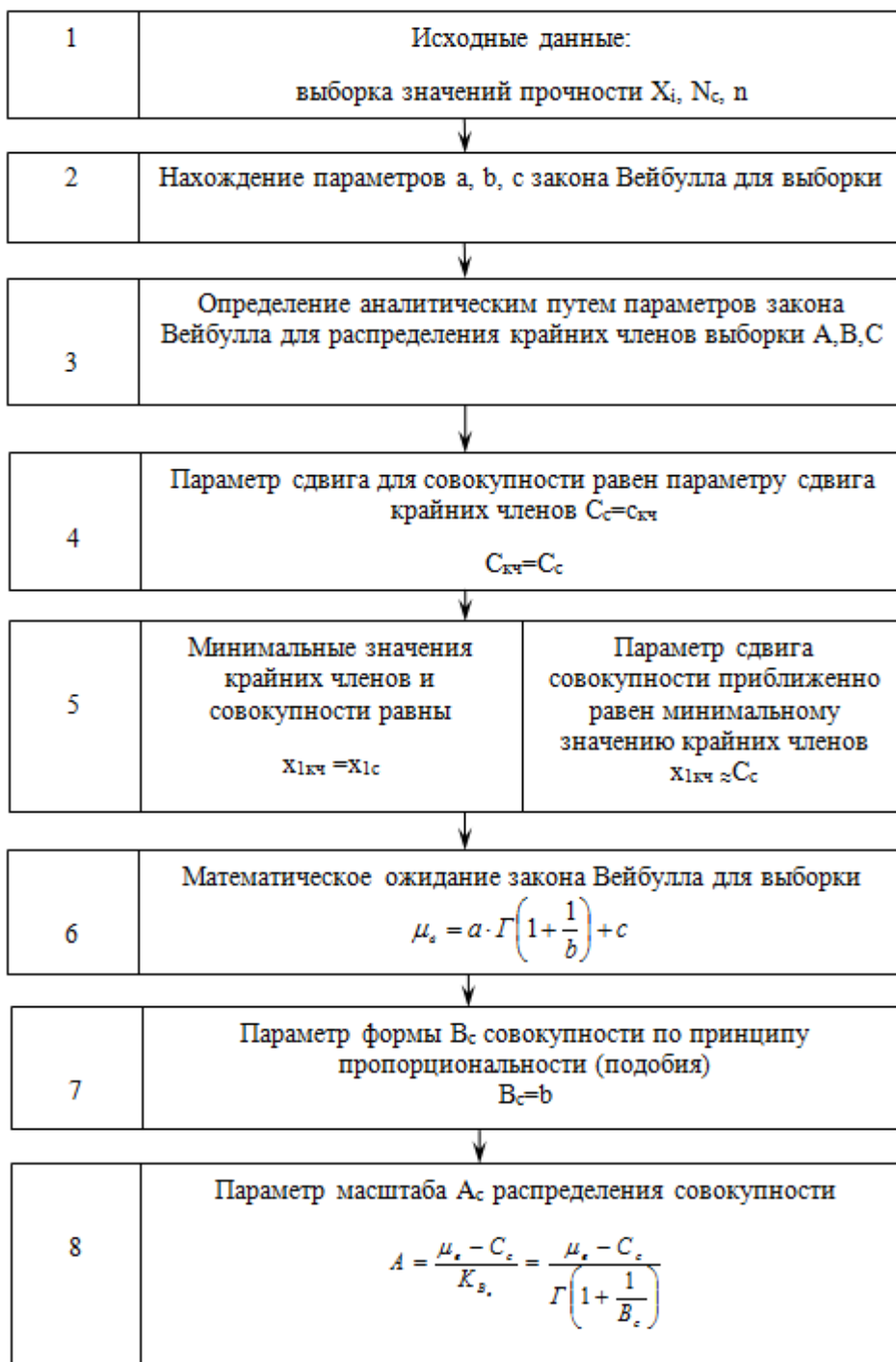


Рис. 4. Алгоритм перехода от выборочных значений к генеральной совокупности конечного объема

В качестве исходного вероятностного распределения Вейбула с тремя параметрами использована формула [5]

$$F(T_p) = 1 - e^{-\left(\frac{T_p - 20000}{3 \cdot 10^5}\right)^{1.4}}, \quad (1)$$

Обеспечивающая вероятность безотказной работы $P(T_p) = 0,999$ и соответственно вероятность отказа $F(T_p) = 1 - 0,999 = 0,001$.

Переход от выборочных значений к совокупности ресурса показывает его снижение в 38 раз (рис. 3) и возникновение преждевременных отказов стрелы.

Для обеспечения ВБР стрелы примерно равного 0,999 для совокупности стрел необходимо увеличить предел выносливости стали путем замены на более прочную сталь и (или) уменьшить действующее напряжение путем увеличения толщины стенки или размеров сечения.

Далее для обеспечения гарантии отсутствия отказов (ноль отказов) за ресурс $T_p=20$ тыс. ч. Требуется увеличить минимальный ресурс стрелы сначала на 3% (для незначительных, непредвиденных обстоятельств), а затем рассмотреть варианты увеличения этого минимального ресурса на 15% (по аналогии со статистическим расчетом металлоконструкций), а после увеличить на 30% или более. В этом случае на вероятностной бумаге (рис. 5) распределение ресурсов с их минимальными значениями расположатся за пределами $T_p=20$ тыс. ч. И их минимальные ресурсы будут соответственно равны 20085 ч. (3%), 22425 ч. (15%), 25350 ч. (30%).

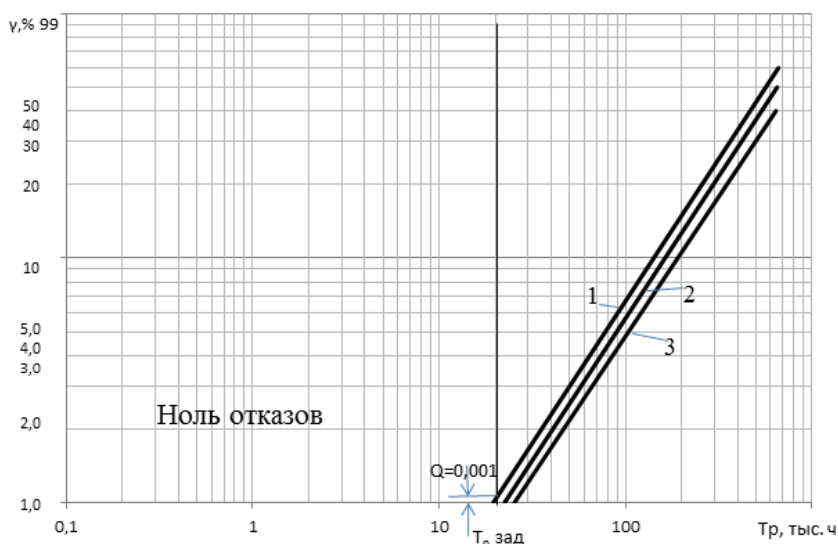


Рис. 5. Распределения ресурса детали до (1) и после (2, 3) смещения минимального ресурса на 15 и 30%

Так как на вероятностной бумаге минимальное значение ресурса соответствует $F(T_p) = 0,001$, возможно, что параметр сдвига окажется меньше при нулевом значении вероятности отказа (рис. 6). Определена величина расхождения между ними, которая составляет $\delta=0,5\%$.

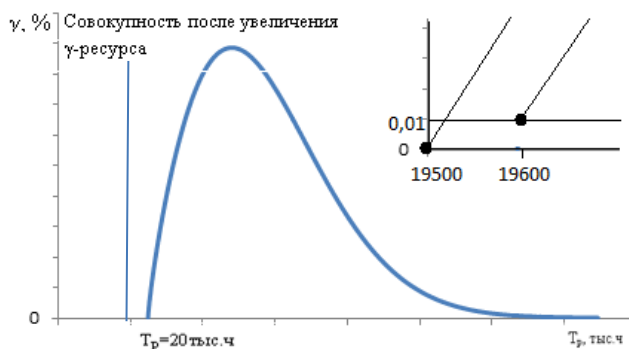


Рис. 6. Расхождение между сдвигом и γ -процентным значением ресурса

Из этого следует, что минимальное значение распределений ресурсов (рис. 5), которое начинается с 1% а не с нуля, как это требуется для параметра сдвига, дает несущественную ошибку.

Для оптимизации ресурса стрелы предусматривается увеличение ее прочности и снижения нагруженности, что потребовало переход от выборочных параметров к параметрам совокупности стрелы, в этом случае (в статье) увеличение цены стрелы не рассматривалось.

Для обеспечения абсолютной безотказности стрелы необходимо сдвинуть распределение совокупности и соответственно минимальный ресурс за пределы заданного ресурса на экскаватор 20 тыс. ч. и соответственно минимальный ресурс на 15-30%. Учитывая степенную связь ($m=4-15$) между параметрами в формуле Велера-Когаева и ресурсом небольшое изменение прочности и нагруженности в этой степени дает существенный прирост ресурса.

Изменение несущей способности и действующего напряжения вызывает примерно такое же увеличение цены стрелы. При значении m_2 в формуле Велера-Когаева равном 8, увеличение цены детали составит около $\sqrt[8]{1,15} = 1,0176$, т.е. 1,76%, а для $\sqrt[8]{1,3} = 1,033$, т.е. 3,73% (рис. 7).

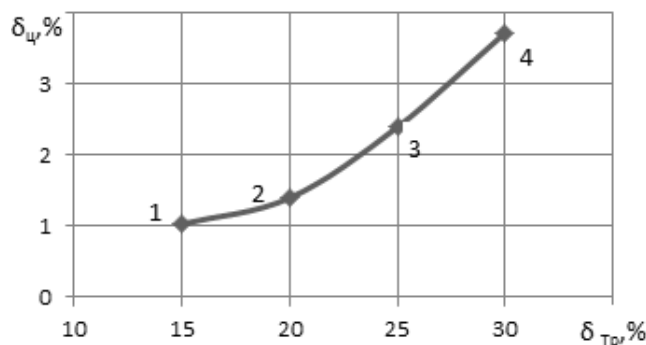


Рис. 7. Увеличение цены детали в % в зависимости от увеличения минимального ресурса T_p на $\delta_{Tp} = 15 - 30\%$

Таким образом, применение изложенного метода обеспечивает ноль отказов за заданный ресурс детали 20 тыс. ч. и незначительное увеличение цены детали примерно на 2-4%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касьянов В.Е. Равноресурсность и эффективность экскаваторов// Надежность машин. – Вып. 4. – Ростов-на-Дону: Рост.инж.-строит.ин-т, 1974. – С.13-27.
2. Касьянов В.Е. Принципы создания практически безотказных машин//Стандарты и качество. – 1988. - № 7. – С. 39-42.
3. Касьянов В.Е. Испытания экскаваторов в эксплуатации и расчет показателей их надежности на ЦВМ// Надежность и контроль качества. – 1976. - № 6. – с. 15 – 19.
4. Касьянов В.Е., Шулькин Л.П., Роговенко Т.Н. Основы теории и практики создания надежных машин// Вестник машиностроения. – 2003. № 10. С. 3 – 6.
5. Когаев В.П., Петрова И.М. Расчет функции распределения ресурса деталей машин методом статистических испытаний // Вестник машиностроения. – 1981. – № 1 – С.9 – 11.
6. Genschel U., Meeker W. /AComparison of Maximum Likelihood and Median Rank Regression for Weibull Estimation. – Department of Statistika Iowa State University Ames. IA 50011 -2010 year.

Рецензент: Евсеев Дмитрий Зиновьевич, доцент кафедры технической эксплуатации (сервиса) автомобилей и оборудования Ростовского государственного строительного университета, кандидат техн. Наук.