

А.Ю. Русин, М. Абдулхамед

(Тверской государственной технической университет; e-mail: alrus@tvcom.ru)

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ ИСПЫТАНИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЁЖНОСТЬ

Разработана методика оценки показателей надёжности оборудования при его испытаниях, что позволит более достоверно оценить безотказность работы оборудования и повысить точность прогнозирования аварийных ситуаций.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, обработка информации, испытание оборудования, надёжность, аварийные ситуации, безопасность.

A.Y. Rusin, M. Abdulhameed

INFORMATION PROCESSING IN INDUSTRIAL EQUIPMENT RELIABILITY TEST SYSTEM

Evaluation technique of equipment serviceability criteria is developed, that makes it possible to evaluate faultless performance more authentically and improve the accuracy of forecasting emergencies.

Key words: computer simulation, information processing, equipment test, reliability, disturbance situations, safety.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 4 июня 2014 г.

В настоящее время существует большое количество опасных производств. Это химические производства, атомные электростанции, предприятия нефтепереработки и многие другие. Пожары, взрывы и другие опасные события на этих производствах могут иметь тяжелые последствия для персонала, гражданского населения, окружающей среды, экономики предприятия или даже страны. При проектировании таких производств и их эксплуатации проводится прогнозирование возникновения опасных событий. Расчёт вероятности их возникновения проводится по математическим моделям, многие из которых используют показатели надёжности установленного технологического оборудования – закон распределения отказов, вероятность безотказной работы.

Для оценки показателей надёжности оборудования при его проектировании проводят специальные испытания на надёжность. Достоверность оценок показателей надёжности зависит от точности математических методов обработки информации, полученной в результате их проведения. Чем выше достоверность оценок, тем точнее будет прогноз возникновения отказов оборудования и возможных аварийных ситуаций на предприятиях.

Существует несколько планов испытаний оборудования на надёжность. Рассмотрим план $[N, U, T]$, который приведен в стандарте [1]. При проведении испытаний по плану $[N, U, T]$ образуются однократно цензурированные выборки наработок на отказ. При параметрическом оценивании показателей надёж-

ности, например, средней наработки до отказа, по однократно цензурированным справа выборкам основным математическим методом является метод *максимального правдоподобия (МП)*.

Авторами проведены экспериментальные исследования точности оценок максимального правдоподобия параметров закона распределения Вейбулла по малым, однократно цензурированным справа выборкам, формирующимся по плану $[N, U, T]$.

На ЭВМ моделировались однократно цензурированные справа выборки случайных величин объёмом $N = 5, 10, 15, 20$. Генерирование выборок выполнялось при следующих ограничениях:

$$6 \leq N < 10, \quad q \geq 0,5; \quad 10 \leq N < 20, \quad q \geq 0,3; \quad 20 \leq N \leq 50, \quad q \geq 0,2,$$

где q – степень цензурирования выборки.

Ограничения приняты в соответствии с рекомендациями [7].

Количество сформированных выборок для каждого значения N равно 3000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки параметра формы и масштаба закона распределения Вейбулла и их относительные отклонения δ от истинных значений, которые использовались при генерации выборки:

$$\delta = \frac{p - p_{\text{ОМП}}}{p},$$

где p – истинное значение параметра распределения Вейбулла, которое использовалось при моделировании выборки;

$p_{\text{ОМП}}$ – оценка максимального правдоподобия параметра распределения Вейбулла.

По результатам моделирования построены гистограммы относительных отклонений оценок максимального правдоподобия параметров масштаба и формы закона распределения Вейбулла. По оси ординат отложены процент оценок от общего количества, попавших в данный интервал. Полученные результаты приведены на рис. 1, 2.

Эти экспериментальные данные показывают, что большинство оценок максимального правдоподобия, полученные по малым, однократно цензурированным справа выборкам, имеют значительные отклонения от истинных значений. Например, 26 % оценок параметра масштаба распределения Вейбулла при $N = 5$ (рис. 1) имеют относительные отклонения по модулю от 0,2 до 0,3; 22 % – относительные отклонения от 0,3 до 0,5 и 5 % – более 0,8. С увеличением объёма выборки точность оценок возрастает. При $N = 20$ 74 % относительных отклонений оценок параметра масштаба практически не превышают 0,2. Несмотря на это, 14 % оценок имеют относительные отклонения от 0,2 до 0,3; 7 % – от 0,3 до 0,5; 7 % – от 0,5 до 1.

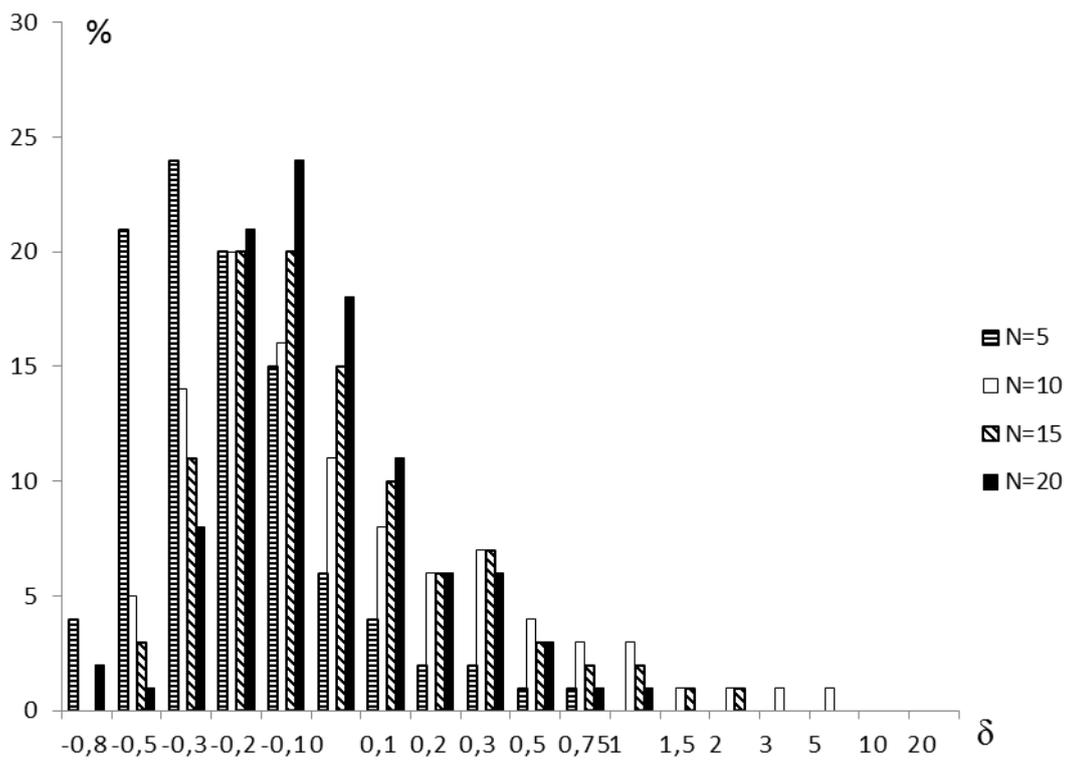


Рис. 1. Относительные отклонения оценки максимального правдоподобия параметра масштаба закона распределения Вейбулла

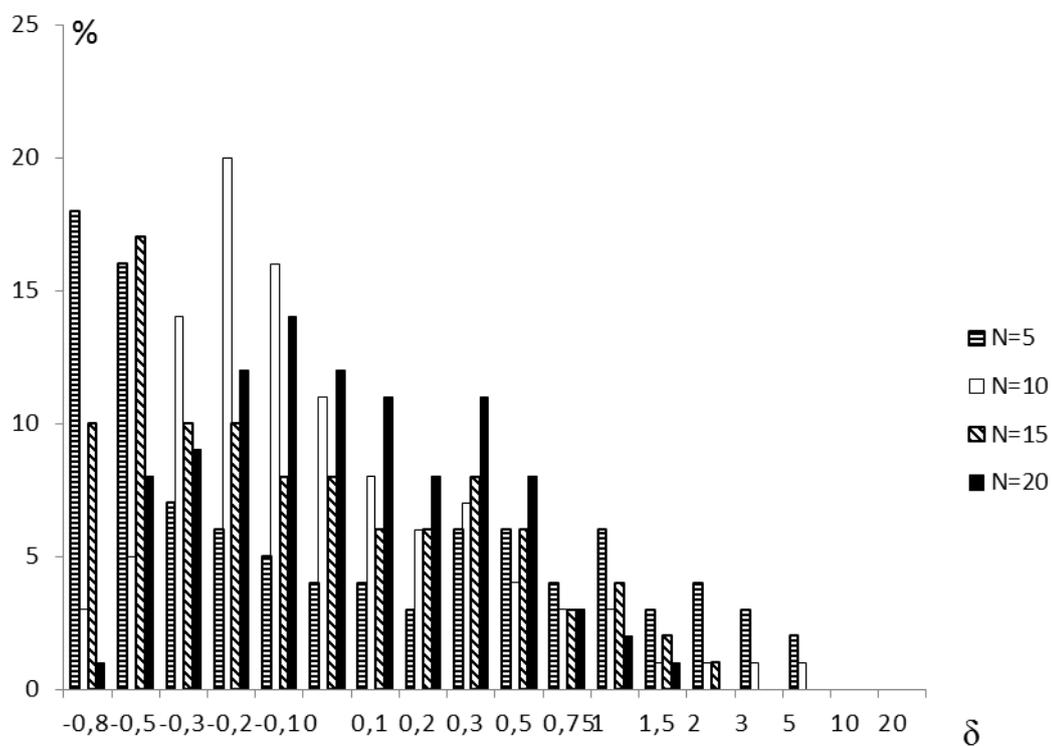


Рис. 2. Относительные отклонения оценки максимального правдоподобия параметра формы закона распределения Вейбулла

Ещё более низкую точность имеют оценки параметра формы закона распределения Вейбулла (рис. 2). Для $N = 5$ 30 % оценок имеет отклонения по модулю от 0,5 до 1; 9 % – от 1 до 2 и 9 % – более 2. При $N = 20$ 65 % относительных отклонений оценок параметра формы не превышают 0,3. При этом 3 % оценок имеют относительные отклонения от 0,75 до 1; 2 % – от 1 до 1,5; 1 % – от 1,5 до 2.

В целом можно сделать вывод, что точность метода максимального правдоподобия при значениях $N \leq 20$ низка. Относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 100 %.

В работе [7] разработана методика повышения точности оценок максимального правдоподобия. В данных исследованиях эта методика использована для повышения точности оценок параметров максимального правдоподобия закона распределения Вейбулла при проведении испытаний оборудования по плану $[N, U, T]$.

Решение поставленной задачи осуществлялось в четыре этапа:

1. Моделирование на ЭВМ однократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по закону Вейбулла, характерных для плана испытаний $[N, U, T]$. Для моделирования выборок написана подпрограмма на языке Fox Pro к программе моделирования отказов оборудования и обработке полученных результатов.

2. Расчёт параметров выборки, характеризующих её структуру. Для описания структуры сформированной выборки случайных величин использовались пять стандартных параметров выборки:

- X_1 – степень цензурирования;
- X_2 – коэффициент вариации;
- X_3 – коэффициент вариации полных случайных величин;
- X_4 – эмпирический коэффициент асимметрии;
- X_5 – коэффициент эксцесса.

Еще пять параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки:

- X_6 – отношение математического ожидания полных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки;
- X_7 – отношение математического ожидания цензурированных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки;
- X_8 – относительное отклонение математического ожидания от середины вариационного размаха;
- X_9 – отношение медианы к математическому ожиданию;
- X_{10} – отношение моды к математическому ожиданию.

Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Это сделано для того, чтобы можно было применять полученные уравнения к оборудованию со средними наработками на отказ разной величины.

3. Расчёт оценок МП параметров закона распределения Вейбулла.

4. Расчёт зависимого параметра – отклонение оценки максимального правдоподобия от истинного значения.

5. Построение регрессионных зависимостей. В результате исследований построены регрессионные математические модели, устанавливающие связь между отклонением оценки МП от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Для каждого объёма выборки N построено свое уравнение регрессии.

Математические модели построены в классе линейных уравнений регрессии вида

$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_{10}x_{10}.$$

Коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_{10} и параметры значимости уравнений регрессии приведены в табл. 1, где Q – общая сумма квадратов результативного признака; $Q_{\text{пр}}$ – общая сумма квадратов, характеризующая влияние признаков; $Q_{\text{ост}}$ – остаточная сумма квадратов – влияние неучтённых факторов.

Таблица 1

Коэффициенты и параметры значимости уравнений регрессии

| b | N | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | m | | | | f | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| b_0 | -1,92 | -4,40 | -5,60 | -2,55 | 11,44 | 14,83 | 16,62 | 4,12 |
| b_1 | 0,20 | 0,25 | 0,36 | -0,50 | -0,35 | -1,64 | -1,68 | 0,57 |
| b_2 | -1,89 | -1,55 | -2,03 | -1,66 | 4,54 | 3,61 | 4,39 | 2,81 |
| b_3 | 3,29 | 1,55 | 1,31 | 2,56 | -2,61 | -0,21 | 0,02 | -3,71 |
| b_4 | 0,10 | 1,89 | 2,57 | 0,94 | -0,89 | -3,78 | -5,01 | 0,10 |
| b_5 | 0,49 | -1,94 | -2,38 | -0,23 | 8,27 | 10,33 | 10,84 | 0,78 |
| b_6 | 0,08 | -0,25 | -0,42 | -0,02 | -0,37 | 0,51 | 0,80 | -0,01 |
| b_7 | -0,14 | -0,01 | -0,11 | -0,01 | 0,16 | 0,13 | 0,16 | -0,01 |
| b_8 | -0,06 | 0,01 | 0,10 | 0,21 | -0,08 | -0,18 | -0,14 | -0,09 |
| b_9 | 2,73 | 2,68 | 2,87 | 2,26 | -9,97 | -8,64 | -9,29 | -3,49 |
| b_{10} | -0,02 | -0,09 | -0,02 | 0,04 | 0,42 | 0,47 | 0,27 | 0,11 |
| Q | 369,36 | 268,4 | 193,0 | 116,80 | 3132 | 1961 | 1527 | 300,80 |
| $Q_{\text{пр}}$ | 243,53 | 210,01 | 151,05 | 83,75 | 2484 | 1462 | 1211 | 241,58 |
| $Q_{\text{ост}}$ | 125,83 | 58,39 | 41,95 | 33,05 | 648 | 499 | 314 | 59,22 |

Полученные уравнения регрессии позволяют повысить точность оценки максимального правдоподобия введением поправки $\bar{y}(x)$ к оценке МП по формуле

$$p_{\text{кон}} = p_{\text{ОМП}} \cdot \bar{y}(x),$$

где $p_{\text{кон}}$ – конечная оценка параметра распределения.

В исследованиях была проведена оценка эффективности построенных уравнений регрессии. Для каждой вновь сгенерированной выборки из общего количеством выборок $V = 3000$ по уравнениям регрессии были рассчитаны поправки к оценке МП и конечная оценка параметра распределения.

Результаты исследований эффективности применения построенных уравнений регрессии для закона распределения Вейбулла показаны на рис. 3-6.

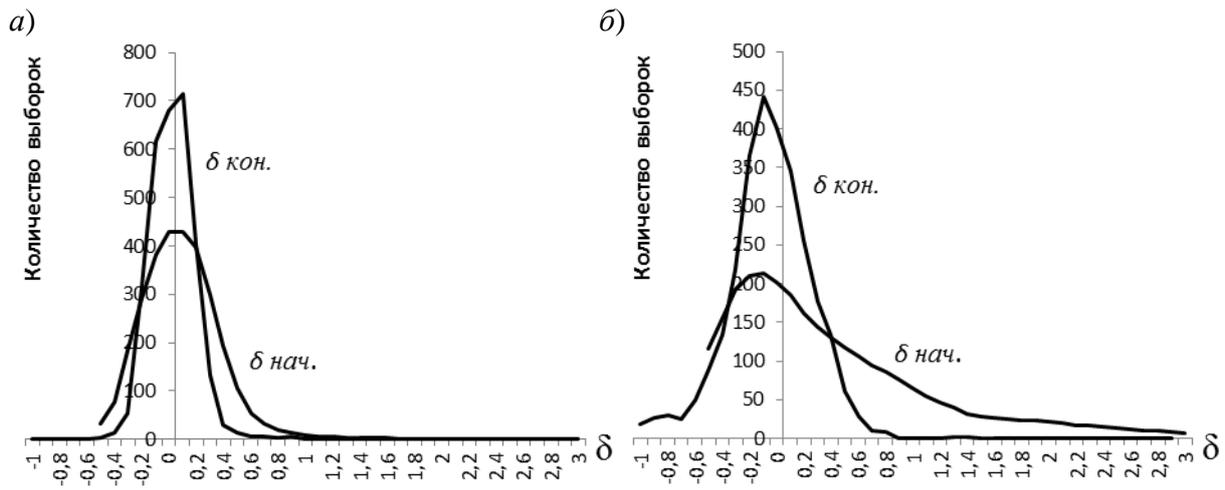


Рис. 3. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра масштаба (а) и формы (б) для $N = 5$

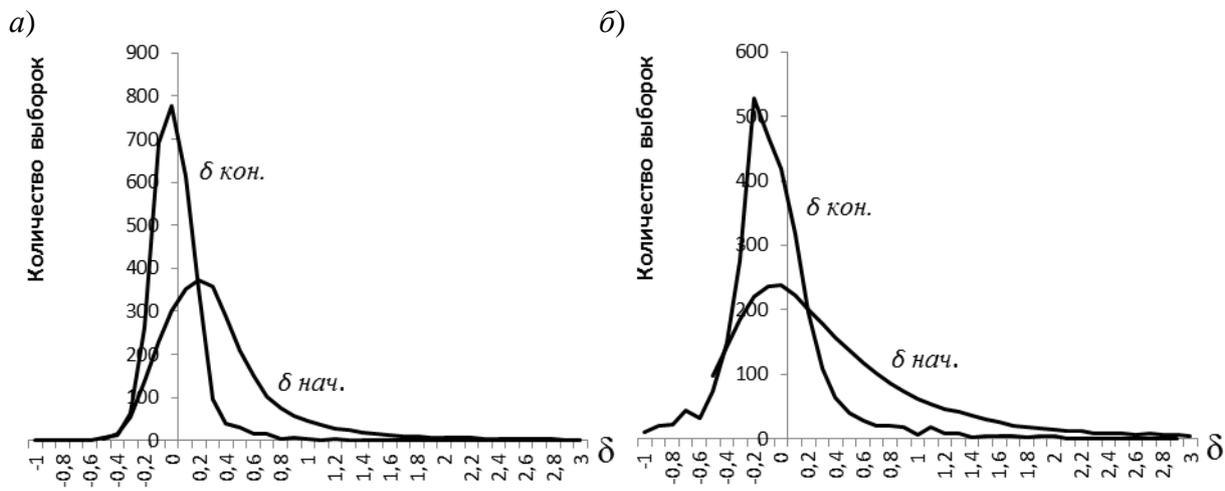


Рис. 4. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра масштаба (а) и формы (б) для $N = 10$

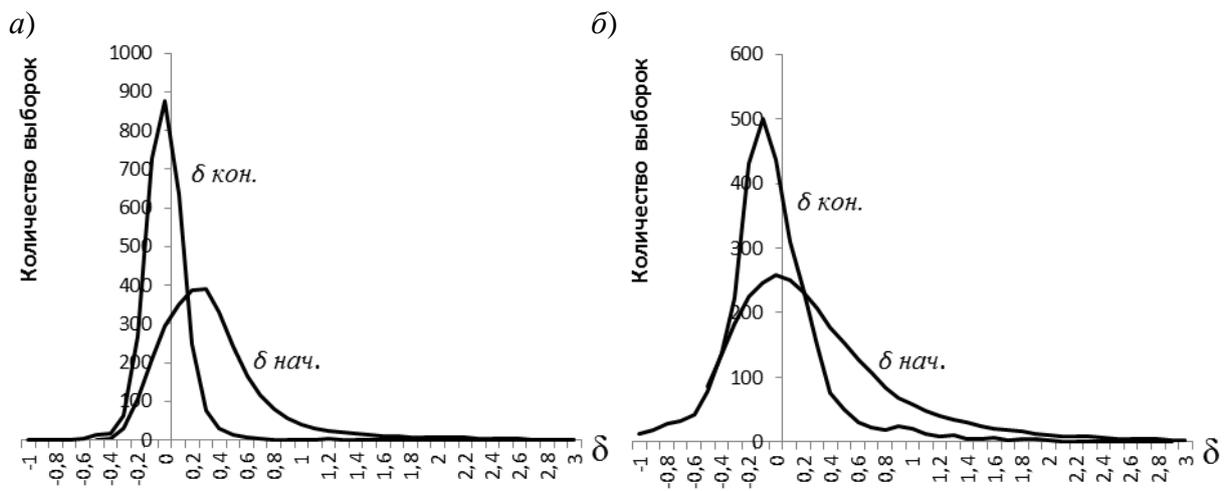


Рис. 5. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра масштаба (а) и формы (б) для $N = 15$

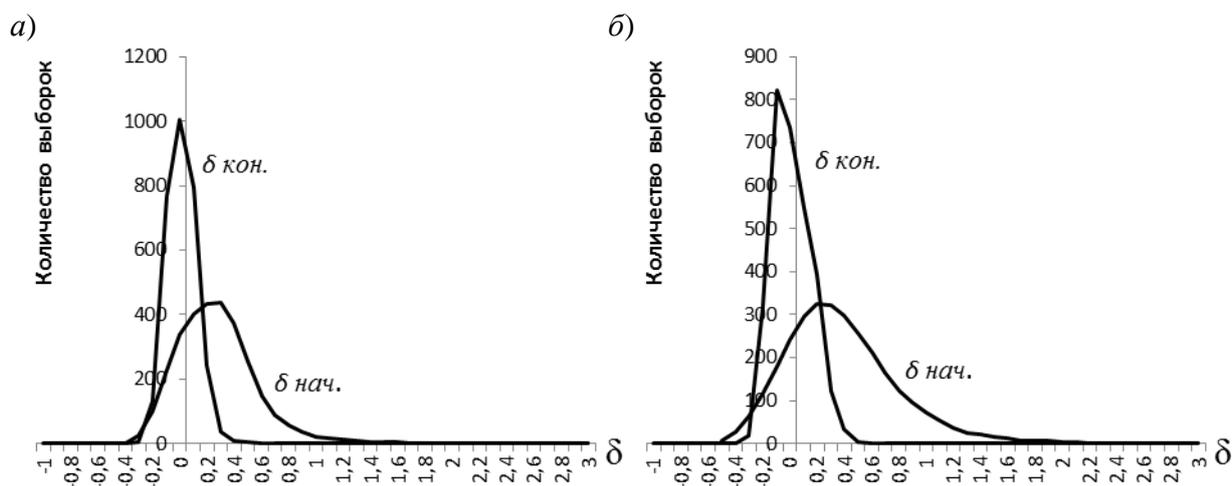


Рис. 6. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра масштаба (а) и формы (б) для $N = 20$

Графики, приведённые на рис. 2-6 показывают, что точность оценок МП параметров закона распределения Вейбулла после применения разработанных моделей и введения поправки значительно возрастает. После введения поправки, относительные отклонения оценок МП от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объёма выборки, не превышают 0,3-0,5, в то время как начальные отклонения могут быть больше 2.

Для расчёта показателей надёжности электрооборудования с применением предложенной методики разработано программное обеспечение для ЭВМ.

Литература

1. *ГОСТ 27.410-87.* Надёжность в технике. Методы контроля показателей надёжности и планы контрольных испытаний на надёжность.
2. *ГОСТ 27.402-95.* Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение.
3. *Баталова З.Г., Благовещенский Ю.Н.* О точности оценок ресурсов элементов изделий методом максимума правдоподобия при случайном усечении длительностей наблюдений // Надёжность и контроль качества. 1979. № 9. С. 12-20.
4. *Бурдасов Е.И., Зарифьянц И.Д., Дворникова Н.Н.* Об оценке параметров нормального распределения по случайно цензурированной выборке // Надёжность и контроль качества. 1978. № 6. С. 10-16.
5. *Бурдасов Е.И., Зарифьянц И.Д., Дворникова Н.Н., Аронов И.З.* Исследование оценок параметров распределений при анализе результатов незавершенных испытаний // Надёжность и контроль качества. 1980. № 12. С. 47-55.
6. *Петрович М.Л., Давидович М.И.* Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1989. 189 с.
7. *Русин А.Ю.* Имитационное моделирование процессов возникновения отказов электрооборудования с целью повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонта: дисс. ... канд. техн. наук. Тверь: ТГТУ, 1999. 214 с.