

**В.М. Труханов**

**Reliability in  
TECHNIQUE**

# **НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ**

2-е издание переработанное и дополненное

**В. М. Труханов**

# НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ

Reliability in  
TECHNIQUE

2-е издание переработанное и дополненное



Москва, 2017

УДК 621.192

ББК 30.14

Т77

Рецензент

чл.-корр. РАН М. Н. Бабушкин

Т77 Труханов В. М.

Надежность в технике. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО Издательский дом «Спектр», 2017. – 656 с.: ил.

ISBN 978-5-4442-0121-3

Рассмотрены теоретические и практические вопросы надежности сложных систем на различных этапах их жизненного цикла. Приведены методы обеспечения и повышения надежности на стадиях проектирования, серийного производства и эксплуатации, математические модели построения кривых роста надежности пассивным методом и с учетом управляющих воздействий, а также пути повышения надежности конструктивными и технологическими способами.

Рассмотрены вопросы технической диагностики и методы продления сроков эксплуатации дорогостоящих объектов.

Для специалистов, работающих в области исследования, создания и эксплуатации изделий машиностроения, преподавателей и студентов вузов.

УДК 621.192

ББК 30.14

*Научное издание*

**ТРУХАНОВ Владимир Михайлович**  
**НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ**

Редакторы: *Н.Е. Кузнецова, А.И. Евсейчев*

Корректоры *А.Г. Изосимова, А.И. Евсейчев*

Инженеры по компьютерному макетированию *А.И. Евсейчев, Н.И. Смольянина*

Сдано в набор 20.09.2016 г.

Подписано в печать 20.11.2016 г. Формат 60 × 88 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 41,0. Уч.-изд. л. 48,2.

Тираж 300 экз. Заказ 112298.

ООО «Издательский дом «Спектр»

119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1.

\* [Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: [info@idspektr.ru](mailto:info@idspektr.ru)

Отпечатано в типографии Публичное акционерное общество  
«Т8 Издательские Технологии»

109316 Москва, Волгоградский проспект, дом 42, корпус 5

ISBN 978-5-4442-0121-3



9 785444 201213

ISBN 978-5-4442-0121-3

© ООО Издательский дом «Спектр», 2017

© Труханов В. М., 2017

© ВолГТУ, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	13
<b>Глава 1. Методологические и организационно-технические основы исследований надежности современной техники . . . . .</b>	<b>17</b>
1.1. Основные понятия, определения и термины . . . . .	17
1.2. Методологические исследования надежности . . . . .	25
1.3. Математические методы исследования . . . . .	26
1.4. Исследование надежности на этапе разработки конструкторской документации . . . . .	27
1.5. Исследование надежности на этапе испытаний опытных образцов . . . . .	29
1.6. Исследование надежности техники на этапе серийного производства . . . . .	31
1.7. Исследование надежности техники на этапе эксплуатации . . . . .	33
1.8. Организационные методы обеспечения надежности техники . . . . .	35
1.9. Структурные подразделения надежности и их задачи . . . . .	41
<b>Глава 2. Математический аппарат. Элементы теории вероятностей и математической статистики . . . . .</b>	<b>47</b>
2.1. Понятие события. Действия над событиями . . . . .	47
2.2. Частота события. Свойства частот. Статистическая вероятность . . . . .	51
2.3. Аксиомы теории вероятностей . . . . .	53
2.4. Зависимые и независимые события. Теорема умножения для независимых событий . . . . .	56
2.5. Формула полной вероятности . . . . .	57
2.6. Формула Байеса . . . . .	59
2.7. Частная теорема о повторении опытов. Формула Бернулли . . . . .	60
2.8. Случайные величины и законы их распределения . . . . .	62
2.9. Дискретные законы распределения, часто используемые в теории надежности . . . . .	66
2.9.1. Закон Пуассона . . . . .	66
2.9.2. Биномиальное распределение . . . . .	66
2.9.3. Гипергеометрическое распределение . . . . .	67
2.10. Непрерывные законы распределения . . . . .	69
2.10.1. Экспоненциальное распределение . . . . .	69
2.10.2. Распределение Вейбулла . . . . .	70
2.10.3. Нормальное распределение . . . . .	71
2.10.4. Логарифмически нормальное распределение . . . . .	75

2.10.5. Гамма-распределение . . . . .	77
2.10.6. Распределение хи-квадрат ( $\chi^2$ ) . . . . .	79
2.10.7. Распределение по закону равной вероятности . . . . .	80
2.10.8. Распределение Стьюдента (Госсета) . . . . .	82
2.10.9. Бета-распределение . . . . .	83
2.10.10. Распределение смеси и совокупности случайных величин . . . . .	84
2.11. Числовые характеристики случайных величин . . . . .	85
2.12. Некоторые предельные теоремы теории вероятностей . . . . .	92
2.13. Элементы математической статистики и ее основные задачи . . . . .	95
2.14. Точечные оценки параметров распределения . . . . .	96
2.15. Метод максимального правдоподобия . . . . .	97
2.16. Метод моментов . . . . .	98
2.17. Исследование точности оцениваемых параметров методом доверительных интервалов . . . . .	100
2.18. Методы проверки статистических гипотез . . . . .	102
<b>Глава 3. Исследование надежности на стадии проектирования технических систем . . . . .</b>	<b>107</b>
3.1. Задачи исследования надежности . . . . .	107
3.2. Задание требований, выбор номенклатуры показателей надежности, распределение норм надежности . . . . .	108
3.3. Метод рационального распределения норм надежности . . . . .	110
3.4. Метод равномерного распределения . . . . .	113
3.5. Метод пропорционального распределения . . . . .	113
3.6. Метод распределения требований по надежности с учетом относительной уязвимости элементов . . . . .	114
3.7. Метод распределения требований по надежности с учетом важности подсистемы . . . . .	116
3.8. Виды отказов . . . . .	118
3.9. Показатели надежности невосстанавливаемого элемента . . . . .	120
3.10. Показатели надежности восстанавливаемого элемента . . . . .	124
3.11. Расчет проектной надежности систем с последовательным соединением элементов . . . . .	131
3.12. Расчет проектной надежности систем без учета восстановления резервных элементов . . . . .	136
3.13. Расчет проектной надежности систем с учетом восстановления резервных элементов . . . . .	143
3.14. Методы расчета надежности дорогостоящих небракуемых объектов типа подвижных установок на этапе проектирования . . . . .	145

---

3.15. Модель расчета надежности, учитывающая случайные отказы . . . . .	148
3.16. Модель расчета надежности, учитывающая неслучайные отказы . . . . .	152
3.17. Методика расчета и достижения требуемого уровня надежности . . . . .	154
3.18. Расчет проектной надежности механических узлов и металлоконструкций . . . . .	157
3.19. Расчетные зависимости вероятности безотказной работы механических узлов по заданным критериям . . . . .	159
3.20. Применение методов подобия при проектировании . . . . .	173
3.21. Исследование надежности изделий на этапе разработки конструкторской документации при выборе запасных частей и инструментов . . . . .	176
3.22. Расчет количественного состава запасных частей . . . . .	178
3.23. Принципы конструирования, обеспечивающие создание надежных систем . . . . .	182
3.24. Конструирование систем электроавтоматики . . . . .	184
3.25. Конструирование силовых узлов и компоновка изделия . . . . .	186
3.26. Конструирование гидравлических систем и механических узлов . . . . .	188
3.27. Методика расчета количественных показателей надежности изделий на этапе проектирования . . . . .	191
<b>Глава 4. Исследование надежности изделий на этапе экспериментальной отработки . . . . .</b>	<b>199</b>
4.1. Цель и виды испытаний . . . . .	199
4.2. Организация и последовательность создания сложных систем . . . . .	201
4.3. Программа экспериментальной отработки . . . . .	204
4.4. Контроль уровня оценки выполнения программы экспериментальной отработки . . . . .	206
4.5. Исследовательские испытания опытных образцов . . . . .	208
4.6. Планирование исследовательских и контрольных испытаний методом фиксированного объема . . . . .	213
4.7. Планирование испытаний при экспоненциальном законе распределения наработки для фиксированного объема . . . . .	215
4.8. Планирование испытаний при нормальном и логарифмически нормальном законах распределения наработки на отказ для фиксированного объема . . . . .	221

---

4.9. Планирование испытаний методом фиксированного объема, когда показателем оценки является вероятность безотказной работы или вероятность отказа, распределенная по биномиальному закону или закону Пуассона . . . . .	224
4.10. Планирование исследовательских и контрольных испытаний методом последовательного анализа . . . . .	228
4.11. Планирование испытаний методом последовательного анализа при двух заданных уровнях показателя надежности для биномиального закона распределения . . . . .	230
4.12. Планирование испытаний методом последовательного анализа для экспоненциального закона распределения . . . . .	233
4.13. Планирование испытаний методом последовательного анализа для закона распределения Пуассона . . . . .	235
4.14. Планирование испытаний методом последовательного анализа при двух заданных уровнях показателя надежности для нормального закона распределения наработки на отказ . . . . .	238
4.15. Планирование испытаний дорогостоящих небракуемых изделий методом последовательного анализа для различных законов распределения при двух заданных уровнях показателя надежности . . . . .	241
4.16. Планирование испытаний дорогостоящих небракуемых изделий методом последовательного анализа для биномиального закона распределения при одном заданном уровне показателя надежности . . . . .	243
4.17. Сравнительный анализ объемов испытаний, полученных методами Неймана–Пирсона и последовательного анализа для различных законов распределения . . . . .	253
4.18. Исследования надежности в утяжеленных режимах испытаний . . . . .	256
4.19. Планирование объемов испытаний с учетом проводимых доработок и ресурсно-временного запаса . . . . .	262
<b>Глава 5. Исследование надежности изделий при постановке их на производство и в процессе серийного изготовления . . . . .</b>	<b>269</b>
5.1. Контрольные испытания изделий на этапе подготовки к серийному производству . . . . .	269
5.2. Влияние производственных факторов на качество выпускаемой продукции . . . . .	270
5.3. Номенклатура показателей качества продукции. Влияние показателей технологичности на надежность изделия . . . . .	271

---

5.4. Методы оценки качества промышленной продукции . . . . .	277
5.5. Контроль качества и надежности изделия на этапах проектирования, производства и эксплуатации . . . . .	279
5.6. Контроль стабильности технологических процессов и оценка их надежности . . . . .	284
5.7. Исследование и оценивание стабильности технологических процессов . . . . .	291
5.8. Систематизация и анализ дефектов и неисправностей изделий в процессе серийного производства. Оценка качества продукции . . . . .	296
5.9. Контроль качества и планирование испытаний изделий серийного и массового производства . . . . .	306
<b>Глава 6. Исследование надежности изделий на этапе эксплуатации . . . . .</b>	<b>308</b>
6.1. Исследование проблемы ремонтпригодности изделий машиностроения . . . . .	308
6.2. Показатели ремонтпригодности изделий . . . . .	312
6.3. Дополнительные показатели ремонтпригодности . . . . .	317
6.4. Обеспечение требований ремонтпригодности изделий при проектировании и изготовлении . . . . .	322
6.5. Обеспечение требований ремонтпригодности изделий в процессе эксплуатации. Система технического обслуживания и ремонта . . . . .	326
6.6. Влияние организационных и технологических факторов технического обслуживания и ремонта на значения показателей ремонтпригодности . . . . .	328
6.7. Материальное обеспечение работ при техническом обслуживании и ремонте по обеспечению работоспособности и ремонтпригодности изделий . . . . .	332
6.8. Цель и организация сбора информации о надежности и ремонтпригодности изделий с мест эксплуатации . . . . .	339
6.9. Анализ статистических данных и оценивание показателей ремонтпригодности изделий по результатам эксплуатации . . . . .	350
<b>Глава 7. Оценка надежности . . . . .</b>	<b>359</b>
7.1. Требования к методам контроля . . . . .	359
7.2. Оценка показателей надежности на основе параметрических методов . . . . .	360
7.3. Свойства оценок . . . . .	361



7.4. Теоретическое определение оценок параметров наиболее применимых в теории надежности законов распределения . . . . .	362
7.5. Нахождение приближенных доверительных границ оценок параметров распределений . . . . .	373
7.6. Статистическое нахождение оценок параметров наиболее применимых в теории надежности законов распределения для различных планов испытаний . . . . .	374
7.7. Точечная оценка надежности и доверительные пределы функции надежности . . . . .	378
7.8. Приближенная оценка надежности и приближенные доверительные пределы функции надежности . . . . .	379
7.9. Приближенные оценки надежности и их доверительные интервалы для некоторых законов распределения . . . . .	381
7.10. Точные доверительные пределы для функции надежности в случае экспоненциального распределения, распределения Вейбулла и гамма-распределения . . . . .	386
7.11. Оценивание показателей безотказности на основе параметрических методов . . . . .	390
7.12. Оценивание показателей безотказности на основе непараметрических методов . . . . .	398
7.13. Оценивание показателей безотказности при испытаниях с измерением определяющих параметров . . . . .	403
7.14. Оценивание надежности изделия по результатам испытаний элементов . . . . .	410

<b>Глава 8. Установление законов распределения значений показателей надежности по статистическим данным. Проверка соответствия законов и их параметров по критериям согласия . . . . .</b>	<b>414</b>
8.1. Графическое представление вероятностей . . . . .	414
8.2. Методы построения статистической функции надежности, гистограммы и вероятностной бумаги . . . . .	416
8.3. Проверка допущений о законах распределения с помощью критериев согласия . . . . .	427
8.4. Критерий $W$ проверки допущений о виде распределения . . . . .	428
8.5. Критерий согласия хи-квадрат ( $\chi^2$ ) . . . . .	433
8.6. Критерий Колмогорова . . . . .	439
8.7. Проверка однородности совокупности двух групп статистических данных по критерию сравнения частот отказов . . . . .	444
8.8. Приближенный критерий значимости, основанный на нормальном распределении . . . . .	447

---

8.9. Проверка гипотезы о равенстве средних значений из двух нормально распределенных совокупностей оцениваемых величин .....	451
8.10. Сравнение вероятностей отказов по критерию согласия $\chi^2$ (непараметрический случай) .....	454
8.11. Критерий знаков .....	457
8.12. Непараметрический критерий Уилкоксона .....	461
<b>Глава 9. Математические модели изменения уровня надежности технических систем .....</b>	<b>467</b>
9.1. Процесс изменения надежности изделия на этапах его жизненного цикла .....	467
9.2. Виды моделей роста надежности. Непараметрическая модель, основанная на биномиальном распределении .....	471
9.3. Тринომальная модель .....	473
9.4. Параметрические модели роста надежности .....	476
9.5. Многопараметрическая статистическая модель изменения уровня надежности .....	480
9.6. Гиперболическая модель роста функции надежности и другие виды зависимостей .....	483
9.7. Вероятностные модели, основанные на логических предположениях .....	487
9.8. Математическая модель изменения уровня надежности изделий с учетом управляющих воздействий .....	489
9.9. Методика оценивания управляющих воздействий .....	502
9.10. Математическая модель изменения уровня надежности изделий с учетом управляющих воздействий, выраженных в виде вероятностей .....	520
<b>Глава 10. Пути и методы повышения надежности сложных систем при проектировании, серийном производстве и эксплуатации .....</b>	<b>532</b>
10.1. Методы обработки конструкций изделий на технологичность .....	532
10.2. Количественные показатели технологичности конструкций .....	536
10.3. Качественная оценка технологичности .....	543
10.4. Влияние атмосферных и климатических условий на надежность изделий .....	546
10.5. Повышение надежности деталей машин упрочняющей поверхностной обработкой .....	553

10.6. Пути повышения надежности систем электроавтоматики при проектировании .....	554
10.7. Пути повышения надежности систем электроавтоматики при изготовлении .....	568
10.8. Пути повышения надежности систем электроавтоматики при эксплуатации .....	569
<b>Глава 11. Техническая диагностика .....</b>	<b>572</b>
11.1. Основные задачи технической диагностики .....	572
11.2. Структура технической диагностики .....	573
11.3. Постановка задач технической диагностики .....	574
11.4. Прикладные вопросы технической диагностики .....	577
<b>Глава 12. Методы продления сроков эксплуатации дорогостоящих объектов .....</b>	<b>586</b>
12.1. Расчетно-аналитический метод .....	586
12.2. Экспериментальный метод .....	587
12.3. Вероятностный метод расчета работоспособности изделия в течение продленного срока эксплуатации с учетом фактического технического состояния элементной базы .....	591
12.4. Основные понятия и соотношения .....	592
12.5. Показатель «средний остаточный ресурс» и его свойства ..	593
12.6. Оценка остаточного ресурса сложных технических устройств по данным эксплуатации .....	601
<b>Приложение .....</b>	<b>606</b>
1. Значения нормальной функции распределения	
$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}t^2} dt \quad x = (t - M_x) / \sigma; \quad x = U_p = U_\gamma = U_\alpha \dots \dots$	606
2. Значения функции $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2)$ .....	609
3. Функция Лапласа $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ .....	610
4. Значения квантилей Стьюдента $t_\beta$ , удовлетворяющие равенству $2 \int_0^{t_\beta} S_m(t) dt = \beta$ , в зависимости от $\beta$ и $m$ .....	611

5. 95-процентные доверительные интервалы при биномиальном распределении .....	613
6. Квантили $\chi^2$ -распределения	
$\frac{1}{2^{(r-1)/2} \Gamma[(r-1)/2]} \int_0^{\chi^2_{1-\alpha}(r-1)} e^{-t/2} t^{(r-1)/2-1} dt = 1 - \alpha$ .....	616
7. Нижняя доверительная граница $\underline{P}$ для вероятности безотказной работы при биномиальном плане испытаний и уровне доверия $q = 0,8$ .....	617
8. Квантили распределений статистик $V_q$ и $V_q^\gamma$ при $\gamma = 0,9; 0,95; 0,99$ для уровней $0,1$ и $0,9$ .....	622
9. Значения $K(q, \gamma, N)$ .....	625
10. Коэффициенты $\alpha_{n-i+1}$ , используемые при проверке распределения на нормальность с помощью критерия $W$ , для $n = 3 \dots 50$ ..	626
11. Процентили критерия $W$ , используемого для проверки распределения на нормальность, для $n = 3 \dots 50$ .....	628
12. Постоянные $\gamma$ , $\eta$ и $\epsilon$ , используемые для нахождения вероятности получения вычисленного значения $W$ при проверке распределения на нормальность .....	629
13. Процентили для критерия $WE_0$ .....	630
14. Процентили для критерия $WE$ .....	631
15. Критерий А. Н. Колмогорова. Значения теоретической функции А. Н. Колмогорова $K(y)^*$ .....	632
16. Критические значения максимального отклонения ( $d_{max}$ ) эмпирической функции распределения от теоретической (случай конечных объемов выборки) .....	633
17. Статистический критерий значимости $P(h_1, h_2)$ изменения частот (при значениях $m_i < m_1$ и $m_i < m_2$ вероятность $P(h_1, h_2) > 0,16$ ) .....	636
18. Границы критической области для критериев знаков (число $k^*$ положительных и отрицательных разностей) .....	644
19. Критические значения $F$ -распределения при $\alpha = 0,01; \alpha = 0,005$ и различных $m_1$ и $m_2$ .....	645
20. Значения функции $y = 2 \arcsin \sqrt{x}$ .....	647

---

<b>Номограммы</b> .....	648
Рис. 1. Нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы для закона Вейбулла по заданным числу отказов $r$ , объему испытаний $n$ , уровню доверия $q$ и вычисленному значению $v$ .....	648
Рис. 2. Нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы для закона Вейбулла по заданным числу отказов $r$ , объему испытаний $n$ , уровню доверия $q$ и вычисленному значению $v$ .....	649
Рис. 3. Нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы для закона Вейбулла по заданным числу отказов $r$ , объему испытаний $n$ , уровню доверия $q$ и вычисленному значению $v$ .....	650
Рис. 4. Нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы для закона Вейбулла по заданным числу отказов $r$ , объему испытаний $n$ , уровню доверия $q$ и вычисленному значению $v$ .....	651
Рис. 5. Нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы для закона Вейбулла по заданным числу отказов $r$ , объему испытаний $n$ , уровню доверия $q$ и вычисленному значению $v$ .....	652
Рис. 6. Нижняя доверительная граница вероятности безотказной работы для закона Вейбулла по заданным числу отказов $r$ , объему испытаний $n$ , уровню доверия $q$ и вычисленному значению $v$ .....	653
<b>Список литературы</b> .....	654