

**В. П. ФЁДОРОВ  
М. Н. НАГОРКИН**

**ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ  
ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ**

**В. П. ФЁДОРОВ, М. Н. НАГОРКИН**

**ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ  
ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

---

Учебное пособие

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2022

УДК 62-192  
ББК 34.41  
Ф33

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения  
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», заслуженный работник  
высшей школы Российской Федерации *Тамаркин Михаил Аркадьевич*;  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», почетный работник  
высшего профессионального образования Российской Федерации *Кириллов Олег Николаевич*

**Фёдоров, В. П.**

**Ф33** Прикладные методы теории надежности технических объектов и технологических систем : учебное пособие / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 288 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0918-6

Приводятся основные понятия, термины и определения в области надёжности, излагаются методы расчёта и прогнозирования показателей надёжности технических объектов, в том числе технологических систем. Рассматриваются вопросы статистического моделирования и расчёта надёжности технологических систем механической обработки поверхностей деталей машин по параметрам качества. Приводится методика построения и анализа статистических моделей формирования показателей качества деталей при проведении исследований параметрической надёжности технологических систем и определения её показателей методом статистических испытаний на основе анализа результатов машинного эксперимента над имитационными моделями.

Для студентов, обучающихся по направлениям 15.00.00 «Машиностроение», 20.03.01, 20.04.01 «Техносферная безопасность», 27.00.00 «Управление в технических системах», а также аспирантов и специалистов, сфера деятельности которых связана с проблемами надёжности.

УДК 62-192  
ББК 34.41

ISBN 978-5-9729-0918-6

© Фёдоров В. П., Нагоркин М. Н., 2022  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....   | 3         |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 6         |
| Вопросы для самопроверки.....  | 10        |
| <b>ГЛАВА I. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ<br/>И МЕТОДЫ ИХ ОЦЕНКИ.....</b>                                    | <b>11</b> |
| 1.1. Основные понятия, термины и определения.....  | 11        |
| 1.2. Показатели надёжности.....  | 17        |
| 1.2.1. Вероятностные характеристики показателей надёжности.....                                      | 17        |
| 1.2.2. Статистическая оценка вероятностных характеристик<br>надёжности по результатам испытаний..... | 32        |
| 1.3. Методы контроля числа дефектных изделий.....  | 41        |
| Вопросы для самопроверки.....  | 54        |
| <b>ГЛАВА II. НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ<br/>СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ.....</b>                            | <b>57</b> |
| 2.1. Общая постановка задачи.....  | 57        |
| 2.2. Надёжность системы с последовательным<br>соединением элементов.....                             | 60        |
| 2.3. Надёжность системы с параллельным<br>соединением элементов.....                                 | 65        |
| 2.4. Надёжность мажоритарной, мостиковой<br>и комбинированной систем.....                            | 66        |
| 2.5. Надёжность систем с резервированием.....  | 74        |
| 2.6. Надёжность систем с восстановлением.....  | 87        |
| Вопросы для самопроверки.....  | 94        |
| <b>ГЛАВА III. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ.....</b>  | <b>96</b> |
| 3.1. Изменение показателей надёжности технического<br>объекта на этапах его жизненного цикла.....    | 96        |
| 3.2. Методы моделирования надёжности.....  | 98        |
| 3.3. Дискретные модели надёжности технических систем.....  | 103       |
| 3.3.1. Распределение Пуассона.....   | 104       |
| 3.3.2. Биномиальное распределение<br>(распределение Бернулли).....                                   | 105       |
| 3.3.3. Отрицательное биномиальное распределение<br>(распределение Паскаля).....                      | 106       |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3.4. Геометрическое и гипергеометрическое<br>распределения.....   | 106        |
| 3.4. Непрерывные модели надёжности технических систем.....  | 107        |
| 3.4.1. Экспоненциальное (показательное) распределение .....   | 107        |
| 3.4.2. Распределение Вейбулла .....   | 109        |
| 3.4.3. Гамма-распределение .....  | 111        |
| 3.4.4. Нормальное распределение (закон Гаусса) .....  | 114        |
| 3.4.5. Усечённое нормальное распределение .....   | 117        |
| 3.4.6. Логарифмически нормальное распределение .....  | 123        |
| 3.4.7. Распределение по закону равной вероятности.....  | 123        |
| 3.4.8. Распределение Рэлея .....  | 124        |
| 3.4.9. $\chi^2$ -распределение (распределение хи-квадрат) .....   | 125        |
| 3.4.10. $\chi$ -распределение .....   | 126        |
| 3.4.11. Распределение Стьюдента (t-распределение). .....  | 126        |
| 3.4.12. Распределение Фишера – Снедекора .....  | 127        |
| 3.4.13. Модели надёжности, объединяющие<br>несколько распределений.....   | 130        |
| 3.5. Вероятностные модели отказов .....   | 131        |
| 3.5.1. Модель внезапных отказов .....   | 132        |
| 3.5.2. Модель постепенных отказов<br>(параметрическая надёжность) .....   | 140        |
| Вопросы для самопроверки .....  | 145        |
| <b>ГЛАВА IV. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ .....</b>   | <b>147</b> |
| 4.1. Статистическое имитационное моделирование<br>при оценке характеристик надёжности.....                                | 147        |
| 4.2. Статистическое моделирование надёжности элементов.....   | 149        |
| 4.2.1. Статистическое моделирование прочностной<br>надёжности элементов .....   | 149        |
| 4.2.2. Статистическое моделирование параметрической<br>надёжности элементов.....  | 151        |
| 4.3. Статистическое моделирование надёжности сложных<br>технических систем .....  | 153        |
| 4.3.1. Статистическое моделирование надёжности<br>при внезапных отказах .....   | 154        |
| 4.3.2. Статистическое моделирование<br>параметрической надёжности .....   | 156        |
| Вопросы для самопроверки .....  | 159        |
| <b>ГЛАВА V. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ<br/>МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ<br/>НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b> | <b>161</b> |
| 5.1. Условия применимости статистических<br>методов анализа.....  | 161        |

|   |     |
|---|-----|
| 5.2. Первичная обработка экспериментальных данных .....   | 164 |
| 5.3. Статистическая проверка гипотез о законе распределения<br>случайной величины .....                   | 166 |
| 5.3.1. Критерий согласия Пирсона ( $\chi^2$ -критерий) .....  | 167 |
| 5.3.2. Критерий согласия $\omega^2$ (Мизеса) .....  | 168 |
| 5.3.3. Критерий согласия Колмогорова.....   | 169 |
| 5.3.4. Числа Вестергарда.....   | 170 |
| 5.4. Основные понятия корреляционного<br>и регрессионного анализов.....                                   | 170 |
| 5.5. Случайные функции и их характеристики .....  | 174 |
| 5.6. Планирование, проведение и анализ<br>результатов эксперимента .....                                  | 177 |
| 5.6.1. Особенности выбора функции отклика .....   | 179 |
| 5.6.2. Выбор управляемых факторов<br>для статистического моделирования .....                              | 180 |
| 5.6.3. Особенности планирования и анализ результатов<br>при полном и дробном факторном эксперименте ..... | 185 |
| 5.6.4. Основы статистического моделирования<br>в нелинейной области .....                                 | 194 |
| Вопросы для самопроверки .....  | 197 |

## ГЛАВА VI. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ .....

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Основные понятия и методология оценки параметрической надёжности<br>технологических систем.....  | 199 |
| 6.2. Определение показателей параметрической надёжности<br>технологических систем методом<br>статистических испытаний .....                     | 208 |
| 6.3. Диагностика технологических систем<br>по параметрам качества и эксплуатационных свойств<br>обрабатываемых поверхностей деталей .....       | 217 |
| 6.3.1. Принципы диагностики технологических систем<br>обработки поверхностей деталей по параметрам<br>качества и эксплуатационных свойств ..... | 218 |
| 6.3.2. Измерение геометрических параметров<br>качества поверхностей деталей машин.....  | 224 |
| 6.3.3. Исследование физико-механических свойств<br>поверхностного слоя.....   | 226 |
| 6.3.4. Исследование контактной жёсткости<br>неподвижных соединений.....   | 229 |
| 6.3.5. Исследование прочности адгезионной связи<br>и молекулярной составляющей<br>коэффициента трения .....                                     | 233 |

---

|  |     |
|--|-----|
| 6.3.6. Исследование триботехнических характеристик соединений трения скольжения .....  | 235 |
| 6.4. Оценка параметрической надежности технологической системы обеспечения показателей износостойкости цилиндрических поверхностей деталей соединений трения скольжения..... | 239 |
| Вопросы для самопроверки .....   | 248 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 250 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 253 |
| ГОСТЫ И РУКОВОДЯЩИЕ ДОКУМЕНТЫ .....  | 257 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ .....   | 260 |