

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»

---

**М.Н. Захаров, П.А. Ларюшкин**

## **Надежность механических систем**

Учебно-методическое пособие

2-е издание, исправленное



Москва

**ИЗДАТЕЛЬСТВО**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**2026**

УДК 62-192  
ББК 34.41  
3-38

Издание доступно в электронном виде по адресу  
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8682/>

Факультет «Робототехника и комплексная автоматизация»  
Кафедра «Основы конструирования машин»

*Рекомендовано Научно-методическим советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

*Рецензент*  
канд. техн. наук *А.В. Антонов*

**Захаров, М. Н.**  
3-38 Надежность механических систем : учебно-методическое пособие / М. Н. Захаров, П. А. Ларюшкин. — 2-е изд., испр. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 40, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6815-7

Приведены основные сведения о количественных критериях надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий, законах распределения срока их службы, способах резервирования и надежности конструкций и отдельных типов деталей машин. Для каждой темы рассмотрены типовые задачи и их решения. Представлены задачи для самостоятельного решения, имеющие различный уровень сложности.

Для студентов, изучающих основы теории надежности, обучающихся на кафедре «Основы конструирования машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 62-192  
ББК 34.41

ISBN 978-5-7038-6815-7

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026,  
с изменениями  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем учебно-методическом пособии изложены основы теории надежности, которые являются базой для формирования у студентов общих знаний о работоспособности оборудования, вероятностной природе его отказов и последствиях таких отказов. Цель изучения материала пособия — приобретение знаний об основных положениях вероятностной теории надежности и освоение основных принципов проведения прочностных расчетов при вероятностной постановке задач. Полученные знания и навыки могут быть применены при проектировании и эксплуатации объектов общего машиностроения.

Пособие предназначено в первую очередь для студентов магистратуры кафедры РКЗ «Основы конструирования машин», изучающих дисциплину «Надежность механических систем», и структурировано в соответствии с рабочей программой данной дисциплины. Каждый из пяти разделов соответствует определенной теме, изучаемой в течение нескольких семинаров, и включает в себя:

- теоретические сведения, представляющие собой выдержки из лекционного курса и материала основной литературы, необходимые для решения задач;
- пример типовой задачи с решением, демонстрирующий способ применения изложенных в теоретической части расчетных методов и зависимостей;
- задачи для самостоятельного решения, в том числе повышенной сложности (отмечены звездочкой). Для задач нормальной сложности в конце методических указаний приведены ответы;
- контрольные вопросы для проверки базовых теоретических знаний по изучаемой теме.

Материал учебно-методического пособия может быть использован как при самостоятельной подготовке к семинарским занятиям, так и в качестве справочного материала непосредственно на самих занятиях. Контрольные вопросы и задачи нормальной сложности позволяют сформировать понимание о содержании, логике и сложности вопросов (заданий) текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. Приведенные в конце пособия ответы к задачам помогают провести самопроверку. Задачи повышенной сложности при необходимости могут быть использованы для таких отдельных видов самостоятельной работы, как текущие домашние задания.

# 1. ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

Согласно ГОСТ 27.002–2015, термин «надежность» определяется как свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. При этом надежность является комплексным свойством и в зависимости от типа объекта и требований к нему может включать в себя такие понятия, как:

- безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения;

- ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта;

- восстанавливаемость — свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта;

- долговечность — свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния;

- сохраняемость — свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования;

- готовность — свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Количественная оценка надежности объекта проводится, как правило, путем расчета значений показателей, перечисленных ниже.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Определяется следующим соотношением:

$$P(t) = \frac{n_{\text{раб}}(t)}{N},$$

где  $n_{\text{раб}}(t)$  — число изделий, сохранивших свою работоспособность к моменту времени  $t$ ;  $N$  — общее число изделий, поставленных на испытания.

Смежным понятием является вероятность отказа  $Q(t)$ :

$$Q(t) = \frac{n_{\text{отк}}(t)}{N},$$

где  $n_{\text{отк}}(t)$  — число изделий, отказавших к моменту времени  $t$ , при этом

$$P(t) + Q(t) = 1;$$

$$Q(t) = \frac{n_{\text{отк}}(t)}{N}.$$

С точки зрения теории вероятностей  $Q(t)$  представляет собой функцию распределения случайной величины (времени работы изделия до наступления отказа), т. е. характеризует вероятность того, что отказ наступит в момент времени  $t$  или раньше.

Частоту отказов  $f(t)$  рассчитывают следующим образом:

$$f(t) = \frac{\Delta n_{\text{отк}}(t)}{N \Delta t},$$

где  $\Delta n_{\text{отк}}(t)$  — число изделий, отказавших за временной интервал  $\Delta t$ , при этом  $\Delta t = [t - 0,5\Delta t; t + 0,5\Delta t]$ .

При уменьшении величины рассматриваемого интервала, т. е. при  $\Delta t \rightarrow 0$ , в пределе получим

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n_{\text{отк}}(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{dn_{\text{отк}}(t)}{N \cdot dt} = \frac{dQ(t)}{dt}.$$

Таким образом, с точки зрения теории вероятностей частота отказов представляет собой плотность вероятности для распределения случайной величины — времени работы изделия до наступления отказа.

Следующим количественным показателем надежности является интенсивность отказов  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_{\text{отк}}(t)}{n_{\text{раб}}(t) \Delta t}.$$

Умножив числитель и знаменатель этой формулы на общее число деталей  $N$  и перейдя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n_{\text{отк}}(t)}{n_{\text{раб}}(t) \Delta t} \frac{N}{N} = \frac{dn_{\text{отк}}(t)}{N dt} \frac{N}{n_{\text{раб}}(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}.$$

Согласно ГОСТ 27.002–2015, интенсивность отказов определяется как условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Еще одним типовым показателем надежности является средняя наработка до отказа, т. е. математическое ожидание наработки до отказа  $\bar{T}$ :

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{отк}i},$$

где  $t_{\text{отк}i}$  — время безотказной работы  $i$ -го изделия.

Если время отказа изделия характеризуется не конкретным моментом времени, а интервалами  $\Delta t_k$ , количество которых равно  $m$  ( $k = 1 \dots m$ ), то формула для определения средней наработки до отказа имеет следующий вид:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^m \Delta n_{\text{отк}k} t_k,$$

где  $\Delta n_{\text{отк}k}$  — число изделий, отказавших за  $k$ -й временной интервал;  $t_k$  — середина этого интервала.

Для восстанавливаемых (ремонтпригодных) изделий используется показатель средней наработки между отказами  $\bar{T}$ , представляющей собой математическое ожидание наработки объекта между отказами:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_{отк\ i}} t_{ij}}{\sum_{i=1}^N n_{отк\ i}}.$$

Здесь  $n_{отк\ i}$  — число отказов  $i$ -го изделия за весь период испытаний,  $t_{ij}$  — время исправной работы  $i$ -го изделия между  $(j - 1)$ -м и  $j$ -м отказами.

Близким по смыслу является понятие гамма-процентной наработки до отказа (или между отказами), т. е. наработки, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах. Иными словами, за указанное время вероятность безотказной работы объекта снизится до значения  $\gamma$ .

### Пример типовой задачи

На испытании находится 2000 однотипных невосстанавливаемых изделий, из которых за первые 5000 ч отказало 800 шт. За последующие 500 ч отказало еще 100 шт., а на интервале 5500 – 6000 ч. — еще 300 шт. Определить для интервала 5500 – 6000 ч. вероятность безотказной работы  $P(t)$  на его границах, частоту  $f(t)$  и интенсивность  $\lambda(t)$  отказов, а также оценить среднюю наработку до отказа  $\bar{T}$ .

**Решение.** Вероятность безотказной работы в моменты времени 5500 ч и 6000 ч равна количеству работоспособных изделий в соответствующий момент, отнесенному к общему числу испытываемых изделий:

$$P(5500) = \frac{n_{раб}(5500)}{N} = \frac{2000 - 800 - 100}{2000} = 0,55;$$

$$P(6000) = \frac{n_{раб}(6000)}{N} = \frac{2000 - 800 - 100 - 300}{2000} = 0,4.$$

Если требуется рассчитать вероятность безотказной работы для середины интервала и при этом отсутствуют сведения о распределении отказов в этом интервале, то допустимо принять, что в пре-

## ЛИТЕРАТУРА

*Пронилов А.С.* Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2002. 559 с. С. 548–559.

*Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З.* Надежность машин: учебное пособие для вузов / под ред. Д.Н. Решетова. М.: Высш. шк., 1988. 237 с.

*Захаров М.Н.* Основы теории надежности оборудования: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 94 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие .....                                                                             | 3  |
| 1. Основные критерии надежности .....                                                         | 4  |
| 2. Законы распределения сроков службы до отказа .....                                         | 13 |
| 3. Критерии надежности восстанавливаемых изделий .....                                        | 20 |
| 4. Надежность сложных систем .....                                                            | 25 |
| 5. Оценка вероятности разрушения конструкции и надежность отдельных групп деталей машин ..... | 33 |
| Ответы .....                                                                                  | 42 |
| Литература .....                                                                              | 43 |