

**В. В. Пеленко
В. В. Нечитайлов
А. Д. Ширяев**

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Учебно-методическое пособие

**Санкт-Петербург
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики

В. В. Пеленко
В. В. Нечитайлов
А. Д. Ширяев

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Учебно-методическое пособие

Утверждено Редакционно-издательских советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2026

УДК 620.19(075)

ББК 31.38я7

П246

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной энергетики
СПбГЛТУ

А. В. Куликов;

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплосиловых установок
и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского
государственного университета технологий и дизайна

А. М. Хлыновский

Пеленко, В. В.

П246 Надежность систем производства электрической и тепловой энергии:
учебно-методическое / В. В. Пеленко, В. В. Нечитайлов, А. Д. Ширяев.
— СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2026. — 61 с.

Учебно-методическое пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Надежность систем производства электрической и тепловой энергии» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика».

В учебно-методическом пособии рассматриваются вводные положения теоретических основ надежности, цели и методика решения практических задач. Содержит задачи и примеры расчетов количественных значений индивидуальных и комплексных показателей надежности изделий и систем.

Учебно-методическое пособие состоит из методических указаний к 8 практическим занятиям. Даны варианты заданий, исходные и справочные данные.

Учебно-методическое пособие предназначено для магистрантов очной и заочной форм обучения.

УДК 620.19(075)

ББК 31.38я7

©ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

© Пеленко В. В., Нечитайлов В. В.,
Ширяев А. Д., 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1. Показатели проявления вероятности события в теории надежности	5
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2. Основные понятия теории надежности. Определение единичных показателей надежности невосстанавливаемых объектов.....	9
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3. Определение показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным на определенном промежутке времени.....	22
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4. Определение единичных и комплексных показателей надежности восстанавливаемых объектов	28
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5. Общие методы расчета показателей надежности технической системы в период нормальной эксплуатации.....	40
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6. Определение показателей надежности объектов при различных законах распределения	45
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 7. Определение комплексных показателей надежности технических систем.....	54
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8. Аналитическое определение количественных характеристик надежности изделия	58

ВВЕДЕНИЕ

Надежность является одним из комплексных свойств теплоэнергетического оборудования, определяющих уровень его качества. Она закладывается в изделие при его проектировании и изготовлении и поддерживается в процессе эксплуатации.

Изучение закономерностей возникновения отказов и восстановления работоспособности технических систем; влияния внешних и внутренних воздействий на процессы, происходящих в технических системах; методов количественного определения и сравнительной оценки надежности; мероприятий по повышению надежности при проектировании и изготовлении технических систем, а также способов поддержания необходимого уровня их надежности в процессе эксплуатации являются обязательным элементом технической подготовки специалиста любой специальности.

В предлагаемом учебно-методическом пособии приводятся вводные положения некоторых базовых теоретических основ надежности, цели и методика решения практических задач. Базовой основой материала являются собственные разработки, а также материалы таких авторов, как Острейковский В. А., Шемшура Е. А., Вышегородцева Г. И., Агеева В. Н., а также ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике».

Учебно-методическое пособие содержит задачи и примеры расчетов количественных значений единичных и комплексных показателей надежности, а также расчетов показателей надежности технических систем, их элементов на различных периодах эксплуатации. Излагается порядок расчета показателей надежности сложных технических систем. Для всех типовых задач приведены решения с методическими указаниями, касающимися выбора расчетных формул, а также значений величин, входящих в них. Представлена последовательность выполнения расчетов.

Практическая работа № 1

ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СОБЫТИЯ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Цель работы: выработать способность определения показателей проявления вероятности совместимых и несовместимых событий.

Задачи: получить навыки определения количественных значений показателей надежности с использованием теорем теории вероятности.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Вероятность события A , $P(A)$ – отношение числа благоприятствующих этому событию исходов, m , к общему числу всех равновозможных несовместных элементарных исходов, n , образующих полную группу

$$P(A) = m / n = \lim_{n \rightarrow \infty} m / n.$$

Очевидно, что вероятность любого события удовлетворяет двойному неравенству

$$0 \leq P(A) \leq 1,$$

при этом вероятность события:

- достоверного $P(A) = 1$ (например, вероятность работоспособного состояния исправной технической системы);
- невозможного $P(A) = 0$ (например, вероятность исправного состояния неработоспособной технической системы);
- случайного $0 < P(A) < 1$ (например, появление неисправности в процессе гарантийного срока эксплуатации технической системы).

В теории надежности широко применяются такие понятия логической алгебры, как сумма и произведение нескольких, в частности, двух событий.

Сумма событий

Суммой двух несовместных событий A и B называется событие C , заключающееся в проявлении события A или B , безразлично какого.

Графически сумму событий можно показать следующим образом (рис. 1.1).

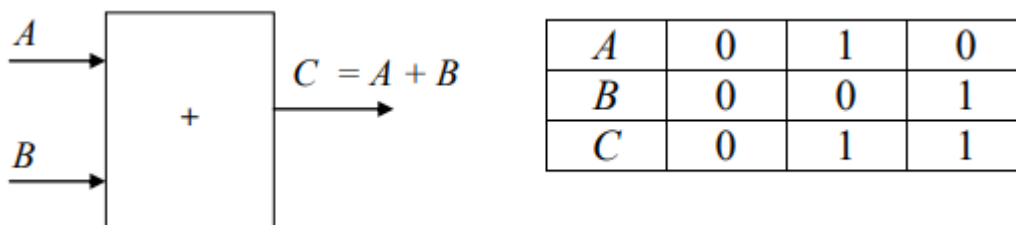


Рисунок 1.1. Сумма несовместных событий

Вероятность появления одного из двух несовместных событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(C) = P(A + B) = P(A) + P(B).$$

Сумма вероятностей двух событий, образующих полную группу, равна единице.

$$P(A) + P(B) = 1.$$

Так как безотказная работа и отказ объекта составляют полную группу событий, то можно записать для любого момента времени эксплуатации двигателя

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

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы;

$Q(t)$ – вероятность отказа;

t – наработка изделия.

Суммой нескольких событий называют событие, которое состоит в появлении хотя бы одного из этих событий.

Вероятность появления одного из нескольких попарно несовместных событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий:

$$\begin{aligned} P(A + B + C) &= P(A) + P(B) + P(C) = P(A + B) + P(C) = \\ &= P(A + C) + P(B) = P(B + C) + P(A). \end{aligned}$$

Произведение событий

Произведением нескольких событий называется событие, состоящее в совместном проявлении всех этих событий.

Графически произведение событий можно показать следующим образом (рис. 1.2).

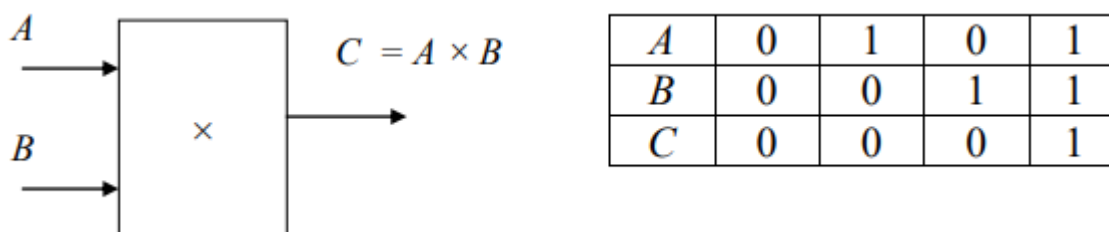


Рисунок 1.2. Произведение событий

Вероятность совместного проявления двух событий A и B равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность другого, вычисленную в предположении, что первое событие уже наступило.

Применительно к зависимым событиям можно записать:

$$P(A \times B) = P(A) \times P_A(B) = P(B) \times P_B(A),$$

где $P_A(B)$, $P_B(A)$ – условные вероятности, соответственно, событий B и A .

Более применимой в теории надежности является формула произведения вероятностей нескольких независимых событий.

Техническая система состоит из сборочных единиц и деталей, ряд из которых обеспечивает ее функционирование. Обычно машина будет работоспособна, если в работоспособном состоянии находятся все эти изделия.

Отсюда можно сделать вывод, что вероятность работоспособного состояния машины равна вероятности совместного проявления работоспособного состояния всех указанных выше изделий, т. е.

$$P(A \times B \times C \times \dots \times N) = P(A) \times P(B) \times P(C) \times \dots \times P(N).$$

Суммой двух совместных событий A и B называется событие C , заключающееся в проявлении события A или B , безразлично какого, или обоих вместе.

Вероятность появления хотя бы одного из двух совместных событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления:

- для независимых событий

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B),$$

- для зависимых событий

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P_A(B).$$

2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СОБЫТИЙ

Задача № 1

При испытаниях на надежность группы невосстанавливаемых изделий время испытаний разбито на четыре периода. Установлено, что вероятность отказа в период T_1 составила 0,15, в период T_2 – 0,45, в период T_3 – 0,30, в период T_4 – 0,1.

Найти вероятность того, что наугад взятое изделие из группы отказало:

- 1) либо в первый, либо в третий периоды времени;
- 2) либо во второй или третий периоды испытаний.

Решение:

Так как отказы изделий в различные периоды испытания есть события несовместимые (отказ изделия в какой-либо период исключает его отказ в другой период), то теорема сложения вероятностей применима. Поэтому искомая вероятность равна:

1. $P(T_1 + T_3) = 0,15 + 0,30 = 0,45,$
2. $P(T_2 + T_3) = 0,45 + 0,30 = 0,75.$

Задача № 2

По статистике, из всех работ по техническому обслуживанию (ТО) двигателей, поступающих на станцию технического обслуживания (СТО), 80 % приходится на систему зажигания: $m(A) = 0,8$; 35 % приходится на систему питания: $m(A) = 0,35$. Какова вероятность того, что очередной двигатель, поступивший на СТО для ТО, будет требовать проведения работ по ТО обеих систем, либо только в системе зажигания или питания?

Решение:

События, заключающиеся в необходимости проведения работ по ТО систем зажигания и питания, являются независимыми друг от друга и совместными событиями.

1. Вероятность проведения работ по ТО системы зажигания
 $P(A) = 80 / 100 = 0,8.$
2. Вероятность проведения работ по ТО системы питания

$$P(B) = 35 / 100 = 0,35.$$

3. Вероятность того, что очередной двигатель, поступивший на СТО, будет требовать работ по ТО обеих систем

$$P(A \times B) = 0,8 \times 0,35 = 0,28.$$

4. Вероятность того, что очередной двигатель, поступивший на СТО, будет требовать работ по ТО какой-либо одной из систем

$$P(A + B) = 0,8 + 0,35 - 0,28 = 0,87.$$

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Варианты исходных данных для решения задач на практическом занятии выбираются согласно последней цифре номера зачетной книжки по таблице 1.1.

Таблица 1.1. Исходные данные по вариантам

Показатель	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Задача № 1										
$P(T_1)$	0,1	0,55	0,45	0,3	0,55	0,35	0,4	0,15	0,2	0,5
$P(T_2)$	0,3	0,05	0,1	0,1	0,25	0,1	0,2	0,55	0,35	0,17
$P(T_3)$	0,2	0,15	0,05	0,4	0,05	0,15	0,1	0,05	0,4	0,2
$P(T_4)$	0,4	0,25	0,4	0,2	0,15	0,4	0,3	0,25	0,05	0,12
Задача № 2										
$m(A)$	45	55	65	75	90	40	50	60	70	80
$m(B)$	75	80	55	40	30	55	75	45	55	55

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое случайность?
2. Что такое случайное событие?
3. Что такое вероятность события?
3. Что такое сумма событий?
4. Что такое произведение событий?

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
2. Шемшур Е. А. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям по дисциплине «Надежность технических систем» / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2015. – 64 с.

Практическая работа № 2

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель работы: выработать навыки определения студентами количественных значений показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным.

Задачи обучения:

- познакомить с основными понятиями теории надежности;
- разъяснить особенности показателей безотказности и обучить основным методам их определения;
- привить навыки определения показателей безотказности невосстанавливаемых объектов по статистическим данным;
- научить давать характеристику находимых показателей безотказности.

ВВОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из **единичных** и **комплексных** показателей.

1.1. Единичные показатели надежности

В зависимости от назначения объекта и условий его применения надежность, как комплексное свойство, может включать в частном случае такие единичные показатели, как **безотказность**, **долговечность**, **ремонтпригодность** и **сохраняемость**.

Безотказность согласно ГОСТ Р 27.102-2021 – это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение определенного времени или наработки в заданных режимах и условиях.

Долговечность согласно ГОСТ Р 27.102-2021 – это свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта. Другими словами, это способность изделия функционировать надлежащим образом в течение длительного времени, пока оно не достигнет состояния, в котором дальнейшая эксплуатация становится невозможной.

Ремонтпригодность согласно ГОСТ Р 27.102-2021 – это свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности объекта путем технического обслуживания и ремонта.

В зависимости от возможности дальнейшего применения объекта, изделия классифицируются на *восстанавливаемые* и *невосстанавливаемые*.

Восстанавливаемость согласно ГОСТ Р 27.102-2021 – это свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое может быть восстановлено потребителем, т. е. изделие, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Невосстанавливаемое изделие – изделие, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации не предусмотрено технической и конструкторской документацией.

Сохраняемость согласно ГОСТ Р 27.102-2021 – это свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Содержательная схема классификации единичных показателей надежности приведена на рисунке 2.1.

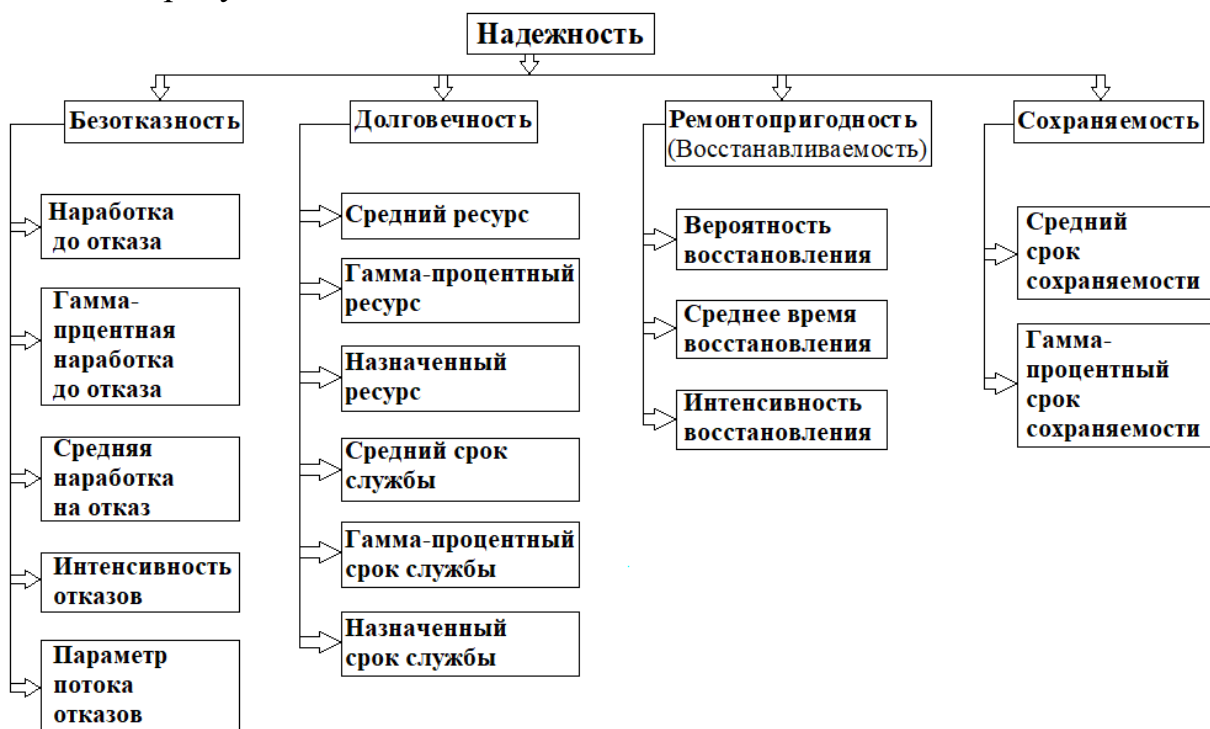


Рисунок 2.1. Единичные показатели надежности

Следует различать понятия «средняя наработка до отказа» и «средняя наработка на отказ».

Средняя наработка до отказа (MTTF- Mean Time To Failure):

- Отражает среднее время, которое объект проработает до своего первого отказа.

- Используется для неремонтопригодных устройств, которые после отказа не могут быть восстановлены.

Средняя наработка на отказ (MTBF- Mean Time Between Failure):

- Отражает среднее время между двумя последовательными отказами восстанавливаемого объекта.

1.2. Комплексные показатели надежности

Каждый из рассмотренных выше показателей характеризует только одну, конкретную составляющую надежности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность или сохраняемость. Существует несколько показателей, которые отражают суммарные, интегральные характеристики.

К1. Коэффициент готовности объекта (K_{Γ})

Это комплексный показатель надежности, характеризующий готовность объекта к работе в интервале времени между плановыми остановами объекта, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, например, остановами объекта на плановый ремонт, модернизацию, вывод в консервацию.

Коэффициент готовности K_{Γ} представляет собой вероятность, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта не предусматривается:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + t_{\text{восст}}^{\text{ав}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии;

$t_{\text{восст}}^{\text{ав}}$ – время восстановления объекта после аварии.

К2. Коэффициент оперативной готовности ($K_{\text{ог}}$)

Это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} * P(t),$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта.

К3. Коэффициент технического использования объекта ($K_{\text{ти}}$)

Этот коэффициент представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период. Он характеризует долю времени пребывания объекта в работоспособном состоянии по отношению ко всему рассматриваемому календарному сроку, включающему периоды работоспособности и простоев, связанных как с плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, так и неплановыми ремонтами, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта.

$$K_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{восст}}^{\text{ав}} + t_{\text{рем}}^{\text{пл}} + t_{\text{то}}^{\text{пл}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии;
 $t_{\text{восст}}^{\text{ав}}$ – время восстановления объекта после аварии;
 $t_{\text{рем}}^{\text{пл}}$ – время планового ремонта (восстановления) объекта;
 $t_{\text{то}}^{\text{пл}}$ – время планового технического обслуживания объекта.

Надежность технического изделия постоянно изменяется в процессе эксплуатации, и при этом оно может переходить из одного состояния в другое посредством событий. Схема классификации событий и изменения состояний эксплуатируемого изделия приведена ниже (рис. 2.2).

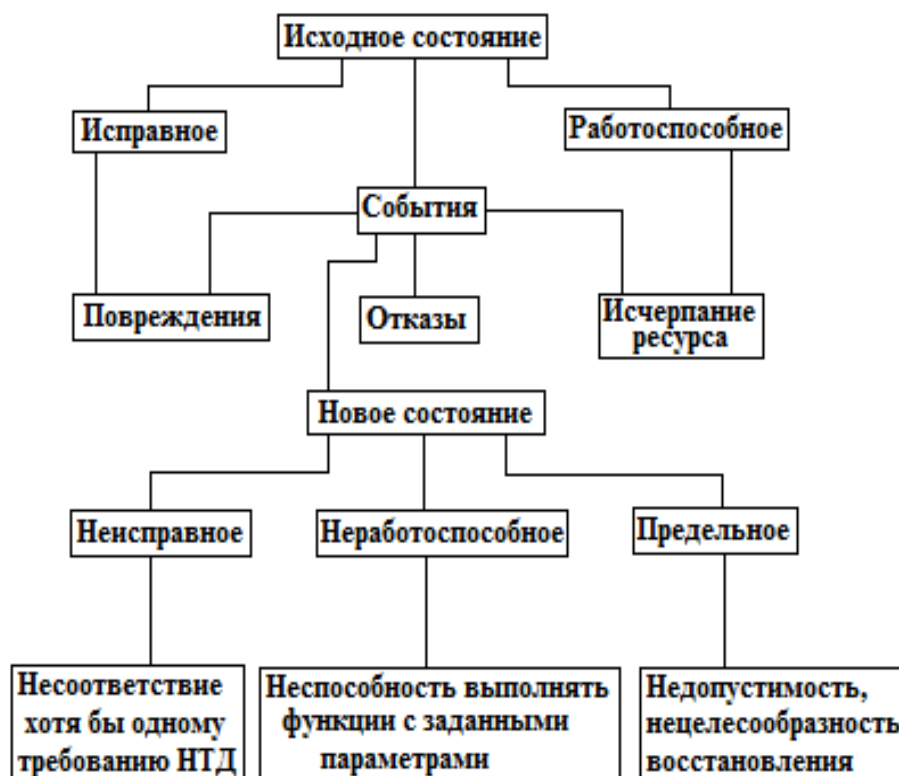


Рисунок 2.2. Схема возможных состояний и событий в процессе эксплуатации изделия

1.3. Показатели безотказности

Безотказность является одним из единичных показателей надежности.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Показателями безотказности, применяемыми к *невосстанавливаемым* объектам, являются вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы $R(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Вероятность безотказной

работы определяется в предположении, что в начале интервала времени (момент начала исчисления наработки) изделие находится в работоспособном состоянии.

Гамма-процентная наработка до отказа – наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до отказа.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

В определении показателей безотказности используются следующие временные понятия (не являются показателями надежности):

- наработка – продолжительность или объем работы объекта;
- наработка до отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа;
- наработка до первого отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации до первого отказа (частный случай наработки до отказа).

Безотказность как одна из важнейших составляющих надежности характеризуется закономерностями возникновения отказов, а ремонтпригодность – закономерностями их предупреждения и устранения. Долговечность определяется интенсивностью и продолжительностью действия этих закономерностей, их постоянными изменениями в допустимых пределах на протяжении всего срока службы.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Статистическая оценка вероятности безотказной работы на период наработки от 0 до t определяется по формулам:

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (2.1)$$

или

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N}, \quad (2.2)$$

где N – количество объектов, работоспособных в начальный момент времени; $N(t)$ – количество объектов, работоспособных на момент времени t ; $n(t)$ – количество объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .

Статистическая оценка вероятности отказа на соответствующие моменты времени определяется по формулам:

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (2.3)$$

или

$$\hat{Q}(t) = 1 - \frac{N(t)}{N}. \quad (2.4)$$

Средняя наработка до отказа по статистическим данным определяется по соотношению:

$$\widehat{T_0}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (2.5)$$

где t_i – наработка до отказа i – го объекта.

Плотность распределения отказов во времени определяем по формуле:

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \Delta t}, \quad (2.6)$$

где Δt – интервал времени;

$\Delta n(t)$ – количество объектов, отказавших на интервале времени Δt .

Оценку интенсивности отказов можно определить по формуле:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t}. \quad (2.7)$$

Отметим различие между плотностью распределения случайной наработки до отказа и интенсивностью отказов.

Плотность распределения отказов во времени (наработки до отказа) – это дифференциальная функция, которая применяется для мгновенных значений показателей надежности. Она учитывает возможность возникновения отказа в рассматриваемый момент времени без учета предыстории функционирования изделия.

Интенсивность отказов – это условная плотность вероятности возникновения отказа изделия, которая определяется для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возникал. Интенсивность отказов характеризует надежность изделия только до первого отказа и поэтому является удобной характеристикой лишь для невосстанавливаемых изделий.

Таким образом, плотность распределения наработки до отказа фокусируется на общем распределении, а интенсивность отказов – на конкретном моменте времени и условиях.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить методику расчета показателей безотказности.
2. Дать определение рассматриваемого показателя безотказности.
3. Определить исходные данные для расчета показателя безотказности.
4. Рассчитать требуемый показатель безотказности в соответствии с формулами (2.1) - (2.7).
5. Дать характеристику определяемому показателю по соответствующим признакам классификации.
6. Ответить на контрольные вопросы.

4. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Пример 4.1. На стендовые испытания поставили 60 насосов. Испытания проводились в течение 2000 часов. В ходе испытаний отказало 6 насосов. Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы изделий за время 2000 часов.

Решение:

Вероятность безотказной работы $R(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы определяется по формуле (2.1):

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N},$$

где N – число объектов, работоспособных в начальный момент времени; $n(t)$ – число объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .

Подставляем исходные данные в формулу (2.1):

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = 1 - \frac{6}{60} = 0,9.$$

Ответ. Вероятность безотказной работы $\hat{R}(t) = 0,9$. Вероятность безотказной работы является:

- показателем безотказности;
- единичным.

Пример 4.2. В ходе испытаний 60 объектов зафиксированы отказы в следующие периоды наработки: $t_1 = 1210$ ч; $t_2 = 480$ ч; $t_3 = 900$ ч; $t_4 = 700$ ч; $t_5 = 1900$ ч; $t_6 = 1100$ ч; остальные объекты не отказали. Испытания проводились в течение 2000 часов. Найти статистическую оценку среднего значения наработки до первого отказа.

Решение:

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание наработки до отказа.

Средняя наработка до отказа по данным статистики определяем по формуле (2.5):

$$\widehat{T_0}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{60} (1210 + 480 + 900 + 700 + 1900 + 1100 + 2000 * 54) = 1904,83 \text{ ч} \cong 1905 \text{ ч}$$

Ответ. Средняя наработка до отказа $T_0 = 1905$ ч. Средняя наработка до первого отказа является:

- показателем безотказности;
- единичным.

Пример 4.3. На испытания поставили 200 изделий. За 100 часов работы отказало 25 изделий. За последующие 10 часов отказало еще 7 изделий. Определить статистическую оценку вероятности безотказной работы и

вероятности отказа на моменты времени: $t_1 = 100$ ч и $t_2 = 110$ ч, оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 100$ ч и $t_2 = 110$ ч.

Решение:

Статистическую оценку вероятности безотказной работы на момент времени $t_1 = 100$ ч определяем по формуле (2.1):

$$\hat{R}(100) = 1 - \frac{n(100)}{N} = 1 - \frac{25}{200} = 0,875.$$

Определяем количество отказавших изделий на момент времени $t_2 = 110$ ч:

$$n(110) = n(100) + \Delta n = 25 + 7 = 32 \text{ изд.}$$

и вероятность безотказной работы на момент времени $t_2 = 110$ ч:

$$\hat{R}(110) = 1 - \frac{n(110)}{N} = 1 - \frac{32}{200} = 0,84.$$

Статистическая оценка вероятности отказа на соответствующие моменты времени определяется по формуле (2.3):

$$\hat{Q}(100) = \frac{n(100)}{N} = \frac{25}{200} = 0,125.$$

$$\hat{Q}(110) = \frac{n(110)}{N} = \frac{32}{200} = 0,16.$$

Плотность распределения отказов во времени определяем по формуле (2.6):

$$\hat{f}(110) = \frac{\Delta n(110)}{N \Delta t} = \frac{7}{200 * 10} = 0,0035 \text{ 1/ч.}$$

Оценку интенсивности отказов можно определить по формуле (2.7):

$$\hat{\lambda}(110) = \frac{\Delta n(110)}{[N - n(110)] \Delta t} = \frac{7}{(200 - 32) * 10} = 0,00417 \text{ 1/ч.}$$

Ответ:

$$\hat{R}(100) = 0,875; \hat{R}(110) = 0,84; \hat{Q}(100) = 0,125; \hat{Q}(110) = 0,16;$$

$$\hat{f}(110) = 0,0035 \text{ 1/ч.; } \hat{\lambda}(110) = 0,00417 \text{ 1/ч.}$$

Данные показатели являются:

- показателями безотказности;
- единичным, так как характеризует только одно из свойств – безотказность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- групповым, так как характеризует надежность партии изделий.

Пример 4.4. На испытание было поставлено 600 однотипных объектов. За период 4000 часов отказало 60 объектов, а за период от 4000 до 5000 часов отказало еще 30 объектов.

Требуется определить вероятность безотказной работы P^* объектов и вероятность отказа Q за 4000 и 5000 часов работы. Вычислить интенсивность отказов объектов в промежутке времени 4000–5000 часов.

Решение:

1. Определим вероятность безотказной работы и вероятность отказа объектов за 4000 и 5000 часов работы.

$$P^*(4000) = \frac{N_o - n(4000)}{N_o} = \frac{600 - 60}{600} = 0,9$$

$$P^*(5000) = \frac{N_o - n(5000)}{N_o} = \frac{600 - (60 + 30)}{600} = 0,85$$

$$Q(4000) = 1 - P(4000) = 1 - 0,9 = 0,1$$

$$Q(5000) = 1 - P(5000) = 1 - 0,85 = 0,15$$

2. Вычислим интенсивность отказов объектов в промежутке времени 4000–5000 ч.

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{\bar{N}(t)\Delta t}$$

$$\bar{N}(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2} = \frac{540 + 510}{2} = 525$$

$$\lambda^*(t) = \frac{30}{525 \cdot 1000} = 5,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{\text{час}} \right).$$

Ответ:

$$P^*(4000) = 0,9; P^*(5000) = 0,85; Q(4000) = 0,1; Q(5000) = 0,15;$$

$$\lambda^*(t) = \frac{30}{525 \cdot 1000} = 5,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{1}{\text{час}} \right).$$

Данные показатели являются:

- показателями безотказности;
- единичным, так как характеризует только одно из свойств – безотказность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- групповым, так как характеризует надежность партии изделий.

Пример 4.5. На испытание поставлено 500 образцов. Отказы фиксируются каждые 200 часов работы. Распределение числа отказов приведено в таблице 2.1.

Построить график зависимости изменения вероятности безотказной работы и интенсивности отказов от наработки в интервале времени 0–2000 часов.

Исходное распределение числа отказов изделий приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Распределение числа отказов изделий

Δt	N_o	n	N(t)	P(t)
0-200	500	20	480	0,96
200-400		45	435	0,87
400-600		32	403	0,8
600-800		12	391	0,78
800-1000		8	383	0,77
1000-1200		2	381	0,76
1200-1400		1	380	0,76
1400-1600		2	378	0,75
1600-1800		2	376	0,75
1800-2000		1	375	0,75

Решение:

1. Определяем P (1) по формуле:

$$P(t) = \frac{N_o - n(t)}{N_o} = \frac{N(t)}{N_o} = \frac{500 - 480}{500} = 0,96$$

2. Определим $\lambda(t)$ по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N\Delta t},$$

где $N = \frac{N_1 + N_2}{2}$ – среднее число исправно работающих образцов за выбранный интервал.

Расчетные данные внесем в таблицу 2.2:

Таблица 2.2. Расчетные данные

Δt	N_o	n	$N_1(t)$	$N_2(t)$	N	$\lambda(t) \times 10^{-4}$
0-200	500	20	500	480	490	2
200-400		45	480	435	457,5	4,9
400-600		32	435	403	419	3,8
600-800		12	403	391	397	1,5
800-1000		8	391	383	387	1
1000-1200		2	383	381	382	0,26
1200-1400		1	381	380	380	0,13
1400-1600		2	380	378	379,5	0,26
1600-1800		2	378	376	378	0,26
1800-2000		1	376	375	376,5	0,32

Графики зависимости изменения вероятности безотказной работы и интенсивности отказов от наработки приведены на рисунках 2.3 и 2.4.

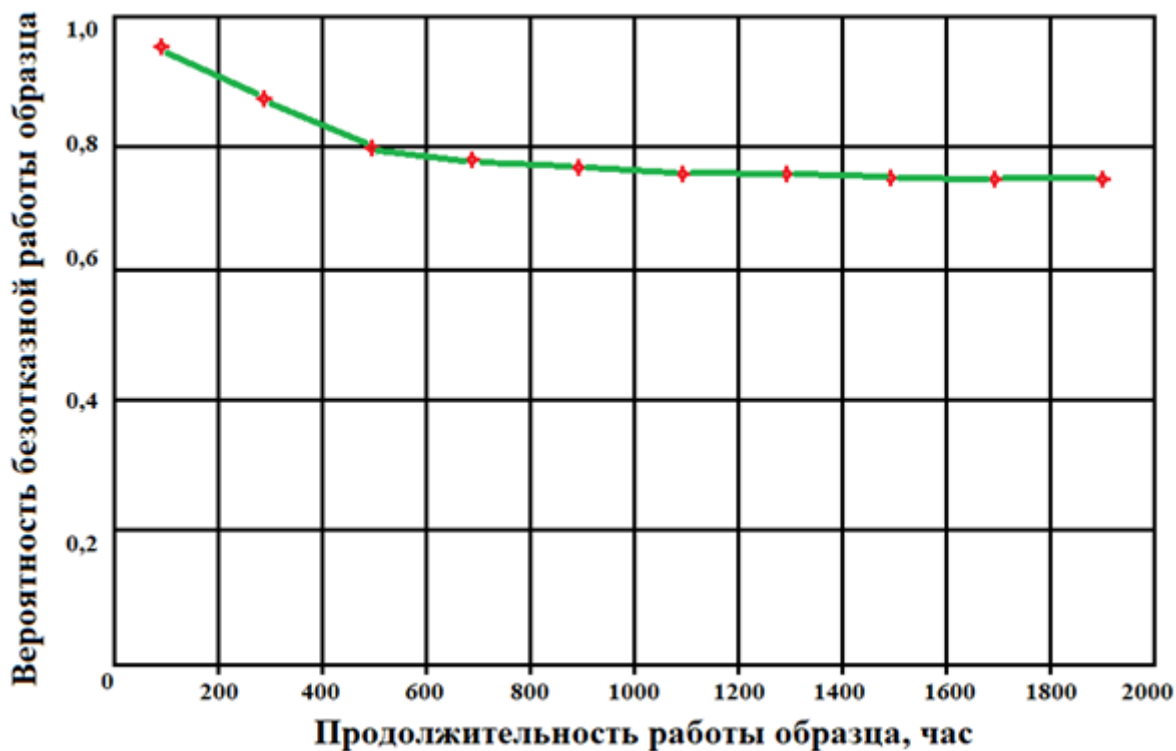


Рисунок 2.3. Зависимость вероятности безотказной работы изделия от наработки



Рисунок 2.4. Зависимость интенсивности отказов изделия от наработки

5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 5.1. На испытание поставлено 200 однотипных изделий. За 2000 ч отказало 50 изделий. За последующие 100 часов отказало ещё 5 изделий. Требуется определить:

1. статистическую оценку вероятности безотказной работы за время работы $t_1 = 2000$ час и $t_2 = 2100$ час;

2. статистическую оценку вероятности отказа за время работы $t_1 = 2000$ час и $t_2 = 2100$ час;

3. оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 2000$ час и $t_2 = 2100$ час.

Задача 5.2. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 часов работы отказало 50 изделий. Определить статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа за время работы 4000 часов.

Задача 5.3. На испытание поставлено 100 однотипных изделий. За 4000 часов работы отказало 50 изделий. За последующие 50 часов еще 5 изделий. Дать оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 4000$ час и $t_2 = 4050$ час.

Задача 5.4. В течение 500 часов работы из 20 объектов отказало 2. За интервал времени 500 – 520 часов отказал еще один объект. Дать оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 500$ час и $t_2 = 520$ час.

Задача 5.5. На испытание поставлено 2000 изделий. За первые 3000 часов отказало 80 изделий. За интервал времени 3000 – 4000 часов отказало еще 50 изделий. Требуется определить статистическую оценку вероятности безотказной работы изделий за время 4000 часов.

Задача 5.6. В течение 500 часов работы из 20 насосов отказало 2. За интервал времени 500 – 520 часов отказал еще один насос. Требуется определить статистическую оценку вероятности отказа за время 520 часов.

Задача 5.7. На испытание поставлено 600 изделий. За время 1200 часов вышло из строя 125 штук изделий. За последующий интервал времени 1200 – 1250 часов вышло из строя еще 13 изделий. Необходимо определить статистическую оценку вероятности безотказной работы и вероятности отказа за время работы $t_1 = 1200$ час и $t_2 = 1250$ час; оценку плотности распределения отказов и интенсивности отказов в промежутке времени между $t_1 = 1200$ час и $t_2 = 1250$ час.

Задача 5.8. На испытание поставлено 10 однотипных изделий. Получены следующие значения времени безотказной работы: $t_1 = 580$ час; $t_2 = 720$ час; $t_3 = 860$ час; $t_4 = 550$ час; $t_5 = 780$ час; $t_6 = 830$ час; $t_7 = 910$ час; $t_8 = 850$ час; $t_9 =$

840 час; $t_{10} = 750$ час. Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое безотказность?
2. Какие показатели надежности являются показателями безотказности?
3. Что такое вероятность безотказной работы?
4. Что такое вероятность отказа?
5. Как определяются статистические оценки вероятности безотказной работы и вероятности отказа?
6. Как определяется плотность распределения наработки?
7. Что такое интенсивность отказов?
8. Кривая зависимости интенсивности отказа во времени.
9. Дайте определение средней наработки до отказа и средней наработки до первого отказа.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вышегородцева Г. И., Агеева В. Н. Практикум по основам надежности технических систем. Методические указания к выполнению практических работ и самостоятельной работы для студентов факультета инженерной механики – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2018. – 65 с.
2. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
3. Лозовая С. Ю. Математические основы надежности горных машин и оборудования [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Лозовая С.Ю. – Электрон. текстовые данные. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2014. – 218 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/57274>.
4. Горелик, А. В. Практикум по основам теории надежности [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. В. Горелик, О. П. Ермакова. – Электрон. текстовые данные. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 133 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/26826>.

Практическая работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ОПРЕДЕЛЕННОМ ПРОМЕЖУТКЕ ВРЕМЕНИ

Цель: научить студентов определять показатели безотказности по статистическим данным на определенном промежутке.

Задачи обучения:

- ознакомить с методикой определения показателей безотказности по статистическим данным о надежности неремонтируемых объектов на определенном промежутке времени;
- привить навыки построения зависимостей показателей безотказности во времени;
- обучить давать характеристику находимых показателей безотказности.

Методы и формы обучения и преподавания: индивидуальная работа, работа; ситуационные задачи, выполнение домашних заданий.

Материально-техническое оснащение: калькулятор или компьютер с программами EXCEL или MathCAD.

1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ

На основе представленных статистических данных провести расчет и анализ показателей надежности серии невосстанавливаемых объектов на определенном промежутке времени.

Показатели безотказности определяются для каждого интервала в следующей последовательности:

1.1. Определяем количество отказавших деталей нарастающим итогом на конец каждого периода по формуле:

$$n(t_{i+1}) = n(t) + \Delta n(t) \quad (3.1)$$

Определяем количество работоспособных изделий $N(t)$ на конец каждого периода по формуле:

$$N(t) = N - n(t), \quad (3.2)$$

где $n(t)$ – количество отказавших изделий на конец рассматриваемого периода за период от 0 до t .

1.2. Определяем статистическую оценку вероятности безотказной работы на конец каждого периода по формуле:

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}. \quad (3.3)$$

1.3. Определяем статистическую оценку вероятности отказа на конец каждого периода по формуле:

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}. \quad (3.4)$$

1.4. Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов по формуле:

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N \Delta t}, \quad (3.5)$$

где $\Delta n(\Delta t)$ – количество отказавших изделий во временном интервале Δt .

1.5. Определяем значение интенсивности отказов по формуле:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t}. \quad (3.6)$$

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить методику расчёта показателей безотказности за определенный промежуток времени
2. Проанализировать условия задачи и определить исходные данные для расчета показателей безотказности
3. Найти статистическую оценку распределения вероятностей отказа $Q(t)$ и безотказной работы $R(t)$ во времени.
4. Найти изменение плотности вероятности отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по времени.
5. Результаты расчета отразить на графиках.
6. Ответить на контрольные вопросы.

3. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Исходные данные: Число изделий, поставленных на испытание, $N = 1000$ изделий. Испытания проводятся в течение 1000 часов. Каждые сто часов определялось количество отказов изделий. Результаты испытаний представлены в таблице 3.1.

Задание:

1. Найти статистическую оценку распределения вероятностей отказа $Q(t)$ и безотказной работы $R(t)$ во времени.
2. Найти изменение плотности вероятности отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по времени.
3. Результаты расчета отразить на графиках.

Пример выполнения задания

Решение:

1. Согласно условию задачи длина рассматриваемых периодов Δt равна 100 часам: $\Delta t = 100$ час.
2. В начальный период времени изделия должны находиться в работоспособном состоянии и количество отказавших изделий на время $t = 0$ равно 0, следовательно:

$$\hat{R}(0) = 1.$$

$$\hat{Q}(0) = 0.$$

3. Определяем количество работоспособных изделий на конец каждого периода по формуле (2.2):

$$N(100) = N - n(100) = 1000 - 50 = 950 \text{ шт.}$$

4. Определяем статистическую оценку вероятности безотказной работы на конец каждого периода по формуле (2.3):

$$\hat{R}(100) = 1 - \frac{n(100)}{N} = \frac{950}{1000} = 0,95.$$

5. Определяем количество отказавших деталей нарастающим итогом на конец каждого периода по формуле:

$$n(t_{i+1}) = n(t) + \Delta n(t) = 0 + 50 = 50.$$

6. Определяем статистическую оценку вероятности отказа на конец каждого периода по формуле (3.4):

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N} = \frac{50}{1000} = 0,05.$$

7. Определяем статистическую оценку плотности вероятности отказов по формуле (3.5):

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(\Delta t)}{N \Delta t}.$$

8. Определяем значение интенсивности отказов по формуле (3.6):

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t)}{[N - n(t)] \Delta t}.$$

9. Аналогично проводим расчеты для всех остальных периодов и результаты расчета для удобства сводим в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Результаты расчета статистических оценок показателей безотказности

Временной интервал Δt , час	Количество отказов за данный интервал, $\Delta n(t)$	Количество работоспособных изделий на конец периода, $N(t)$	Количество отказавших изделий на конец периода	Вероятность безотказной работы, $R(t)$	Вероятность отказа, $Q(t)$	Плотность вероятности отказов, $f(t)$	Интенсивность отказов, $\lambda(t)$
		1000					
0 – 100	50	950	50	0,95	0,05	0,0005	0,00052632
100 – 200	40	910	90	0,91	0,09	0,0004	0,00043956
200 – 300	20	890	110	0,89	0,11	0,0002	0,00022472
300 – 400	20	870	130	0,87	0,13	0,0002	0,00022989
400 – 500	10	860	140	0,86	0,14	0,0001	0,00011628
500 – 600	70	790	210	0,79	0,21	0,0007	0,00088608
600 – 700	110	680	320	0,68	0,32	0,0011	0,00161765
700 – 800	280	400	600	0,4	0,6	0,0028	0,007
800 – 900	250	150	850	0,15	0,85	0,0025	0,01666667
900 – 1000	150	0	1000	0	1	0,0015	

10. По данным расчета строим графики зависимости расчетных величин от времени (рис. 3.1, 3.2, 3.3).

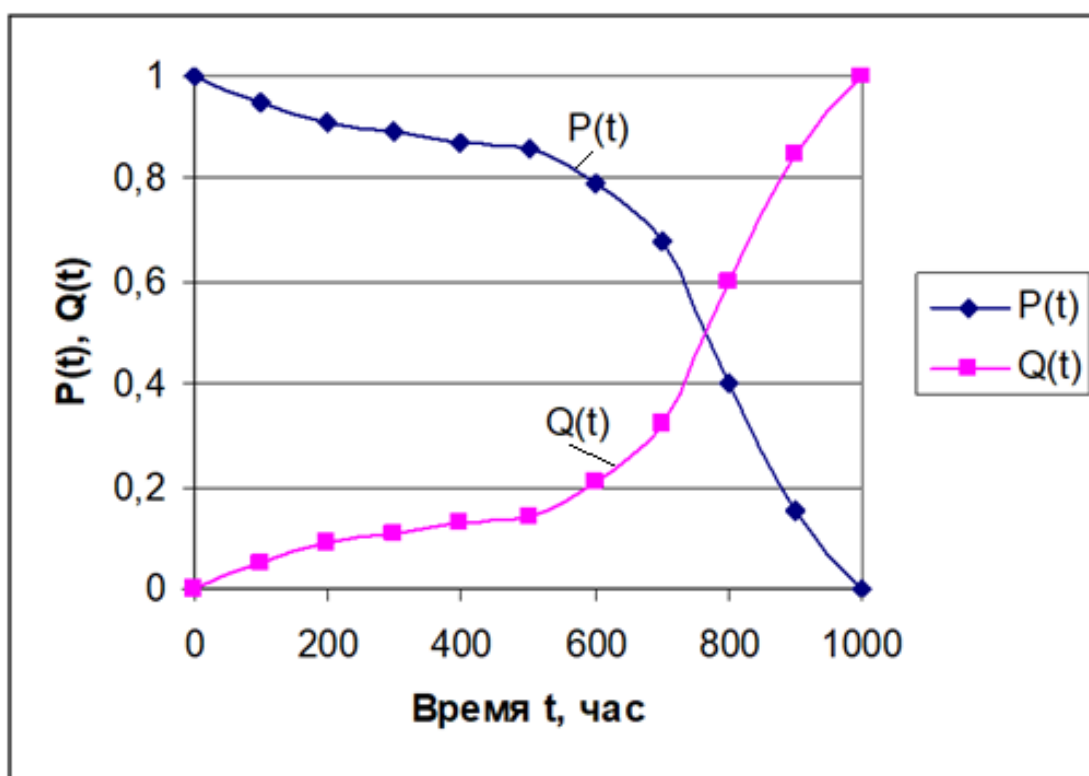


Рисунок 3.1. График зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от времени

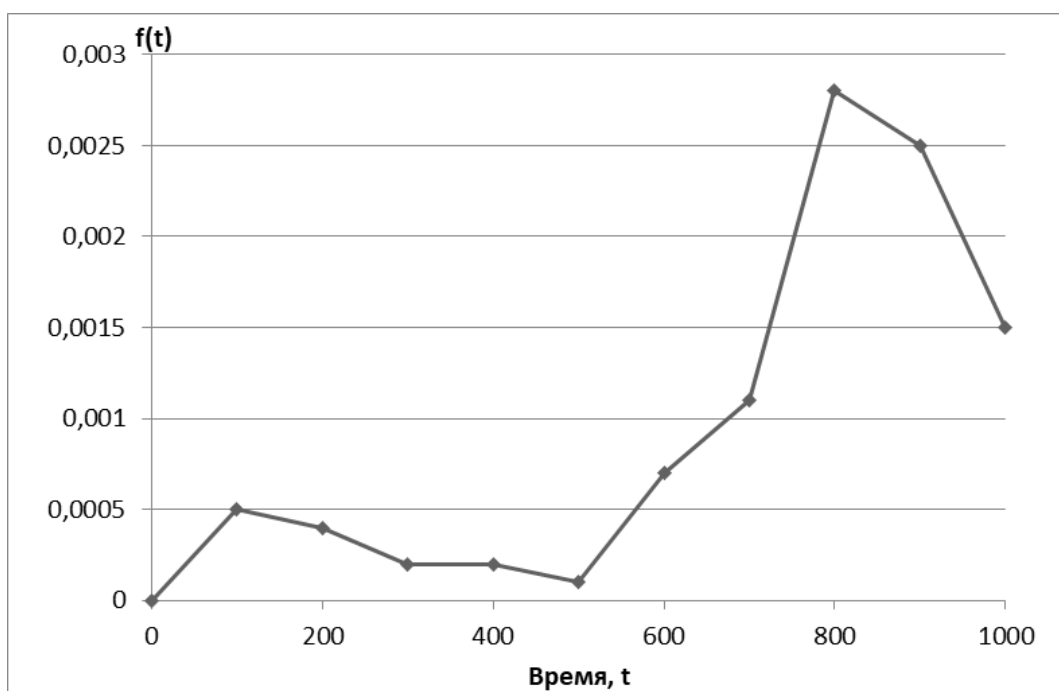


Рисунок 3.2. График зависимости плотности распределения отказов от времени

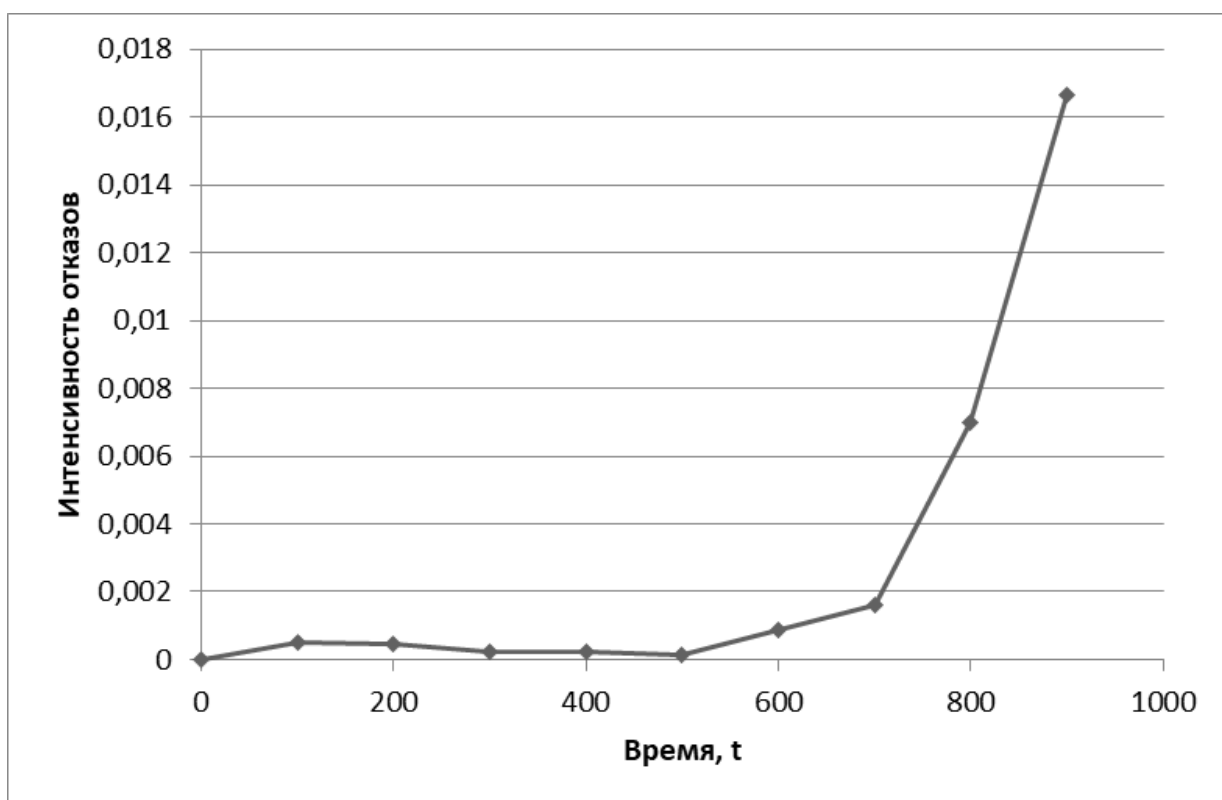


Рисунок 3.3. График зависимости интенсивности отказов от времени

4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Исходные данные: На испытание поставлено N изделий. Испытания проводятся в течение 1000 часов. Результаты испытаний представлены в таблице 3.2.

Задание:

1. Найти статистическую оценку распределения вероятностей отказа $Q(t)$ и безотказной работы $R(t)$ во времени.
2. Найти изменение плотности вероятности отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по времени.
3. Результаты расчета отразить на графиках.

Таблица 3.2. Исходные данные для выполнения контрольного задания по практической работе

Номер варианта	Общее кол-во изделий	Количество отказавших изделий за интервал времени t_i , шт.									
		0 –	100	200	300	400	500	600	700	800	900
		100	– 200	– 300	– 400	– 500	– 600	– 700	– 800	– 900	– 1000
1	3007	49	99	88	554	594	542	580	86	87	40
2	2379	68	41	37	434	501	282	471	74	77	99
3	2754	75	97	65	554	305	410	407	83	96	82
4	2415	67	56	81	346	405	442	490	57	35	60
5	2785	51	89	98	383	497	575	501	35	92	60
6	2303	63	73	94	263	261	493	484	52	64	87
7	2430	44	62	44	299	482	362	436	49	84	68
8	2337	99	44	75	299	575	411	217	36	46	55
9	2217	66	43	57	395	218	355	510	67	90	58
10	1940	61	66	71	232	376	226	305	72	37	81
11	1913	60	50	100	259	363	438	250	58	58	73
12	2511	72	84	100	377	533	374	520	75	52	44
13	2460	40	94	40	363	426	541	435	86	83	47
14	2306	35	80	37	318	575	387	493	54	35	37
15	1919	37	35	80	340	374	403	215	77	58	96
16	2406	36	45	90	590	339	392	396	90	92	55
17	2654	47	68	77	326	584	470	570	62	74	70
18	2581	83	52	93	431	303	567	345	93	81	89
19	2554	51	48	58	432	218	595	353	99	89	63
20	2626	65	99	73	591	220	550	544	47	60	88

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы свойства функции вероятности безотказной работы?
2. Каковы свойства функции вероятности отказа?
3. Каким образом определяется плотность распределения наработки во времени?
4. Характер и особенности кривой для зависимости интенсивности отказа от времени.
5. Особенности кривой плотности распределения отказов во времени.

6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вышегородцева Г. И., Агеева В. Н. Практикум по основам надежности технических систем. Методические указания к выполнению практических работ и самостоятельной работы для студентов факультета инженерной механики – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2018. – 65 с.
2. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.

Практическая работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЧНЫХ И КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель работы: научить студентов определять показатели надежности восстанавливаемых объектов по статистическим данным.

Задачи обучения:

- познакомить с методикой определения единичных и комплексных показателей по статистическим данным;
- привить навыки расчета показателей надежности;
- научить давать характеристику находимых показателей надежности.

Методы и формы обучения и преподавания: индивидуальная работа, работа в парах; ситуационные задачи.

Материально-техническое оснащение: калькулятор или компьютер с программами EXCEL или MathCAD.

1. ВВОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое может быть восстановлено потребителем, т. е. изделие, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Показатели надежности восстанавливаемых изделий характеризуют их способность выполнять заданные функции в течение определенного времени, с учетом возможности восстановления после отказов.

Основные показатели надежности восстанавливаемых объектов:

1. Средняя наработка на отказ (T_{cp}):

Среднее время работы объекта до наступления отказа.

2. Среднее время восстановления (T_v):

Среднее время, необходимое для восстановления работоспособности объекта после отказа.

3. Интенсивность отказов ($\lambda(t)$):

Вероятность отказа объекта в единицу времени при условии, что до этого момента он работал безотказно.

4. Интенсивность восстановления ($\mu(t)$):

Вероятность восстановления работоспособности объекта в единицу времени при условии, что он находится в неработоспособном состоянии.

5. Коэффициент готовности (K_r):

Вероятность того, что объект будет находиться в работоспособном состоянии в случайный момент времени.

6. Коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$):

Вероятность того, что объект будет готов к выполнению своих функций в заданный момент времени, с учетом времени на восстановление.

Дополнительные показатели, используемые для оценки надежности восстанавливаемых объектов:

7. Параметр потока отказов ($\omega(t)$):

Определяет частоту отказов в единицу времени, учитывая возможность восстановления.

8. Вероятность безотказной работы ($P(t)$):

Вероятность того, что объект не откажет за время t .

9. Вероятность восстановления ($Q(t)$):

Вероятность того, что объект будет восстановлен к моменту времени t после отказа.

Для определения показателей надежности используются различные методы, включая:

Статистический анализ данных эксплуатации:

Анализ данных о наработке на отказ и времени восстановления реальных объектов.

Математическое моделирование:

Создание математических моделей для имитации работы и отказов объектов.

Экспериментальные испытания:

Проведение испытаний для определения показателей надежности.

Анализ физико-химических процессов:

Изучение процессов, влияющих на надежность, для прогнозирования поведения объекта.

Выбор показателей и методов оценки надежности зависит от конкретного объекта, его назначения, условий эксплуатации и требований к надежности.

Единичные показатели надежности

1. Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Показателями безотказности восстанавливаемых объектов являются:

- вероятность безотказной работы;
- гамма-процентная наработка до отказа;
- средняя наработка до отказа;
- средняя наработка между отказами;
- гамма-процентная наработка между отказами;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов.

Гамма-процентная наработка между отказами – наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средняя наработка между отказами – математическое ожидание наработки объекта между отказами.

Параметр потока отказов (мгновенный) – предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к длительности этого интервала, стремящейся к нулю.

2. Долговечность – свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния.

Показателями долговечности (основными) являются:

- гамма-процентный ресурс;
- средний ресурс;
- гамма-процентный срок службы;
- средний срок службы.

Гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния, с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния, с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

3. Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Восстанавливаемость – свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.

Показателями ремонтпригодности и восстанавливаемости являются:

- вероятность восстановления;
- среднее время восстановления;
- гамма-процентное время восстановления;
- среднее время до восстановления;
- гамма-процентное время до восстановления;
- интенсивность восстановления.

Вероятность восстановления – вероятность того, что время (до) восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение. Вероятность восстановления может относиться как к времени восстановления, так и к времени до восстановления.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления.

Среднее время до восстановления – математическое ожидание времени до восстановления.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Гамма-процентное время до восстановления – длительность времени до восстановления, которая не будет превышена с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

4. Сохраняемость – свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования.

Показателями сохраняемости являются:

- гамма-процентный срок сохраняемости;
- средний срок сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Комплексные показатели надежности

Важной характеристикой изделия является понятие «готовность».

Готовность (объекта) по ГОСТ Р 27.102-2021 – это «Способность объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях, в заданный момент или период времени при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены».

Надежность объекта и готовность объекта не зависят друг от друга.

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. Показатели готовности не являются единичными показателями, так как готовность представляет собой совокупность свойств.

Комплексными показателями являются:

- коэффициент готовности;
- коэффициент оперативной готовности;
- коэффициент технического использования;
- коэффициент сохранения эффективности.

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени. При расчетах мгновенного (нестационарного) коэффициента готовности могут исключаться планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + t_{\text{восст}}^{\text{ав}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии;

$t_{\text{восст}}^{\text{ав}}$ – время восстановления объекта после аварии.

Кроме **коэффициента готовности** при анализе надежности изделий используются такие дополнительные характеристики, как:

Средний коэффициент готовности – среднее значение мгновенного коэффициента готовности за данный промежуток времени.

Стационарный коэффициент готовности – предел мгновенного коэффициента готовности при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности.

Коэффициент неготовности – вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в данный момент времени. При расчетах мгновенного (нестационарного) коэффициента неготовности могут исключаться планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.

$$K_{\text{н}} = 1 - K_{\Gamma} = \frac{t_{\text{восст}}^{\text{ав}}}{T_{\text{раб}} + t_{\text{восст}}^{\text{ав}}}.$$

Коэффициент оперативной готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} * P(t),$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта.

Коэффициент технического использования. Этот коэффициент представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период. Он характеризует долю времени пребывания объекта в работоспособном состоянии по отношению ко всему рассматриваемому календарному сроку, включающему периоды работоспособности и простоев, связанных как с плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, так и неплановыми ремонтами, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта.

$$K_{ти} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{восс}^{ав} + t_{рем}^{пл} + t_{то}^{пл}},$$

где $T_{раб}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии;

$t_{восс}^{ав}$ – время восстановления объекта после аварии;

$t_{рем}^{пл}$ – время планового ремонта (восстановления) объекта;

$t_{то}^{пл}$ – время планового технического обслуживания объекта.

Коэффициент сохранения эффективности ($K_{эф}$) по ГОСТ Р 27.102-2021 – это отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенный период эксплуатации к его номинальному значению, рассчитанному при условии отсутствия отказов за этот же период.

Соотношение для расчета $K_{эф}$ имеет вид:

$$K_{эф} = E / E_0,$$

где $K_{эф}$ – коэффициент сохранения эффективности;

E – фактическое значение показателя эффективности объекта за определенный период;

E_0 – номинальное значение показателя эффективности объекта (его значение при отсутствии отказов или деградации).

Этот коэффициент позволяет оценить, насколько хорошо изделие сохраняет свои характеристики и работоспособность в условиях эксплуатации, и может быть использован для анализа надежности и эффективности различных систем и оборудования.

При определении показателей надежности восстанавливаемых изделий используются следующие понятия, имеющие временной характер:

- наработка между отказами – наработка объекта между двумя следующими друг за другом отказами;

- ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния;

- срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния;

- срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и/или транспортирования объекта, в течение которой он сохраняет работоспособное состояние;
- время восстановления – время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по восстановлению объекта;
- время до восстановления – время от момента отказа до восстановления работоспособного состояния.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

В данной практической работе рассматриваются 5 основных характеристик надежности восстанавливаемых объектов:

- 1. Средний ресурс.**
- 2. Гамма-процентный ресурс.**
- 3. Среднее время восстановления.**
- 4. Коэффициент готовности.**
- 5. Коэффициент технического использования.**

Средний ресурс определяется по формуле:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N}, \quad (4.1)$$

где T_{pi} – ресурс i -го изделия; N – количество объектов, поставленных на испытания или эксплуатацию.

Для нахождения гамма-процентного ресурса необходимо найти такое значение суммарной наработки, вероятность которой равна γ , выраженной в процентах, исходя из условия

$$P(T_{p\gamma}) = \frac{\gamma}{100}. \quad (4.2)$$

Значения среднего срока службы и гамма-процентного срока службы определяются аналогично.

Статистическая оценка среднего времени восстановления вычисляется по формуле:

$$T_v = \frac{\sum_{i=1}^m T_{vi}}{m}, \quad (4.3)$$

где T_{vi} – время восстановления i -го изделия; m – количество восстановлений рассматриваемых объектов.

Коэффициент готовности K_r определяется по формуле:

$$K_r = \sum_{i=1}^N t_i / (\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i), \quad (4.4)$$

где t_i – наработка на отказ i -го объекта; τ_i – время восстановления i -го объекта; N – количество рассматриваемых объектов.

Коэффициент технического использования определяется по формуле:

$$K_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{восс}}^{\text{ав}} + t_{\text{рем}}^{\text{пл}} + t_{\text{то}}^{\text{пл}}}, \quad (4.5)$$

где $T_{\text{раб}}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии (суммарная наработка);

$t_{\text{восс}}^{\text{ав}}$ – время восстановления объекта после аварии (время, затраченное на внеплановые восстановления);

$t_{\text{рем}}^{\text{пл}}$ – время планового ремонта (восстановления) объекта;

$t_{\text{то}}^{\text{пл}}$ – время планового технического обслуживания объекта.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить методику расчета единичных и комплексных показателей.
2. Дать определение рассматриваемого показателя.
3. Определить исходные данные для расчета показателя.
4. Рассчитать требуемый показатель по указанным формулам.
5. Дать характеристику определяемому показателю по четырем признакам классификации.
6. Ответить на контрольные вопросы.

4. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Пример 4.1. На промышленные испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 144 отказа, у второго – 160 отказов, у третьего – 157 отказов. Суммарная наработка до предельного состояния для первого насоса составила 3250 часов, для второго – 3600 часов, для третьего – 2800 часов. Определить среднюю наработку на отказ и средний ресурс насоса.

Решение:

Средняя наработка до отказа (на отказ) для каждого насоса определяется по формуле:

$$T_{\text{ср}i} = \frac{t_{\text{сум}i}}{n_i}, \quad i = 1, 2, 3.$$

$$T_{\text{ср}1} = \frac{t_{\text{сум}1}}{n_1} = \frac{3250}{144} = 22,57;$$

$$T_{\text{ср}2} = \frac{t_{\text{сум}2}}{n_2} = \frac{3600}{160} = 22,50;$$

$$T_{\text{ср}3} = \frac{t_{\text{сум}3}}{n_3} = \frac{2800}{157} = 17,83.$$

Средняя наработка на отказ для группы из трех насосов определяется по соотношению:

$$T_{\text{ср.гр.н}} = \frac{\sum_{i=1}^3 T_{\text{ср}i}}{N}, \quad i = 1, 2, 3.$$

$$T_{\text{ср.гр.н}} = \frac{22,57 + 22,50 + 17,83}{3} = 20,97.$$

Средний ресурс определяем по формуле (4.1)

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N} = \frac{3250+3600+2800}{3} = 3216,67 \text{ час.}$$

Ответ:

Средняя наработка на отказ группы трех насосов равна $T_{\text{ср.гр.н}} = 20,97 \text{ час}$, данный показатель является:

- показателем безотказности;
- единичным, так как характеризует только одно из свойств – безотказность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- смешанным, так как характеризует надежность группы изделий.

Средний ресурс равен $T_p = 3216,7 \text{ час}$, данный показатель является:

- показателем долговечности;
- единичным, так как характеризует только одно из свойств – долговечность;
- экспериментальным, так как определяется по результатам испытаний;
- смешанным, так как характеризует надежность группы изделий.

Пример 4.2. На испытания поставлено 500 изделий. Результаты определения ресурса представлены в таблице 4.1. По данным испытаний определить гамма-процентный ресурс для $\gamma = 95 \%$, 90% и 80% .

Таблица 4.1. Результаты испытаний изделий

№	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий, n(t)
1	0 – 100	24
2	100 – 200	29
3	200 – 300	35
4	300 – 400	15
5	400 – 500	16
6	500 – 600	20
7	600 – 700	35
8	700 – 800	57
9	800 – 900	133
10	900 – 1000	136

Решение:

Для определения гамма-процентного ресурса необходимо найти значение наработки, вероятность которой равна 0,95; 0,90; 0,80, согласно формуле (4.2):

$$P(T_{py}) = \frac{\gamma}{100}.$$

Определим количество работоспособных изделий и вероятность безотказной работы на конец каждого временного интервала, результаты расчета сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2. Результаты расчета

№	Интервал времени, час	Количество отказавших изделий, n(t)	Количество работоспособных изделий, N(t), к концу периода	Вероятность безотказной работы, P(t)
1	0 – 100	24	476	0,952
2	100 – 200	29	447	0,894
3	200 – 300	35	412	0,824
4	300 – 400	15	397	0,794
5	400 – 500	16	381	0,762
6	500 – 600	20	361	0,722
7	600 – 700	35	326	0,652
8	700 – 800	57	269	0,538
9	800 – 900	133	136	0,272
10	900 – 1000	136	0	0

По представленному расчету вероятностям 0,95; 0,90 и 0,80 соответствуют значения наработки, равные 100, 200 и 400 часов, соответственно (выделены в таблице 4.2).

Ответ:

Гамма-процентные ресурсы равны $T_{p95} = 100$ часов; $T_{p90} = 200$ часов; $T_{p80} = 400$ часов, показатели являются:

- показателем долговечности;
- единичным, так как характеризует только одно из свойств – долговечность.

Пример 4.3. В результате наблюдений за работой установки получены следующие данные о времени, затраченном на смену элементов, в часах: 2,5; 1,8; 1,8; 2,6; 0,8; 1,2; 0,6; 2,0; 1,6; 3,2. Всего 10 наблюдений. Определить среднее время восстановления установки.

Решение:

Статистическая оценка среднего времени восстановления вычисляется по формуле (4.3):

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m T_{Bi}}{m} = \frac{2,5+1,8+1,8+2,6+0,8+1,2+0,6+2,0+1,6+3,2}{10} = \frac{18,1}{10} = 1,81 \text{ часа.}$$

Ответ:

Среднее время восстановления равно $T_B = 1,81$ часа, показатель является:

- показателем ремонтпригодности;

- единичным, так как характеризует только одно из свойств – ремонтпригодность.

Пример 4.4. Определить коэффициент готовности системы при среднем времени восстановления, равном 2 часа, и средней наработке на отказ, равной 100 часов.

Решение:

Среднее значение коэффициента готовности K_r вычисляют по формуле (4.4):

$$K_r = \sum_{i=1}^N t_i / (\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N \tau_i) = \frac{100}{100+2} = \frac{100}{102} = 0,984.$$

Ответ:

Коэффициент готовности равен $K_r = 0,984$, показатель является:

- показателем готовности;
- комплексным, так как характеризует безотказность, ремонтпригодность и готовность.

Пример 4.5. Определить коэффициент технического использования, если известно, что система эксплуатируется в течение 1 года, годовой фонд времени системы составляет 8760 часов. Время проведения ежегодного техосмотра составляет 20 суток, суммарное время, затраченное на ремонтные работы, составляет 20 часов.

Решение:

Коэффициент технического использования определяется по формуле (4.5):

$$K_{т.и} = \frac{T_0}{T_0 + \tau_{т.и} + \tau_p + \tau_B} = \frac{8760}{8760 + 20 \cdot 24 + 20} = 0,943.$$

Ответ:

Коэффициент технического использования равен $K_{т.и} = 0,943$, при этом показатель является:

- показателем готовности;
- комплексным, так как характеризует безотказность, ремонтпригодность и готовность.

5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 5.1. На промышленные испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммарная наработка на отказ для первого насоса составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить среднюю наработку на отказ.

Задача 5.2. На эксплуатацию поставлено 250 изделий. На моменты времени $t_1 - t_7$ зафиксировано определенное количество отказов (табл. 4.3). Остальные изделия не отказали. Определить средний ресурс.

Таблица 4.3. Исходные данные к задаче 5.2

t_i , час	50	100	150	200	250	300	350
$n(t_i)$	5	8	11	15	21	31	9

Задача 5.3. На промышленные испытания поставлено 3 насоса. В ходе испытаний у первого насоса было зафиксировано 37 отказа, у второго – 29 отказов, у третьего – 48 отказов. Суммарная наработка до отказа для первого насоса составила 3100 часов, для второго – 2200 часов, для третьего – 2700 часов. Определить средний ресурс насоса.

Задача 5.4. Длительность проведения технического обслуживания для насоса составляет 45 часов. Межремонтный цикл составляет 2335 часов. Определить коэффициент готовности насоса.

Задача 5.5. Какую длительность восстановления работоспособности должен иметь объект с межремонтным циклом 2000 часов, чтобы коэффициент готовности объекта составлял 0,95.

Задача 5.6. Определить среднее время восстановления компрессора, если на проведение 5 мелких ремонтов было затрачено 30,5 часа.

Задача 5.7. Годовое время работы одной установки составляет 3500 часов. За год проводится 4 технических обслуживания продолжительностью 65 часов каждое и 1 средний ремонт продолжительностью 360 часов. Определить коэффициент технического использования установки.

Задача 5.8. По данным задачи 5.7 определить коэффициент готовности установки.

Задача 5.9. В ходе наблюдений за работой турбины были зафиксированы отказы в следующие моменты времени: 110, 167, 284, 365, 512, 650 часов работы. Определить среднюю наработку между отказами турбины.

Задача 5.10. По данным задачи 5.9 определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа турбины за 300 и 600 часов работы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение средней наработки до отказа и средней наработки на отказ.
2. Какие показатели используются при определении долговечности?
3. Как определяются средний и гамма-процентный ресурс?
4. Как определяются средний и гамма-процентный срок службы?
5. Дайте характеристику показателям ремонтпригодности: вероятности восстановления, интенсивности восстановления, среднему времени восстановления.
6. Дайте характеристику показателям сохраняемости: среднему сроку сохраняемости, гамма-процентному сроку сохраняемости.

7. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту готовности.

8. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту оперативной готовности.

9. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту технического использования.

10. Приведите определение и дайте характеристику коэффициенту сохранения эффективности.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.

2. Определение показателей безотказности работы систем: методические указания / составитель О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 34 с.

Практическая работа № 5

ОБЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПЕРИОД НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цель работы: научить студентов определять показатели надежности объектов при экспоненциальном распределении времени безотказной работы; получить навыки определения количественных значений показателей надежности объектов.

Задачи:

- познакомить с методикой определения количественных значений показателей надежности объектов при экспоненциальном распределении времени безотказной работы;

- привить навыки определения количественных значений показателей надежности объектов при экспоненциальном распределении времени безотказной работы.

Методы и формы обучения и преподавания: индивидуальная работа, работа в парах; ситуационные задачи.

Материально-техническое оснащение: калькулятор или компьютер с программами EXCEL или MathCAD.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ. ВВОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Наблюдения за работой сложного технического объекта позволяют на основании громадного статистического материала рассматривать кривую интенсивности отказов в виде, имеющем «корытообразную» форму, представленную на рисунке 5.1.

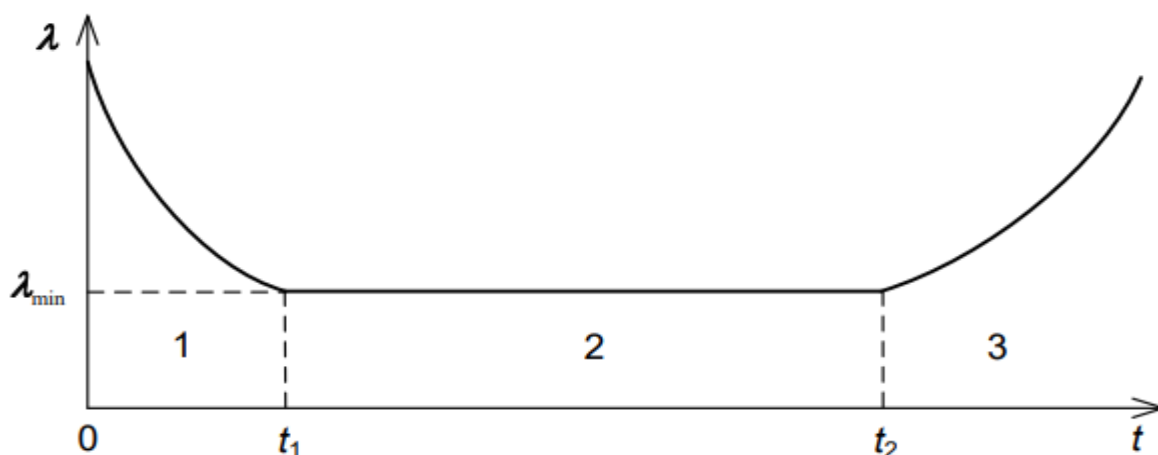


Рисунок 5.1. Кривая кинетики изменения интенсивности отказов за период эксплуатации

Сразу же после пуска механического устройства наблюдается статистически определенное количество отказов, которые обусловлены такими факторами, как наличие скрытых дефектов (несоответствие прочностных характеристик, нарушение технологии изготовления, сборки, монтажа и т. п.).

В интервале времени от 0 до t_1 (участок 1) интенсивность отказов, первоначально достаточно высокая, быстро снижается. Этот период эксплуатации называют *приработкой* или «*выжиганием слабых элементов*».

Затем наблюдается стабилизация отказов, и в течение довольно длительного времени от t_1 до t_2 отказы становятся относительно редким явлением, носят случайный характер и определяются различными случайными факторами. Участок 2 называют *периодом нормальной работы* и в этот период $\lambda = \text{const}$.

По мере дальнейшего функционирования объект накапливает различные износные отклонения (усталость, старение материала, износ, ослабление посадок и т. п.) и попадает в полосу постепенных отказов, интенсивность которых постепенно возрастает. В конечном итоге возможно наступление такого состояния, при котором отказы следуют лавинообразно. Это *период интенсивного изнашивания* (участок 3), эксплуатация в котором может быть небезопасной.

Во введении указывалось, что **безотказность** – это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение определенного времени или наработки в заданных режимах и условиях. **Отказ** – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Таким образом, **вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникает отказ объекта.

Вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от 0 до t_0 определяется из выражения:

$$P(t_0) = P(0, t_0) = P(t \geq t_0) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^{t_0} f(t) dt,$$

где $P(t_0)$ – вероятность того, что объект проработает безотказно в течение заданного времени работы t , начав работать в момент времени $t = 0$, или вероятность того, что время работы объекта до отказа окажется больше

заданного времени работы t_0 ;

$F(t)$ – функция (интегральная) распределения случайной величины (наработки) t ;

$f(t)$ – функция (дифференциальная) плотности вероятности случайной величины (наработки) t .

Вероятность отказа объекта при этом в интервале времени от 0 до t_0 :

$$Q(t_0) = Q(0, t_0) = P(t < t_0) = 1 - P(t_0) = F(t),$$

где $Q(t_0)$ – вероятность того, что объект откажет в течение заданного времени работы t_0 , начав работать в момент времени $t = 0$, или вероятность того, что время работы объекта до отказа окажется меньше заданного времени работы t_0 .

В тех случаях, когда нет необходимости подчеркивать, что вероятность безотказной работы или вероятность отказа определяются для интервала от 0 до t , эти показатели обозначаются, соответственно, через $P(t)$ и $Q(t)$.

По определению, связь между **функцией распределения $F(t)$** (интегральная функция) и **функцией плотности вероятности $f(t)$** (дифференциальная функция) связано очевидными соотношениями:

$$f(t) = \frac{dP}{dt}.$$
$$F(t) = \int f(t) dt.$$

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Интенсивность отказа вычисляется по формуле:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t).$$

Наработка до отказа t относится к общим понятиям, в то же время данное понятие может использоваться как показатель надежности единичного изделия, т. е. как индивидуальная норма надежности.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа:

$$T = \int t f(t) dt = \int P(t) dt.$$

Наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния называется *техническим ресурсом* (или *просто ресурсом*). Ресурс невосстанавливаемого объекта определяется через наработку объекта до отказа. Ресурс восстанавливаемого объекта равен сумме наработок до предельного состояния.

$$T_p = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_i + \theta_n = \sum \theta_i,$$

где θ_i – наработка объекта до 1, 2, ... n -го отказа.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Период нормальной эксплуатации характеризуется тем, что отказ в системе носит случайный и непрогнозируемый характер и, что наиболее важно, частота его наступления не зависит от времени эксплуатации и от возраста изделия, то

есть $\lambda = \text{const}$.

Вероятность безотказной работы в этот период хорошо описывается экспоненциальным законом распределения наработок.

$$\begin{aligned}P(t) &= 1 - F(t) = e^{-\lambda t}, \\Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t}, \\f(t) &= \lambda \cdot e^{-\lambda t}.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Примеры расчета показателей надежности

Задача № 1. Определить показатели безотказности изделия при наработке 500 часов и 80 %-м ресурсе изделия, если известно, что наработка изделия подчиняется экспоненциальному закону с интенсивностью отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

Решение:

1. Определяем вероятность безотказной работы для наработки 500 часов:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,0005 \times 500} = e^{-0,25} = 0,7788.$$

2. Определяем вероятность отказа при наработке 500 часов:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - 0,7788 = 0,2212.$$

3. Определяем среднюю наработку до отказа изделия:

$$T = 1 / \lambda = 1 / 5 \cdot 10^{-4} = 2000 \text{ часов}.$$

4. Определяем 80 %-й ресурс изделия:

$$\begin{aligned}P(t) &= e^{-\lambda t} = 0,8, \\-\lambda t &= \ln 0,8, \\t_{80} &= -(\ln 0,8 / \lambda) = -(-0,223 / 0,0005) = 446 \text{ часов}.\end{aligned}$$

Задача № 2. Определить показатели безотказности невосстанавливаемого изделия при наработке 1000 часов, если известно, что наработка изделия подчиняется экспоненциальному закону, а 80 %-й ресурс изделия соответствует наработке в 500 часов. Установить технический ресурс изделия.

Решение:

1. Определяем интенсивность отказов изделия.

$$\begin{aligned}P(t) &= e^{-\lambda t} = 0,8, \\-\lambda 500 &= \ln 0,8, \\\lambda &= -(-0,223 / 500) = 0,00045.\end{aligned}$$

2. Определяем среднее время безотказной работы:

$$\begin{aligned}T &= 1 / \lambda, \\T &= 1 / 0,00045 = 2222,2 \text{ час}.\end{aligned}$$

3. Определяем технический ресурс изделия.

Так как изделие – невосстанавливаемое, то технический ресурс равен среднему времени безотказной работы

$$T_p = T = 2222,2 \text{ час.}$$

4. Определяем вероятность отказа изделия при наработке 1000 ч.:

$$Q(t_0) = Q(0, t_0) = P(t < t_0) = 1 - P(t_0) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

$$Q(t_0) = 1 - e^{-\lambda \times 1000} = 1 - e^{-0,00045 \times 1000} = 1 - 0,6376 = 0,3624.$$

Задача № 3. Определить показатели безотказности невосстанавливаемого изделия при наработке 500 ч и 50 %-м ресурсе изделия, если известно, что наработка изделия подчиняется экспоненциальному закону со средней наработкой до отказа 2000 ч.

Решение:

1. Определяем интенсивность отказов изделия:

$$\lambda = 1 / T. \quad \lambda = 1 / 2000 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}.$$

2. Определяем вероятность безотказной работы для наработки 500 ч.:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad P(t) = e^{-0,0005 \times 500} = e^{-0,25} = 0,7788.$$

3. Определяем вероятность отказа при наработке 500 ч.:

$$Q(t_0) = Q(0, t_0) = P(t < t_0) = 1 - P(t_0).$$

$$Q(t_0) = 1 - 0,7788 = 0,2212.$$

4. Определяем 50 %-й ресурс изделия:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = 0,5;$$

$$-\lambda \cdot t = \ln 0,5,$$

$$t = -(\ln 0,5 / \lambda). \quad t = -(-0,693 / 0,0005) = 1386,3 \text{ ч.}$$

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Варианты исходных данных для решения задач на практическом занятии выбираются согласно последней цифре номера зачетной книжки по таблице 3.1.

Таблица 3.1. Исходные данные по вариантам

Показатель	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Задача № 1										
t	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
λ	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
$P(t)$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Задача № 2										
t_0	800	900	1000	1100	1200	800	900	1000	1100	1200
t	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$P(t)$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Задача № 3										
t	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$P(t)$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
T	3000	3000	3000	3000	3000	4000	4000	4000	4000	4000

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразите график изменения интенсивности отказов на этапе эксплуатации изделия.
2. Чем характерен период нормальной эксплуатации изделия?
3. Что такое функция плотности вероятности?
4. Что такое функция распределения, какова ее связь с функцией плотности вероятности?
5. Чем характерен экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы изделия?
6. К каким изделиям применимо понятие «интенсивность отказов»?
7. Что такое «ресурс» изделия?
8. Что такое «гамма-процентный ресурс» изделия?

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
2. Определение показателей безотказности работы систем: методические указания / составитель О. А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 34 с.

Практическая работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Цель: научить студентов определять показатели надежности, которые подчиняются различным законам распределения.

Задачи обучения:

- познакомить с методикой определения единичных и комплексных показателей по статистическим данным для закона нормального распределения, экспоненциального закона и закона Вейбулла;
- привить навыки расчета показателей надежности при различных законах распределения.

Методы и формы обучения и преподавания: индивидуальная работа, работа в парах, ситуационные задачи.

Материально-техническое оснащение: калькулятор или компьютер с программами EXCEL или MathCAD.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

При решении задач надежности могут использоваться следующие основные законы распределения: нормальный закон распределения, экспоненциальный закон распределения, распределение Вейбулла.

Нормальный закон распределения наиболее универсальный, так как он является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения при часто встречающихся типичных условиях.

Большие возможности в использовании нормального закона распределения раскрываются в соответствии с общеизвестной «Центральной предельной теоремой» теории вероятностей, утверждающей, что сумма достаточно большого количества (12–30) независимых случайных факторов, воздействующих на процесс и не подчиняющихся нормальному закону распределения, в итоге дает распределение, близкое к нормальному.

Нормальному закону распределения подчиняется ряд показателей надежности – суммарная наработка восстанавливаемых изделий до капитального ремонта, время восстановления ремонтируемых изделий и т. п. Для многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий наработка на отказ подчиняется нормальному закону.

Закон нормального распределения используется для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы в начале имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается, т. е. нормальным распределением описывают наработки на отказ элементов и систем вследствие их износа и старения.

Закон экспоненциального распределения случайных величин широко применяется при расчетах надежности элементов электроники. Этот закон описывает надежность работы изделия в период его нормальной эксплуатации, для случая, когда интенсивность отказа – величина постоянная, постепенные отказы еще не проявляются и надежность характеризуется внезапными отказами. Отказы вследствие законов старения (коррозии, усталости, изнашивания) не являются внезапными, поэтому данный закон распределения в этом случае применять не рекомендуется.

Экспоненциальным распределением можно описывать время безотказной работы различных изделий: сложных технических систем, эксплуатируемых в период приработки и до появления постепенных отказов; с большим числом последовательно соединенных элементов, если каждый из элементов в отдельности не оказывает влияния на отказы других элементов системы.

В теории надежности используется для описания наработки до отказа и наработки на отказ деталей и узлов в период наступления усталости материала, отказов вследствие изнашивания, отказов подшипников качения и наработки между отказами сложных технических систем, а также процессов восстановления.

В большинстве случаев данное распределение описывает наработку системы с резервированием, время восстановления, а также распределение отказов вследствие износа.

Распределение Вейбулла наиболее широко используется при определении надежности механических систем по результатам эксплуатации или испытаний. Используется при описании усталостной прочности стали, а значит, может быть использовано и для описания изнашивания вследствие многоциклового фрикционной усталости поверхностных слоев деталей машин. Данное распределение является двухпараметрическим универсальным, так как при вариативном изменении параметров оно в пределе может описывать процессы нормального, логарифмически нормального, экспоненциального и других законов распределений.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Непрерывная случайная величина X имеет нормальный закон распределения (закон Гаусса) с параметрами a и σ^2 , если ее плотность вероятности определяется зависимостью:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6.1)$$

где a – математическое ожидание случайной величины $M(X)$;

σ^2 – дисперсия $D(X)$ случайной величины.

Математическое ожидание случайной величины при нормальном законе распределения

$$M(X) = \int x f(x) dx = \int x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (6.2)$$

Дисперсия случайной величины X

$$D(X) = \int (x-a)^2 f(x) dx = \int (x-a)^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (6.3)$$

Функция распределения случайной величины X при нормальном законе определяется по формуле:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (6.4)$$

Данный интеграл в классе элементарных функций не вычисляется, его можно выразить через функцию Лапласа $\Phi(x)$ по формуле:

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right), \quad (6.5)$$

где $\Phi\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)$ – функция Лапласа, вычисляемая по специальным таблицам (Приложение 1):

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (6.6)$$

Заменяя случайную величину X на время $t \geq 0$, вероятность отказа и вероятность безотказной работы можно определить по формулам:

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t-M(X)}{\sigma}\right), \quad (6.7)$$

$$R(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-M(X)}{\sigma}\right). \quad (6.8)$$

Здесь знак $R(t)$ введен для обозначения понятия «вероятности безотказной работы» вместо традиционного $P(t)$ с целью исключения двусмысленности, так как в литературе знаком $P(t)$ обозначается, как правило, общее понятие «вероятности».

Аргумент функции Лапласа $\left(\frac{t-M(X)}{\sigma}\right) = Up$ называют квантилем (квантилью) распределения. Квантиль нормированного нормального распределения, обозначаемая (обозначаемый) как U_p , является значением, при котором вероятность того, что случайная величина из стандартного нормального распределения будет меньше или равна этому значению, равна p . Другими словами, это решение уравнения $\Phi(U_p) = p$, где $\Phi(x)$ – это функция стандартного нормального распределения. Таким образом, «квантиль» – это такое значение, которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью.

Вероятность попадания случайной величины в заданный интервал $[t_1, t_2]$ составит:

$$R(t_1 \leq t \leq t_2) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{t_1 - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t_2 - a}{\sigma}\right) \right]. \quad (6.9)$$

Непрерывная случайная величина X имеет показательный (экспоненциальный) закон распределения с параметром $\lambda > 0$ с плотностью вероятности

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0 \quad (6.10)$$

Функция распределения случайной величины X , распределенной по показательному (экспоненциальному) закону определяется по формулам:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x \geq 0 \quad (6.11)$$

Математическое ожидание

$$M(X) = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.12)$$

Дисперсия

$$D(X) = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (6.13)$$

Для экспоненциального распределения математическое ожидание случайной величины равно среднему квадратическому отклонению

$$M(X) = \sigma_x = \frac{1}{\lambda} \quad (6.14)$$

Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения **Вейбулла** и гамма-распределения.

Вероятность безотказной работы и отказа в обобщенном виде определяются по формуле:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t}, \quad (6.15)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda dt} = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (6.16)$$

Плотность распределения при распределении Вейбулла выражается зависимостью

$$f(x) = \alpha \lambda x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}, \quad (6.17)$$

где α – параметр формы кривой распределения; λ – параметр масштаба.

При $\alpha = 1$ экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла.

Интегральная функция распределения для закона Вейбулла

$$F(x) = 1 - e^{(-\lambda t^\alpha)}. \quad (6.18)$$

Математическое ожидание

$$M(x) = \frac{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})}{\lambda^{\frac{1}{\alpha}}}, \quad (6.19)$$

и среднее квадратическое отклонение, соответственно

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - \Gamma(1+\frac{1}{\alpha})^2}{\lambda^{\frac{2}{\alpha}}}} \quad (6.20)$$

где Γ – гамма-функция.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить методику расчета показателей надежности, подчиняющихся основным законам распределения.
2. Определить исходные данные для расчета показателя и закон распределения случайной величины.
3. Рассчитать требуемый показатель по формулам (6.1) - (6.20).
4. Ответить на контрольные вопросы.

4. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Пример 4.1. По результатам наблюдений за работой изделия средняя наработка на отказ равна 2000 часов, среднее квадратическое отклонение 400 часов. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа для значения наработок 1000, 2500 и 3000 часов, закон распределения отказов – нормальный.

Решение: Определяем значение квантиля (квантили) нормированного нормального распределения U_p по формуле (6.5) и соответствующей ей функции Лапласа в соответствии таблицей 4.1.

Для наработки 1000 часов квантиль и функция нормированного нормального распределения, соответственно.

$$U_p = \frac{t - M_t}{\sigma_t} = \frac{1000 - 2000}{400} = -2,5; \quad \Phi(U_p) = \Phi(-2,5) = -0,4938.$$

Для наработки 2500 часов:

$$U_p = \frac{t - M_t}{\sigma_t} = \frac{2500 - 2000}{400} = 1,25; \quad \Phi(U_p) = \Phi(1,25) = 0,3944.$$

Для наработки 3000 часов:

$$U_p = \frac{t - M_t}{\sigma_t} = \frac{3000 - 2000}{400} = 2,5; \quad \Phi(U_p) = \Phi(2,5) = 0,4938.$$

Вероятность безотказной работы для показателей, подчиняемых закону нормального распределения, определяем по формуле (6.8):

$$R(t) = 0,5 - \Phi(U_p) = 0,5 + 0,4938 = 0,9938 \text{ – при наработке 1000 часов;}$$

$$R(t) = 0,5 - \Phi(U_p) = 0,5 - 0,3944 = 0,1056 \text{ – при наработке 2500 часов;}$$

$$R(t) = 0,5 - \Phi(U_p) = 0,5 - 0,4938 = 0,0062 \text{ – при наработке 3000 часов.}$$

Вероятность отказа определяем по формуле (6.7):

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(U_p) = 0,5 - 0,4938 = 0,062 \text{ – при наработке 1000 часов;}$$

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(U_p) = 0,5 + 0,3944 = 0,8944 \text{ – при наработке 2500 часов;}$$

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(U_p) = 0,5 + 0,4938 = 0,9938 \text{ – при наработке 3000 часов.}$$

Ответ: при наработке 1000 часов: $R(1000) = 0,9938$; $Q(1000) = 0,062$; при наработке 2500 часов: $R(2500) = 0,1056$; $Q(2500) = 0,8944$; при наработке 3000 часов $R(3000) = 0,0062$; $Q(3000) = 0,9938$.

Пример 4.2. На испытания установлено 100 изделий. Средняя наработка на отказ составила 600 часов, коэффициент вариации ресурса 0,1. Определить количество отказавших изделий при наработке 720 часов.

Решение. Так как коэффициент вариации равен 0,1 – закон распределения наработки нормальный.

Находим среднее квадратичное отклонение, выразив его из формулы

$$v_x = \frac{\sigma_x}{M_x},$$

$$\sigma_x = v_x \cdot M_x = 0,1 \cdot 600 = 60$$

Для наработки 720 часов квантиль и функция Лапласа, соответственно, равны:

$$U_p = \frac{t - M_t}{\sigma_t} = \frac{720 - 600}{60} = 2,0; \quad \Phi(U_p) = \Phi(2,0) = 0,4772.$$

Вероятность отказа при наработке 720 часов определяем по формуле (6.7):

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(U_p) = 0,5 + 0,4772 = 0,9772.$$

Количество отказов при наработке 720 часов равно

$$n(t) = Q(t) \cdot N = 0,9772 \cdot 600 = 586,32 \approx 587 \text{ изд.}$$

Ответ: 587 изделий.

Пример 4.3. Нарботка на отказ испытываемого изделия подчиняется экспоненциальному закону распределения. Интенсивность отказа системы равна $\lambda = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Определить вероятность безотказной работы за время 100 часов работы и среднюю наработку на отказ рассматриваемого изделия.

Решение: Вероятность безотказной работы определяется по формуле (6.15):

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 0,9955.$$

Математическое ожидание средней наработки на отказ определяем по формуле (6.12):

$$M_t = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-5}} = 22222,2 \text{ час.}$$

Ответ: $P(t) = 0,9955$; $M_t = 22222,2 \text{ час.}$

Таблица 4.1. Таблица значений интегральной функции Лапласа

x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)
0,00	0,0000	0,50	0,1915	1,00	0,3413	1,50	0,4332	2,00	0,4772	3,00	0,49865
0,01	0,0040	0,51	0,1950	1,01	0,3438	1,51	0,4345	2,02	0,4783	3,20	0,49931
0,02	0,0080	0,52	0,1985	1,02	0,3461	1,52	0,4357	2,04	0,4793	3,40	0,49966
0,03	0,0120	0,53	0,2019	1,03	0,3485	1,53	0,4370	2,06	0,4803	3,60	0,49984
0,04	0,0160	0,54	0,2054	1,04	0,3508	1,54	0,4382	2,08	0,4812	3,80	0,49992
0,05	0,0199	0,55	0,2088	1,05	0,3531	1,55	0,4394	2,10	0,4821	4,00	0,49996
0,06	0,0239	0,56	0,2123	1,06	0,3554	1,56	0,4406	2,12	0,4830	4,50	0,49999
0,07	0,0279	0,57	0,2157	1,07	0,3577	1,57	0,4418	2,14	0,4838	5,00	0,49999
0,08	0,0319	0,58	0,2190	1,08	0,3599	1,58	0,4429	2,16	0,4846		
0,09	0,0359	0,59	0,2224	1,09	0,3621	1,59	0,4441	2,18	0,4854		
0,10	0,0398	0,60	0,2257	1,10	0,3643	1,60	0,4452	2,20	0,4861		
0,11	0,0438	0,61	0,2291	1,11	0,3665	1,61	0,4463	2,22	0,4868		
0,12	0,0478	0,62	0,2324	1,12	0,3686	1,62	0,4474	2,24	0,4875		
0,13	0,0517	0,63	0,2357	1,13	0,3708	1,63	0,4484	2,26	0,4881		
0,14	0,0557	0,64	0,2389	1,14	0,3729	1,64	0,4495	2,28	0,4887		
0,15	0,0596	0,65	0,2422	1,15	0,3749	1,65	0,4505	2,30	0,4893		
0,16	0,0636	0,66	0,2454	1,16	0,3770	1,66	0,4515	2,32	0,4898		
0,17	0,0675	0,67	0,2486	1,17	0,3790	1,67	0,4525	2,34	0,4904		
0,18	0,0714	0,68	0,2517	1,18	0,3810	1,68	0,4535	2,36	0,4909		
0,19	0,0753	0,69	0,2549	1,19	0,3830	1,69	0,4545	2,38	0,4913		
0,20	0,0793	0,70	0,2580	1,20	0,3849	1,70	0,4554	2,40	0,4918		
0,21	0,0832	0,71	0,2611	1,21	0,3869	1,71	0,4564	2,42	0,4922		
0,22	0,0871	0,72	0,2642	1,22	0,3883	1,72	0,4573	2,44	0,4927		
0,23	0,0910	0,73	0,2673	1,23	0,3907	1,73	0,4582	2,46	0,4931		
0,24	0,0948	0,74	0,2703	1,24	0,3925	1,74	0,4591	2,48	0,4934		
0,25	0,0987	0,75	0,2734	1,25	0,3944	1,75	0,4599	2,50	0,4938		
0,26	0,1026	0,76	0,2764	1,26	0,3962	1,76	0,4608	2,52	0,4941		
0,27	0,1064	0,77	0,2794	1,27	0,3980	1,77	0,4616	2,54	0,4945		

0,28	0,1103	0,78	0,2823	1,28	0,3997	1,78	0,4625	2,56	0,4948		
0,29	0,1141	0,79	0,2852	1,29	0,4015	1,79	0,4633	2,58	0,4951		
0,30	0,1179	0,80	0,2881	1,30	0,4032	1,80	0,4641	2,60	0,4953		
0,31	0,1217	0,81	0,2910	1,31	0,4049	1,81	0,4649	2,62	0,4956		
0,32	0,1255	0,82	0,2939	1,32	0,4066	1,82	0,4656	2,64	0,4959		
0,33	0,1293	0,83	0,2967	1,33	0,4082	1,83	0,4664	2,66	0,4961		
0,34	0,1331	0,84	0,2995	1,34	0,4099	1,84	0,4671	2,68	0,4963		
0,35	0,1368	0,85	0,3023	1,35	0,4115	1,85	0,4678	2,70	0,4965		
0,36	0,1406	0,86	0,3051	1,36	0,4131	1,86	0,4686	2,72	0,4967		
0,37	0,1443	0,87	0,3078	1,37	0,4147	1,87	0,4693	2,74	0,4969		
0,38	0,1480	0,88	0,3106	1,38	0,4162	1,88	0,4699	2,76	0,4971		
0,39	0,1517	0,89	0,3133	1,39	0,4177	1,89	0,4706	2,78	0,4973		
0,40	0,1554	0,90	0,3159	1,40	0,4192	1,90	0,4713	2,80	0,4974		
0,41	0,1591	0,91	0,3186	1,41	0,4207	1,91	0,4719	2,82	0,4976		
0,42	0,1628	0,92	0,3212	1,42	0,4222	1,92	0,4726	2,84	0,4977		
0,43	0,1664	0,93	0,3238	1,43	0,4236	1,93	0,4732	2,86	0,4979		
0,44	0,1700	0,94	0,3264	1,44	0,4251	1,94	0,4738	2,88	0,4980		
0,45	0,1736	0,95	0,3289	1,45	0,4265	1,95	0,4744	2,90	0,4981		
0,46	0,1772	0,96	0,3315	1,46	0,4279	1,96	0,4750	2,92	0,4982		
0,47	0,1808	0,97	0,3340	1,47	0,4292	1,97	0,4756	2,94	0,4984		
0,48	0,1844	0,98	0,3365	1,48	0,4306	1,98	0,4761	2,96	0,4985		
0,49	0,1879	0,99	0,3389	1,49	0,4319	1,99	0,4767	2,98	0,4986		

5. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 5.1. По результатам наблюдений за работой объекта средняя наработка до отказа равна 2000 часов, среднеквадратическое отклонение 400 часов. Определить значения наработок до отказа, которые соответствуют вероятности отказа 0,9; 0,5; 0,005. Закон распределения отказов – нормальный.

Задача 5.2. Предельно допустимое значение ресурса составляет 7000 часов, среднее квадратическое отклонение 1000 часов. Определить средний ресурс, вероятность отказа и вероятность безотказной работы при 5000 часах.

Задача 5.3. В результате изучения процесса изнашивания роторного элемента установлено, что средняя величина износа соответствует 5 мм, дисперсия 0,01 мм². Какова вероятность того, что найденное значение износа превышает среднее, не более чем на 5 %.

Задача 5.4. Средняя наработка на отказ соответствует 1500 часам, коэффициент вариации 0,3. Определить показатели надежности для наработок 1000 часов, 2000 часов, 3000 часов.

Задача 5.5. Среднее квадратическое отклонение ресурса равно 400 часам, коэффициент вариации 0,3. Определить показатели надежности для наработок 1000 часов, 2000 часов, 3000 часов.

Задача 5.6. На испытания установлено 200 задвижек. Через 1000 часов работы отказало 50 задвижек, через 2000 часов еще 20 задвижек. Определить количество отказавших задвижек в промежутке времени от 1500 часов до 3000 часов работы, если среднее квадратическое отклонение ресурса 500 часов.

Задача 5.7. На испытания установлено 100 изделий. Через 150 часов работы отказало 50 изделий, через 50 часов еще 2 изделия. Определить количество отказавших изделий в промежутке времени от 200 часов до 250 часов работы, если коэффициент вариации ресурса 0,1.

Задача 5.8. Минимальная наработка на отказ составляет 3000 часов, средняя наработка 1200 часов. Определить количество отказавших изделий при наработке 9000 часов и характеристики надежности.

Задача 5.9. Определить вероятность отказа изделия при наработке 1500 часов, если коэффициент вариации равен 0,2, нижнее предельно-допустимое значение наработки составляет 2000 часов.

Задача 5.10. Предельно допустимое значение наработки на отказ составляет 1600 часов, максимальное значение 2000 часов. Определить вероятность отказа при наработке 1200 часов и характеристики данного распределения.

Задача 5.11. Нарботка до отказа изделия подчиняется закону Вейбулла с параметрами $\alpha = 1,5$ и $\lambda = 10^{-4}$ 1/час. Определить количественные характеристики надежности изделия за время работы изделия 100 час.

Задача 5.12. Вероятность безотказной работы автоматической линии изготовления штоков насоса в течение 120 часов равна 0,95. Определить интенсивность отказов линии для момента времени 120 часов и среднее время безотказной работы. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности.

Задача 5.13. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно 640 час. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение 120 часов, частоту отказов для момента времени 120 часов и интенсивность отказов.

Задача 5.14. Время исправной работы скоростных шарикоподшипников подчинено закону Вейбулла с параметрами $\alpha = 2,6$; $\lambda = 1,65 \cdot 10^{-7}$ 1/час. Требуется вычислить количественные характеристики надежности для времени 150 часов и среднее время безотказной работы шарикоподшипников.

Задача 5.15. Определить вероятность безотказной работы и интенсивность отказов объекта при $t = 1300$ часов работы, если при испытаниях получено значение среднего времени безотказной работы $M_t = 1500$ часов и среднее квадратическое отклонение $\sigma_t = 100$ час.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой закон распределения случайной величины?
2. Для расчета каких показателей и технических систем применяется нормальный закон распределения?
3. Расчет показателей надежности, подчиняющихся нормальному закону распределения.
4. Для расчета каких показателей и технических систем применяется экспоненциальный закон распределения?
5. Расчет показателей надежности, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения.
6. Для расчета каких показателей и технических систем применяется закон распределения Вейбулла?
7. Расчет показателей надежности, подчиняющихся закону распределения Вейбулла.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
2. Вышегородцева Г. И., Агеева В. Н. Практикум по основам надежности технических систем: методические указания к выполнению практических работ и самостоятельной работы для студентов факультета инженерной механики – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2018. – 65 с.

Практическая работа № 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель работы: научить студентов определять комплексные показатели надежности по статистическим данным.

Задачи обучения:

- познакомить с методикой определения комплексных показателей по статистическим данным;
- привить навыки расчета комплексных показателей надежности при различных законах распределения.

Методы и формы обучения и преподавания: индивидуальная работа, работа в парах; ситуационные задачи.

Материально-техническое оснащение: калькулятор или компьютер с программами EXCEL или MathCAD.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Кроме единичных показателей надежности, таких как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, существует несколько показателей, которые отражают суммарные, интегральные, комплексные характеристики надежности восстанавливаемых элементов и систем. Основные из них это **коэффициент готовности объекта, коэффициент оперативной готовности и коэффициент технического использования объекта.**

1.1. Коэффициент готовности объекта (K_r)

Это комплексный показатель надежности, характеризующий готовность объекта к работе в интервале времени между плановыми остановами объекта, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, например, остановами объекта на плановый ремонт, модернизацию, вывод в консервацию.

Коэффициент готовности K_r представляет собой вероятность, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта не предусматривается.

1.2. Коэффициент оперативной готовности ($K_{ог}$)

Это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

1.3. Коэффициент технического использования объекта ($K_{ти}$)

Этот коэффициент представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период. Он характеризует долю времени пребывания объекта в работоспособном состоянии по отношению ко всему рассматриваемому календарному сроку, включающему периоды работоспособности и простоев, связанных как с плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, так и неплановыми ремонтами, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта.

1.4. Коэффициент ремонта (K_p)

Для некоторых видов техники применяют такой показатель, как коэффициент ремонта. Это показатель, отражающий эффективность процессов ремонта и восстановления системы после отказа. Он показывает, насколько быстро система возвращается в рабочее состояние.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Для количественной оценки комплексных показателей надежности восстанавливаемых объектов используется следующий математический инструментарий.

2.1. Из определения понятия коэффициента готовности следует соотношение:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + t_{\text{восс}}^{\text{ав}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии;
 $t_{\text{восс}}^{\text{ав}}$ – время восстановления объекта после отказа, аварии.

2.2. Из вероятностного определения коэффициента оперативной готовности следует, что

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} * P(t),$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта.

2.3. Так как коэффициент технического использования представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных временем восстановления после отказа, плановым техническим обслуживанием и плановым ремонтом за тот же период, то его аналитическое выражение можно записать в виде соотношения:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + t_{\text{восс}}^{\text{ав}} + t_{\text{рем}}^{\text{пл}} + t_{\text{то}}^{\text{пл}}},$$

где $T_{\text{раб}}$ – время нахождения объекта в работоспособном состоянии;
 $t_{\text{восс}}^{\text{ав}}$ – время восстановления объекта после аварии;
 $t_{\text{рем}}^{\text{пл}}$ – время планового ремонта (восстановления) объекта;
 $t_{\text{то}}^{\text{пл}}$ – время планового технического обслуживания объекта.

2.4. Коэффициент ремонта – это показатель, характеризующий скорость восстановления изделия после отказа (то есть степень ремонтпригодности), его математическая запись имеет следующий вид:

$$K_{\text{рем}} = T_{\text{рем}} / T_{\text{раб}}$$

Примеры расчета комплексных показателей надежности

Задача № 1

1. Условия задачи

За наблюдаемый период двигатель отказал 3 раза. При этом первая наработка до отказа составила «А» = 300 часов, вторая «Б» = 350 часов и третья

«В» = 650 часов. Первый внеплановый ремонт потребовал «а» = 7, второй «б» = 9 и третий «в» = 16 часов. Суммарное время простоев на 10 % больше времени ремонта. Необходимо определить коэффициент готовности K_r , коэффициент технического использования $K_{т.и}$, коэффициент ремонта $K_{рем}$.

2. Пример выполнения (вариант 26)

2.1. Определить среднюю наработку на отказ

$$\bar{t} = (300 + 350 + 650) / 3 = 433,3 \text{ час.}$$

2.2. Определить среднее время восстановления

$$\widehat{t_{\text{восс}}^{\text{аб}}} = (7 + 9 + 16) / 3 = 10,67 \text{ час.}$$

2.3. Определить коэффициент готовности

$$K_r = \frac{\bar{t}}{\bar{t} + \widehat{t_{\text{восс}}^{\text{аб}}}} = 433,3 / (433,3 + 10,67) = 0,976.$$

2.4. Определить суммарную наработку на отказ

$$T_{\text{раб}} = 300 + 350 + 650 = 1300 \text{ час.}$$

2.5. Определить суммарную продолжительность простоев на техническое обслуживание и ремонты

$$T_{\text{рем}} = \widehat{t_{\text{восс}}^{\text{аб}}} \cdot 1,1 = 10,67 \cdot 1,1 = 11,74 \text{ час.}$$

2.6. Определить коэффициент технического использования

$$K_{т.и} = T_{\text{раб}} / (T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}}) = 1300 / (1300 + 11,74) = 0,991.$$

2.7. Определить коэффициент ремонта

$$K_{\text{рем}} = T_{\text{рем}} / T_{\text{раб}} = 11,74 / 1300 = 0,009.$$

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Варианты исходных данных для выполнения индивидуального задания приведены в таблице 3.1 и выбираются в соответствии с порядковым номером студента в списке группы.

Таблица 3.1. Исходные данные для выполнения индивидуального задания

№ п/п	Наработка до отказа			Длительность ремонта			№ п/п	Наработка до отказа			Длительность ремонта		
	А	Б	В	а	б	в		А	Б	В	а	б	в
1	400	600	800	5	10	15	14	300	500	700	6	9	10
2				4	9	14	15				4	8	13
3				3	8	13	16				5	7	11
4				2	7	12	17				7	9	16
5				1	6	11	18	200	350	650	5	10	15
6				6	9	10	19				4	9	14
7				4	8	13	20				3	8	13
8				5	7	11	21				2	7	12

№ п/п	Наработка до отказа			Длительность ремонта			№ п/п	Наработка до отказа			Длительность ремонта		
	А	Б	В	Б	В	Б		Б	В				
9	300	500	700	5	10	15	22	200	350	650	1	6	11
10				4	9	14	23				6	9	10
11				3	8	13	24				4	8	13
12				2	7	12	25				5	7	11
13				1	6	11	26	300			7	9	16

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит отличие коэффициента готовности объекта и коэффициента оперативной готовности?
2. Какие параметры надежности характеризует коэффициент готовности?
3. Какие параметры надежности характеризует коэффициент оперативной готовности?
4. Какие параметры надежности характеризует коэффициент технического использования?
5. Какие параметры надежности характеризует коэффициент ремонта?

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шемшур Е. А. Учебно-методическое пособие к практическим занятиям по дисциплине «Надежность технических систем» / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2015. – 64 с.
2. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебник / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М.: Логос, 2003. – 208 с.

Практическая работа № 8

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

Цель: научить студентов аналитически определять количественные показатели надежности.

Задачи обучения:

- познакомить с методикой определения единичных и комплексных показателей по аналитическим уравнениям;
- привить навыки аналитического расчета показателей надежности при различных законах распределения.

Методы и формы обучения и преподавания: индивидуальная работа, работа в парах; ситуационные задачи.

Материально-техническое оснащение: калькулятор или компьютер с программами EXCEL или MathCAD.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Выпишем формулы, по которым определяются количественные характеристики показателей надежности изделия

$$p(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right] = 1 - \int_0^t f(t) dt ; \quad (8.1)$$

$$q(t) = 1 - p(t); \quad (8.2)$$

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = - \frac{dp(t)}{dt}; \quad (8.3)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} ; \quad (8.4)$$

$$m_t = \int_0^\infty p(t) dt, \quad (8.5)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы на интервале времени от 0 до t ;

$q(t)$ – вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t ;

$f(t)$ – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия T ;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов изделия;

m_t – среднее время безотказной работы изделия.

Одним из наиболее часто используемым законов распределения времени безотказной работы изделий является экспоненциальный закон.

Учитывая, что $\lambda = \text{const}$, формулы (8.1) - (8.5) для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид

$$p(t) = e^{-\lambda t}; \quad (8.6)$$

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (8.7)$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \quad (8.8)$$

$$\lambda = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda; \quad (8.9)$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda}. \quad (8.10)$$

2. РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

Задача № 1

Средняя наработка до отказа L_1 автоматического регулятора равна 640 часов. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности.

Определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов за 120 часов работы системы.

Решение:

Так как $\lambda = \text{const}$, то из (8.9) следует:

$$\lambda(120) = \frac{1}{L_1} = \frac{1}{640} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ (час}^{-1}\text{)}.$$

$$p(120) = e^{-\lambda t} = e^{-1,56 \cdot 10^{-3} \cdot 120} = e^{-0,187} = 0,83.$$

$$f(120) = P(120) \cdot \lambda(120) = 1,56 \cdot 10^{-3} \cdot 0,83 = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ (ч}^{-1}\text{)}.$$

Задача № 2

Система состоит из 1000 последовательно соединенных элементов, каждый из которых обладает высокой вероятностью безотказной работы $P(t) = 0,99$. Определить надежность всей системы. Определить надежность этой системы, если число элементов – 100?

Решение:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = \prod_{i=1}^{1000} P_i(t) = 0,99^{1000} = 0,432 \cdot 10^{-4}.$$

$$P_c(t) = P_c(100) = \prod_{i=1}^{100} P_i(t) = 0,99^{100} = 0,366.$$

Задача № 3

Система состоит из $n = 6000$ одинаковых элементов, соединенных последовательно, средняя интенсивность отказов каждого из которых $\lambda_{cp}(t) = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Необходимо определить вероятность безотказной работы $P_c(t)$ в течение $T = 50$ ч и среднее время безотказной работы системы m_{tc} .

Решение:

Интенсивность отказов системы:

$$\lambda_c = \sum_1^n \lambda_{cp} = \sum_1^{6000} \lambda_{cp} = \lambda_{cp} \cdot n = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 6000 = 1,2 \cdot 10^{-3} (\text{ч}^{-1}).$$

Вероятность безотказной работы системы в течение 50 ч:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t}.$$
$$P_c(50) = e^{-1,2 \cdot 0,001 \cdot 50} = e^{-0,006} = 0,994.$$

Среднее время безотказной работы системы:

$$m_t = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,0012} = 833,3 (\text{ч}).$$

3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 3.1. Средняя наработка до отказа L_1 системы равна 460 часов. Для экспоненциального закона надежности определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов за 800 часов работы системы.

Задача 3.2. Система управления состоит из 6000 элементов, соединенных последовательно, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp}(t) = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $T = 50$ ч и среднее время безотказной работы системы.

Задача 3.3. Система управления состоит из 5000 элементов, соединенных последовательно, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp}(t) = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $T = 120$ ч и среднее время безотказной работы системы.

Задача 3.4. Невосстанавливаемая в процессе работы электронная машина состоит из 200000 элементов, соединенных последовательно, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp}(t) = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Требуется определить вероятность безотказной работы электронной машины в течение суток и среднее время безотказной работы электронной машины.

Задача 3.5. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Требуется определить $P_c(t)$, $q_c(t)$, $f_c(t)$, m_{tc} , для $t = 50 \text{ ч}$.

Задача 3.6. Время работы прибора до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda_{cp}(t) = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $t = 180 \text{ часов}$. Требуется определить количественные характеристики надежности элемента $p(t)$, $q(t)$, $f(t)$, m_t .

Задача 3.7. Система состоит из пяти приборов, среднее время безотказной работы которых равно: $m_{t1} = 83 \text{ ч}$; $m_{t2} = 220 \text{ ч}$; $m_{t3} = 280 \text{ ч}$; $m_{t4} = 400 \text{ ч}$; $m_{t5} = 700 \text{ ч}$. Для приборов справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется найти среднее время безотказной работы системы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит отличие интенсивности отказов и параметра потока отказов?
2. Чем характерен экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы изделия?
3. Что такое функция плотности вероятности?
4. Что такое функция распределения, какова ее связь с функцией плотности вероятности?

5. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Острейковский В. А. Теория надежности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
2. Вышегородцева Г. И., Агеева В. Н. Практикум по основам надежности технических систем: методические указания к выполнению практических работ и самостоятельной работы для студентов факультета инженерной механики. – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2018. – 65 с.
3. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

Учебное издание

**Пеленко Валерий Викторович
Нечитайлов Василий Васильевич
Ширяев Александр Дмитриевич**

Надежность систем производства электрической и тепловой энергии

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
-Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 02.03.2026 г. Рег. № 5235/25

Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.