Надёжность информационных систем

Лекции 1 – 3. Основные понятия теории надёжности

П. А. Макаров





СЫКТЫВКАРСКИЙ
ЛЕСНОЙ
ИНСТИТУТ

11, 25 сентября и 9 октября 2026 г.

Содержание

1. Основные сведения о дисциплине
2. Введение
3. Источники информации и список литературы
4. Терминологический аппарат
5. Классификация объектов по надёжности
6. Способы обеспечения надёжности ИС
7. Основные количественные показатели надёжности
8. Типовые законы распределения
9. Контрольные вопросы и задания

Основные сведения о дисциплине

- Дисциплина: Надёжность информационных систем.
- Преподаватель: Макаров Павел Андреевич, makarovpa@ipm.komisc.ru, @mkrvpa.
- Трудоёмкость: 16 ч. лекций + 32 ч. лаб. раб.
- Форма итоговой аттестации: экзамен.
- Сайт в поддержку курса: https://makarovpa.ru/dis.

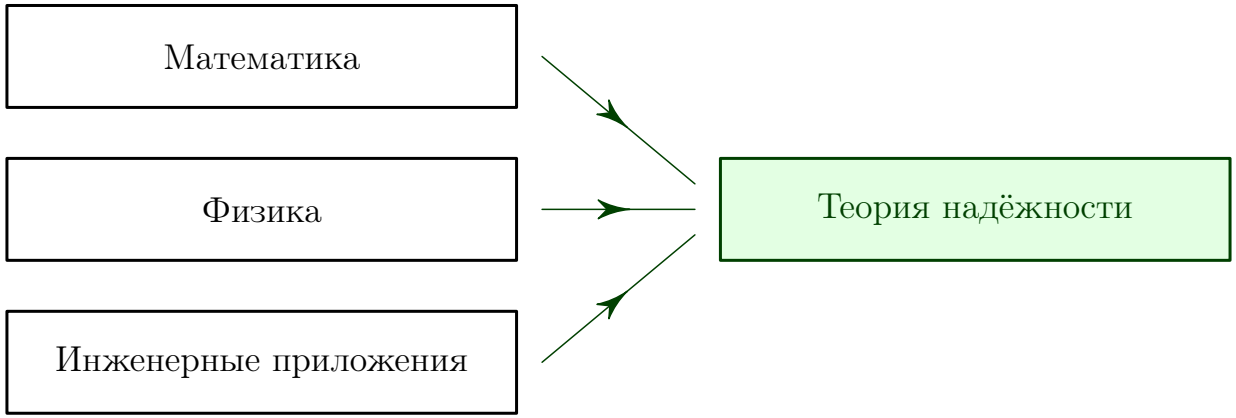
Итоговый балл

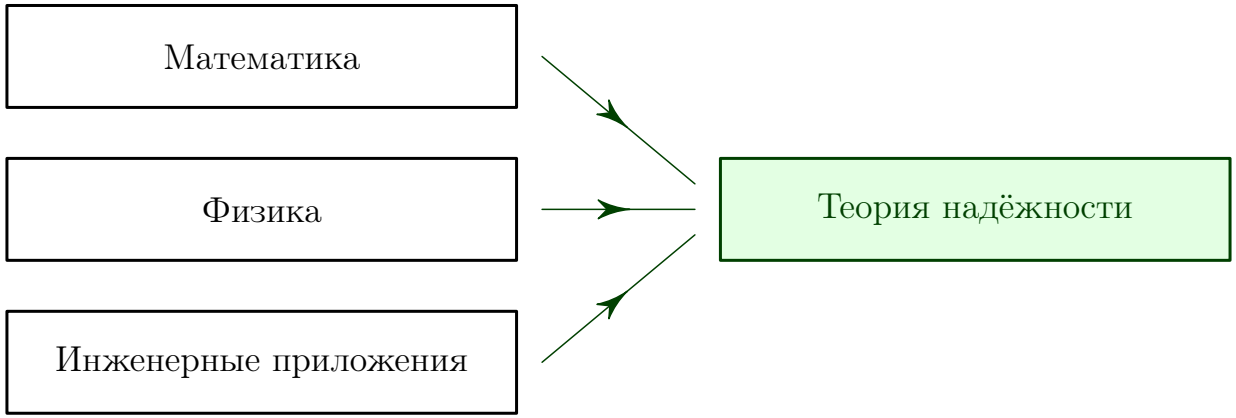
$$S = \sum_{i=1}^{8} L_i + E,$$

где балл за каждую лабораторную работу $L_i \leqslant \dfrac{70}{8} = 8.75$, а $E \leqslant 30$ — промежуточный контроль на экзамене.

Итоговый балл, S	< 60	$60 \div 69$	$70 \div 89$	$90 \div 100$
Оценка	2	3	4	5

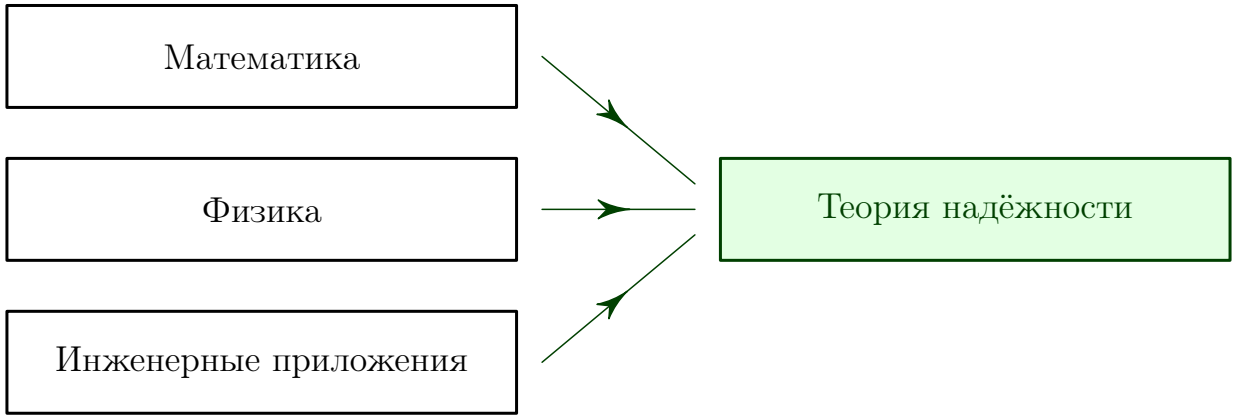
Таблица 1: Перевод баллов в оценки экзамена


Математика
Физика
Инженерные приложения
Теория надёжности



Предмет теории надёжности

- Закономерности возникновения отказов.
- Количественная оценка и
- методы обеспечения работоспособности технических систем.



Предмет теории надёжности

- Закономерности возникновения отказов.
- Количественная оценка и
- методы обеспечения работоспособности технических систем.

Специфика ИС

- Аппаратная часть.
- Программное обеспечение.
- Сетевая инфраструктура.
- Человеческий фактор.

1. Показатели назначения.
2. Показатели надёжности.
3. Эргономические показатели.
4. Эстетические показатели.
5. Показатели технологичности.
6. Показатели транспортабельности.
7. Показатели унификации и стандартизации.
8. Патентно-правовые показатели.
9. Экологические показатели.
10. Показатели безопасности.
11. Показатели экономичности.

Источники информации

1. Узко-направленная литература (краткие лекции и учебные пособия): [1—4].

2. Основная литература (расширенные учебники и монографии): [5—8].

3. Дополнительная литература: [9—14].

4. Межгосударственные стандарты и ГОСТы: [15; 16].

5. Техническая документация и т. п.

Список литературы I

1. *Матуско В. Н., Лебедев Н. С.* Надёжность информационных систем. — Новосибирск : Сибирская государственная геодезическая академия, 2006. — С. 129.
2. *Расулова С. С.* Надёжность информационных систем. — Ташкент : Ташкентский университет информационных технологий, 2007. — С. 118.
3. *Ващенко Г. В., Добронец Б. С.* Надёжность информационных систем. — Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2008. — С. 208.
4. Надёжность информационных систем / Ю. Ю. Громов [и др.]. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2010. — С. 160.
5. *Pradhan D. K.* Fault-Tolerant Computer System Design. — Prentice Hall, 1996. — P. 560.

Список литературы II

6. *Modarres M.*, *Kaminskiy M. P.*, *Krivtsov V.* Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. — 3rd Edition. — Boca Raton : CRC Press, 2016. — P. 522.
7. *Breneman J. E.*, *Sahay C.*, *Lewis E. E.* Introduction to Reliability Engineering. — 3rd Edition. — John Wiley & Sons, 2022. — P. 640.
8. *Гнеденко Б. В.*, *Беляев Ю. К.*, *Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надёжности: Основные характеристики надёжности и их статистический анализ. — Изд. 3, стереотип. — Москва : URSS, 2024. — С. 584.
9. *Майерс Г.* Надёжность программного обеспечения. — Москва : Мир, 1980. — С. 360.
10. *Майерс Г.* Искусство тестирования программ. — Москва : Финансы и статистика, 1982. — С. 174.

Список литературы III

11. *Jain R.* The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling. — John Wiley & Sons, 1991. — P. 720.
12. *Брукс Ф.* Мифический человеко-месяц или как создаются программные системы. — СПб : Символ-Плюс, 1999. — С. 304.
13. *Никитин В. Н., Никитин Н. В.* Госпожа удачи: Прикладная теория вероятностей и диаграммная техника. Как легко и быстро решать прикладные задачи в области теории вероятностей при помощи подхода Фейнмана к квантовой механике. — Москва : ЛЕНАНД, 2023. — С. 408.
14. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. — 12-е изд. — Москва : Юрайт, 2026. — С. 479.

Список литературы IV

15. ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. — Москва, 2021.

16. IEC 60050-192. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 192: Dependability. — 2015.

Терминологический аппарат теории надёжности зафиксирован в форме официальных документов — стандартов, содержанием которых необходимо руководствоваться в работе.

Терминологический аппарат теории надёжности зафиксирован в форме официальных документов — стандартов, содержанием которых необходимо руководствоваться в работе.

Период	**Стандарт**	**База**
1990 – 31.12.2010	ГОСТ 27.002-89	научная школа СССР
2011 – 2012	ГОСТ Р 53480-2009 ↓ ГОСТ Р 27.002-2009	IEC 60050-191
2012 – 2017	ГОСТ 27.002-89	научная школа СССР
01.03.2017 – 31.12.2021	ГОСТ 27.002-2015	?
с 01.01.2022	ГОСТ Р 27.102-2021	IEC 60050-192:2015

Таблица 2: Краткая хронология стандартизации

- ГОСТ 27.002-89 применяется исключительно для обеспечения обратной совместимости (legacy). Его используют для чтения старой конструкторской документации, а также при эксплуатации оборудования, в паспортах которого требования по надёжности жёстко привязаны к формулировкам 1989 года.
- ГОСТ Р 53480-2009 в качестве нормативного документа больше не применяется. Его целесообразно использовать лишь как справочное пособие при переводе иностранной литературы[1], поскольку его терминология максимально близка к международной практике МЭК.
- В странах СНГ вместо ГОСТ 27.002-89 чаще действует принятый позже межгосударственный ГОСТ 27.002-2015.

[1] И даже для этой задачи лучше использовать актуальный ГОСТ Р 27.102-2021 [15].

Что делать, если одни и те же термины разные стандарты определяют по-разному?

Что делать, если одни и те же термины разные стандарты определяют по-разному?

1. **Приоритет действующего стандарта.**
2. **Историческая привязка к объекту.**
3. **Договорной приоритет.** В контрактах на выполнение НИОКР или поставку сложной техники всегда включайте отдельный раздел «Термины и определения». В нём следует прямо указать: *“Термины используются в значениях, определённых ГОСТ [выбранный стандарт]”*, что снимает любые разночтения между сторонами.
4. **Создание таблиц соответствия.** При разработке комплексной документации формируйте внутренний глоссарий. В нём нужно явно прописывать эквиваленты (например, указывать, какой термин из советского стандарта соответствует термину Failure или Fault из международного словаря МЭК).

Терминологический аппарат

Обзор терминологии согласно ГОСТ Р 27.102-2021 [15]

1. Термины, относящиеся к структуре стандарта.
2. Термины, относящиеся к понятию надёжности.
3. Термины, относящиеся к состоянию объекта.
4. Термины, относящиеся к временным понятиям.
5. Термины, относящиеся к отказам, дефектам, повреждениям.
6. Термины, относящиеся к техническому обслуживанию, восстановлению и ремонту.
7. Термины, относящиеся к показателям надёжности.
8. Термины, относящиеся к показателям безотказности.
9. Термины, относящиеся к показателям долговечности.
10. Термины, относящиеся к показателям ремонтопригодности и восстанавливаемости.
11. Термины, относящиеся к показателям сохраняемости.
12. Термины, относящиеся к комплексным показателям надёжности.
13. Термины, относящиеся к разработке, обеспечению и анализу надёжности.
14. Термины, относящиеся к резервированию.
15. Термины, относящиеся к испытаниям на надёжность.

Опр. 1. ***Объект*** **/** ***Item*** **:** Предмет рассмотрения, на который распространяется терминология в области надёжности.
Примечания:

1. Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение.
2. Объект может включать в себя обеспечение, персонал или их комбинации.
3. Объект может быть основным, резервируемым или резервным.

Понятие «эксплуатация» включает в себя помимо применения по назначению техническое обслуживание, ремонт, хранение и транспортирование.

Термин «объект» может относиться к конкретному объекту и к одному из представителей совокупности, в частности к любому представителю серии, партии или статистической выборки однотипных объектов.

На стадии разработки термин «объект» применяют по отношению к любому представителю генеральной совокупности объектов.

Опр. 2. ***Элемент / Element*** **:** Объект, у которого отсутствуют (или в рамках данного исследования не рассматривают) составные части.

Опр. 3. ***Система / System*** **:** Объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определённом контексте как единое целое, отделённое от окружающей среды.
Примечания:

1. Для системы обычно определяют конкретную цель, например выполнение требуемых функций.
2. Для системы, как правило, установлена граница, отделяющая её от окружающей среды и других систем. Если такая граница не установлена, систему называют открытой системой.
3. На работу системы может влиять окружающая среда. Для работы системы могут требоваться внешние ресурсы (не входящие в границы системы).

Опр. 4. ***Подсистема / Subsystem*** **:** Часть системы, представляющая собой систему.

Опр. 5. ***Надёжность (объекта) / Dependability (of item)*** **:**
Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.
Примечание: Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость или определённые сочетания этих свойств.

Иная трактовка согласно ГОСТ Р 27.102-2021 [15]

Надёжность — свойство объекта сохранять во времени способность к выполнению требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Это определение применяют, когда параметрическое описание нецелесообразно (например, для простейших объектов, работоспособность которых характеризуется по типу «да — нет») или невозможно (например, для систем «машина — оператор», т. е. таких систем, не все свойства которых могут быть охарактеризованы количественно).

«Надёжность объекта» $\neq$ «Надёжность выполнения задания»!

«Надёжность объекта»

- Характеризует свойство объекта, а не возможность выполнения задания при его участии.
- Не зависит от готовности, восстанавливаемости, обеспеченности техническим обслуживанием.

«Надёжность объекта»

- Характеризует свойство объекта, а не возможность выполнения задания при его участии.
- Не зависит от готовности, восстанавливаемости, обеспеченности техническим обслуживанием.

«Надёжность» | «Живучесть» | «Безопасность»

«Надёжность объекта»

- Характеризует свойство объекта, а не возможность выполнения задания при его участии.
- Не зависит от готовности, восстанавливаемости, обеспеченности техническим обслуживанием.

«Надёжность» | «Живучесть» | «Безопасность»

Опр. 8. ***Безотказность*** **/** ***Reliability*** **:** Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Безотказность в той или иной степени свойственна объекту в любом из возможных режимов его существования.

Опр. 9. ***Готовность (объекта)*** **/** ***Availability (of item)*** **:** Способность объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях, в заданный момент или период времени при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.
Примечания:

1. Надёжность объекта и готовность объекта не зависят друг от друга.
2. Показатели готовности объекта функционально зависят от показателей безотказности, ремонтопригодности и восстанавливаемости объекта, а также от внешних условий, предусмотренных проектом.
3. Готовность может относиться как к функционирующему, так и к не функционирующему объекту.
4. Показателями готовности объекта являются коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности и коэффициент технического использования.
5. См. также термин «состояние готовности» (Опр. 18).

Опр. 10. ***Ремонтопригодность*** **/** ***Maintainability*** **:** Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособности путём технического обслуживания и ремонта.

Опр. 11. ***Восстанавливаемость*** **/** ***Recoverability*** **:** Свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.

Примечания:

1. Для восстановления могут требоваться или не требоваться внешние воздействия. Для случая, когда внешние воздействия не требуются, может использоваться термин «самовосстанавливаемость».
2. Восстанавливаемость не имеет непосредственного отношения к надёжности объекта.
3. Восстанавливаемость, являясь свойством объекта, не характеризует его надёжность. Объект, обладающий свойством восстанавливаемости, может иметь как высокую, так и низкую надёжность, также как и объект, не обладающий этим свойством.

Опр. 12. ***Долговечность / Durability*** **:** Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экономичности и эффективности.

Опр. 13. ***Сохраняемость / Storability*** **:** Свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Опр. 14. ***Исправное состояние (исправность)*** **/** ***Perfect state (flawless)*** **:** Состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.
Примечание: См. примечание 2 к Опр. 17.

Опр. 15. ***Неисправное состояние (неисправность)*** **/** ***Imperfect state (flaw)*** **:** Состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект.
Примечание: См. примечание 2 к Опр. 17.

Опр. 16. ***Работоспособное состояние*** **/** ***Up state*** **:** Состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.
Примечания:

1. Отсутствие необходимых внешних ресурсов может препятствовать работе объекта, но это не влияет на его пребывание в работоспособном состоянии.
2. См. примечание 2 к Опр. 17.

Опр. 17. ***Неработоспособное состояние*** **/** ***Down state*** **:** Состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект.

Примечания:

1. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, в которых объект способен частично выполнять требуемые функции.
2. Исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть как работоспособным, так и неработоспособным. Работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен.

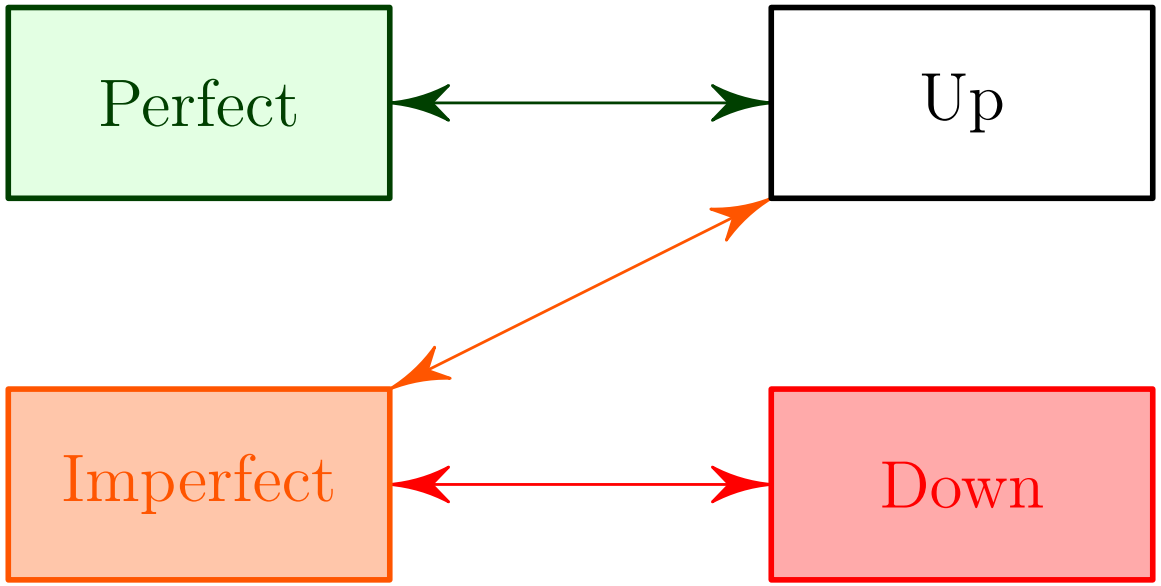


Рис. 1: Наглядное представление связи основных технических состояний

- В работоспособном состоянии различают: «рабочее состояние» (operating state) и «нерабочее состояние» (non-operating state), при котором объект не функционирует (Опр. 19 и 20).
- В отраслевой документации допускается использование более детальной классификации состояний, не противоречащей приведённой в ГОСТ Р 27.102-2021 [15].

Опр. 18. ***Состояние готовности (объекта) / Availability status (of item)*** **:**
Состояние неработающего работоспособного объекта, в котором объект может выполнять требуемые функции в заданных условиях применения при условии, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.
Примечания:

1. Работоспособный объект не всегда находится в состоянии готовности (при отсутствии необходимых ресурсов).
2. Объект, находящийся в резерве, может в некоторых случаях подвергаться воздействию рабочих параметров резервируемого объекта.

- Состояние готовности объекта относится только к объекту и не характеризует состояние выполнения задания.
- В состоянии готовности объект должен быть обеспечен внешними ресурсами, необходимыми для его работы.
- Термины «состояние готовности» и «готовность объекта» не являются синонимами.

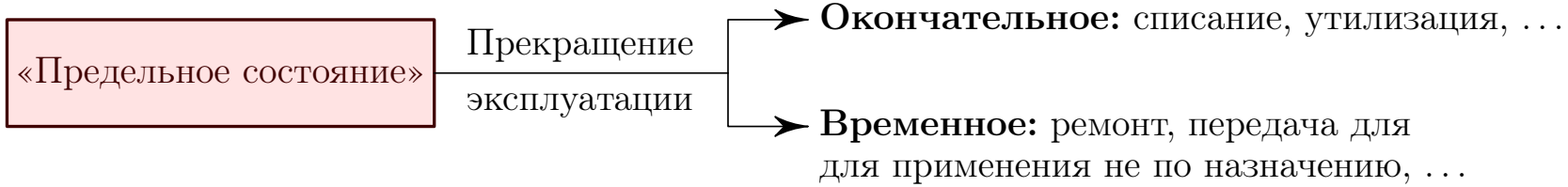
Опр. 19. ***Рабочее состояние*** **/** ***Operating state*** **:** Состояние объекта, в котором он выполняет хотя бы одну требуемую функцию.
Примечание: Работающий объект может находиться в работоспособном или в частично неработоспособном состоянии.

Опр. 20. ***Нерабочее состояние*** **/** ***Non-operating state*** **:** Состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.
Примечание: Неработающий объект может находиться в любом из состояний, приведённых в Опр. 14 – 17.

Примеры нерабочих состояний

- «состояние резервирования» (standby state);
- «состояние планового простоя» (idle, free state);
- «внутреннее неработоспособное состояние» (internal disabled state) $\Leftrightarrow$ Опр. 17;
- «внешнее неработоспособное состояние» (external disabled state), обусловлено отсутствием внешних ресурсов.

Опр. 21. ***Предельное состояние*** **/** ***Limiting state*** **:** Состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.
Примечание: Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливают на основе критериев предельного состояния объекта.



Опр. 22. ***Техническое состояние*** **/** ***Technical condition*** **:** Состояние объекта в определённый момент времени, при определённых условиях внешней среды, характеризующееся фактическими значениями параметров, установленных в документации.

Опр. 23. ***Состояние резервирования / Standby state*** **:**
Нерабочее состояние работоспособного объекта, находящегося в резерве, в течение заданного периода времени.
Примечание: В некоторых случаях объект, находящийся в резерве, может подвергаться воздействию рабочих параметров резервируемого объекта.

- «Состояние горячего резерва» — резервный объект готов к работе сразу после запроса.
- «Состояние холодного резерва» — для начала работы резервному объекту требуется после запроса некоторая подготовка.

Опр. 24. ***Наработка*** **/** ***Operating time*** **:** Продолжительность или объём работы объекта.
Примечание: Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и дискретной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

Опр. 25. ***Наработка до отказа*** **/** ***Operating time to failure*** **:** Наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа.
Примечание: Частным случаем наработки до отказа является наработка до первого отказа — наработка объекта от начала его эксплуатации до первого отказа.

Опр. 26. ***Ресурс*** **/** ***Operating life*** **:** Суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до момента достижения объектом предельного состояния.

Опр. 27. ***Остаточный ресурс / Residual operating life*** **:**
Суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения объектом предельного состояния.

Опр. 28. ***Назначенный ресурс / Assigned operating life*** **:**
Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта должна быть прекращена независимо от его технического состояния.
Примечания:

1. Данный показатель не является показателем надёжности.
2. По истечении назначенного ресурса объекта должно быть принято решение, предусмотренное соответствующей документацией, о ремонте, списании, утилизации, оценке технического состояния, установлении нового назначенного ресурса и т. п.

Опр. 29. ***Отказ / Failure*** **:** Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.
Примечания:

1. Отказ может быть полным или частичным.
2. Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние.
3. Частичный отказ характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Если работоспособность объекта характеризуется совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Опр. 30. ***Дефект / Defect*** **:** Каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации.

Опр. 31. ***Повреждение / Damage*** **:** Нарушение исправного состояния объекта при сохранении его работоспособного состояния.
Примечания:

1. Дефект и (или) повреждение могут служить причиной возникновения частичного или полного отказа объекта.
2. Наличие дефекта и (или) повреждения приводит объект в неисправное состояние.

- Критерии отказов следует отличать от критериев повреждений.
- Под критериями повреждений понимают признаки или совокупность признаков неисправного, но работоспособного состояния объекта.

Опр. 32. ***Вид отказа / Failure mode*** **:** Единица классификации отказов на основе установленных критериев: особенностей, причины, последствий отказа; функции, способность выполнения которой утрачена в результате отказа; или изменения состояния объекта.

Опр. 33. ***Причина отказа / Failure cause*** **:** Явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.
Примечания:

1. Причины отказа могут быть как внутри объекта (внутренние причины), так и вне его (внешние причины).
2. Причиной отказа могут быть только внешние причины, предусмотренные проектом объекта. Внешние факторы, не предусмотренные проектом объекта, а также административные, логистические, организационные в качестве причины отказа не учитывают.

Опр. 34. ***Последствия отказа / Failure effect*** **:** Явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.
Примечания:

1. В некоторых случаях при анализе может быть необходимо рассмотреть отдельные виды отказов и их последствия.
2. Последствия отказа могут быть как внутри объекта, так и вне его.

Опр. 35. ***Критичность отказа / Criticality of a failure*** **:** Совокупность признаков, характеризующих значимость последствий отказа.
Примечание: Классификацию отказов по критичности (критический/некритический), например по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с возникновением отказа, или по трудоёмкости устранения последствий отказа, устанавливают в документации на основании технического и экономического анализа.

Опр. 36. ***Сбой*** / ***Interruption*** : Самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Отличительным признаком сбоя является то, что восстановление работоспособного состояния объекта может быть обеспечено без ремонта, например путём воздействия оператора на органы управления, устранением обрыва нити, магнитной ленты и т. п., коррекцией положения заготовки.

Характерный пример

Сбой при выполнении компьютерной программы, устраняемый повторным пуском программы с места останова или её перезапуском сначала.

Опр. 37. ***Показатель надёжности / Dependability measure*** **:**
Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта.

Количественные характеристики надёжности вводят согласно **статистической теории надёжности**.

Область применения статистической теории надёжности

- Крупносерийные объекты, которые изготавливают и эксплуатируют в статистически однородных условиях и к совокупности которых применимо статистическое толкование вероятности.
- Для единичных восстанавливаемых (ремонтируемых) уникальных и мелкосерийных объектов, в которых допустимы многократные отказы, для описания последовательности которых применима модель потока случайных событий.
- Для уникальных и мелкосерийных объектов, которые состоят из объектов массового производства.

Статистическая теория надёжности является составной частью более общего подхода к расчётной оценке надёжности технических объектов, при котором отказы рассматривают как результат взаимодействия объекта как физической системы с другими объектами и окружающей средой.

- На стадии проектирования и конструирования показатели надёжности трактуют как характеристики вероятностных или частично вероятностных математических моделей создаваемых объектов.
- На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации используют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик.

Опр. 38. ***Единичный показатель надёжности*** **/** ***Simple dependability measure*** **:** Показатель надёжности, характеризующий одно из свойств, составляющих надёжность объекта.
Примечание: Единичными показателями надёжности являются показатели безотказности, ремонтопригодности, восстанавливаемости, долговечности, сохраняемости.

Опр. 39. ***Комплексный показатель надёжности*** **/** ***Integrated dependability measure*** **:** Показатель надёжности, характеризующий несколько свойств, составляющих надёжность объекта.

Пример: коэффициент готовности (см. Опр. 54).

Опр. 40. ***Расчётная оценка показателя надёжности / Calculated estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая расчётным методом.

Опр. 41. ***Экспериментальная оценка показателя надёжности / Experimental estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая по данным испытаний.

Опр. 42. ***Эксплуатационная оценка показателя надёжности / Field estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая по данным эксплуатации.

Опр. 43. ***Экстраполированная оценка показателя надёжности / The extrapolated estimation of the dependability measure*** **:** Точечная или интервальная оценка показателя надёжности, определяемая на основании результатов расчётов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путём экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

Опр. 44. ***Вероятность безотказной работы / Reliability function*** **:** Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Опр. 45. ***Средняя наработка до отказа / Mean operating time to failure*** **:** Математическое ожидание наработки объекта до отказа.

Опр. 46. ***Гамма-процентная наработка до отказа / Gamma-percentile operating time to failure*** **:** Наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Опр. 47. ***Средняя наработка между отказами / Mean operating time between failures*** **:** Математическое ожидание наработки объекта между отказами.
Примечание: В случае, когда наработка между отказами подчиняется экспоненциальному распределению, её называют средней наработкой на отказ и определяют как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию количества его отказов в течение этой наработки.

Опр. 48. ***Гамма-процентная наработка между отказами / Gamma-percentile operating time between failure*** **:**
Наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ, выраженной в процентах.

Опр. 49. ***(мгновенная) Интенсивность отказов / Failure rate*** **:** Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Опр. 50. ***Средняя интенсивность отказов / Mean failure rate*** **:** Математическое ожидание мгновенной интенсивности отказов за заданный период времени.

Опр. 51. ***(мгновенный) Параметр потока отказов / Failure intensity*** : Предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к продолжительности этого интервала, стремящейся к нулю.

Опр. 52. ***Средний параметр потока отказов / Mean failure intensity*** : Математическое ожидание мгновенного параметра потока отказов за заданный период времени.

Опр. 53. ***Стационарный параметр потока отказов / Stationary failure intensity*** : Предел мгновенного параметра потока отказов при стремлении рассматриваемого момента времени к бесконечности.

Опр. 54. ***(мгновенный) Коэффициент готовности / (instantaneous) Availability factor*** **:** Вероятность того, что в данный момент времени объект находится в работоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.
Примечание: В некоторых случаях выделяют проектный коэффициент готовности, определяемый при проектировании для идеальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, и коэффициент эксплуатационной готовности, определяемый для реальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Отношение эксплуатационного коэффициента готовности к проектному характеризует использование объекта по его назначению.

Опр. 55. ***(мгновенный) Коэффициент неготовности / (instantaneous) Unavailability factor*** **:** Вероятность того, что объект в данный момент времени находится в неработоспособном состоянии, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается.
Примечание: В некоторых случаях выделяют проектный коэффициент неготовности, определяемый при проектировании для идеальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, и коэффициент эксплуатационной неготовности, определяемый для реальных условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Отношение эксплуатационного коэффициента неготовности к проектному характеризует использование объекта по его назначению.

Опр. 56. ***Коэффициент оперативной готовности*** / ***Operational availability factor*** : Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный 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 периода времени.

Опр. 57. ***Коэффициент технического использования*** / ***Total availability factor, utilization factor*** : 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.

Опр. 58. ***Коэффициент сохранения эффективности*** / ***Efficiency ratio*** : Отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определённую продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

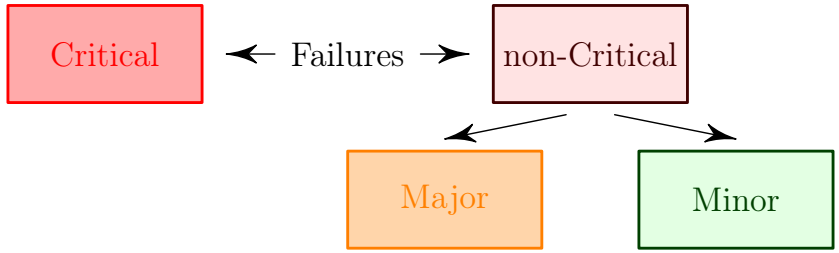
Примечание: Для каждого типа объектов понятия эффективности и показателя эффективности устанавливают в документации на объект.

Опр. 59. ***Нормирование надёжности (объекта)*** **/** ***Dependability specification (of item)*** **:** Установление в нормативной и технической документации количественных и качественных требований к надёжности объекта.
Примечание: Нормирование надёжности включает выбор номенклатуры нормируемых показателей надёжности; установление и технико-экономическое обоснование значений показателей надёжности объекта и его составных частей; задание требований к точности и достоверности исходных данных; установление критериев отказов, повреждений и предельных состояний; задание требований к методам контроля надёжности на всех этапах жизненного цикла объекта.

Опр. 60. ***Нормируемый показатель надёжности*** **/** ***Specified dependability measure*** **:** Показатель надёжности, значение которого регламентировано нормативной и технической документацией на объект.

Классификация объектов по надёжности

Критичность и последствия отказов



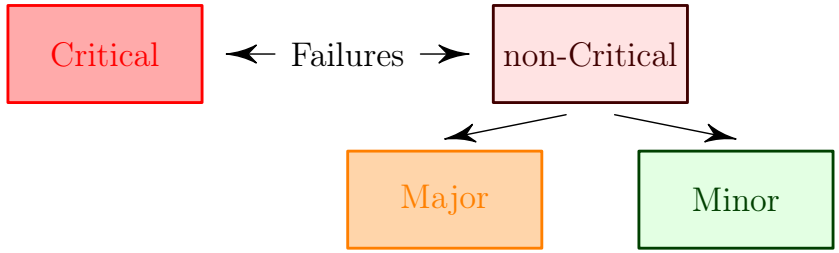


Таблица 3: Примеры последствий отказов

Критичность и последствия отказов	**Допустимая ВБР**	**Примеры**
Некритические: Ремонтные затраты в пределах нормы.	$P(t) < 0.9$	Отдельные узлы и элементы оборудования.
Экономический ущерб: Повышенные простои, работа на пониженных режимах или с ухудшенными показателями.	$P(t) > 0.9$ или $P(t) > 0.99$	Технологическое оборудование, сельскохозяйственные и бытовые машины.
Катастрофические: Аварии, катастрофы, невыполнение ответственного задания.	$P(t) \to 1$	Летательные аппараты, военная техника, химическое и медицинское оборудование.

Опр. 61. ***Независимый отказ / Primary failure*** **:** Отказ, не вызванный возникновением других отказов.

Опр. 62. ***Зависимый отказ / Secondary failure*** **:** Отказ, вызванный возникновением других отказов.

Опр. 63. ***Ресурсный отказ / Marginal failure*** **:** Отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Опр. 64. ***Внезапный отказ / Sudden failure*** **:** Отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта из работоспособного состояния в неработоспособное состояние.

Опр. 65. ***Постепенный отказ / Gradual failure*** **:** Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

Опр. 66. ***Систематический отказ / Systematic failure*** **:** Отказ, однозначно вызванный определённой причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации.
Примечания:

1. Систематический отказ может быть воспроизведен путем преднамеренного создания условий, вызывающих отказ, например с целью определения причины отказа.
2. Систематический отказ является результатом систематической неисправности.

Опр. 67. ***Перемежающийся отказ / Intermittent failure*** **:** Многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.
Примечание: В технической документации должен быть установлен критерий понятия “многократно возникающий отказ”.

Способы обеспечения надёжности ИС

Надёжность ИС может рассматриваться только на основе совокупности качеств надёжности как её аппаратного, так и ПО. В технике надёжность достигается на трёх основных этапах:

1. разработки,
2. производства,
3. эксплуатации.

Для ПО рассматриваются только этапы разработки и эксплуатации. Повышение надёжности программных средств, включает (но не ограничивается ими) следующие направлениями.

1. Корректная постановка технического задания (конкретная задача на разработку ПО);
2. Использование прогрессивных технологий программирования;
3. Контроль правильности функционирования (тестирование, отладка, анализ и обработка отчётов об ошибках пользователей в процессе экспуатации).

Способы обеспечения надёжности ИС

Подходы к созданию отказоустойчивых ИС

1. Резервирование.
2. Помехоустойчивое кодирование информации.
3. Создание адаптивных систем.

Блокировка ошибочных операций

1. Чисто технические средства.
2. Комплексные программно-аппаратные средства.

Оптимизация взаимодействия с ИС

1. Научная организация труда. В том числе:
   - эргономичное оборудование рабочих мест;
   - оптимальный режим труда и отдыха;
   - дружественный интерфейс взаимодействия человека с ИС.
2. Обучение персонала и пользователей.
3. Анализ имеющихся процессов взаимодействия человека с ИС и их совершенствование.

$$P(t) = \mathbb{P}\{\tau > t\}. \qquad (1)$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ является функцией наработки t. Обычно эту функцию предполагают непрерывной и дифференцируемой. Свойства:

1. $P(0) = 1$.
2. $\lim\limits_{t\to\infty} P(t) = 0$.
3. $\dfrac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} \leqslant 0$.

Если способность объекта выполнять заданные функции характеризуется одним параметром ν, то вместо формулы (1) можно записать:

$$P(t) = \mathbb{P}\{\nu_{\min}(t_1) \leqslant \nu(t_1) \leqslant \nu_{\max}(t_1); 0 \leqslant t_1 \leqslant t\}, \qquad (2)$$

Наряду с ВБР используют понятие «Вероятность отказа» $Q(t)$ — это вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени.

$$Q(t) = 1 - P(t). \tag{3}$$

Плотность распределения $f(t)$ наработки до отказа по определению связана с ВБР и вероятностью отказа следующим образом:

$$f(t) = -\frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}Q(t)}{\mathrm{d}t}. \tag{4}$$

$$F(t) = \int_0^t f(t_1)\,\mathrm{d}t_1. \tag{5}$$

Подставляя в (5) плотность распределения (4) и выполняя преобразования, получим

$$F(t) = -\int_0^t \frac{\mathrm{d}P(t_1)}{\mathrm{d}t_1}\mathrm{d}t_1 = -\int_0^t \mathrm{d}P(t_1) = \int_t^0 \mathrm{d}P(t_1) = P(0) - P(t).$$

$$\text{Так как } P(0) = 1 \Longrightarrow \boxed{F(t) = 1 - P(t).} \tag{6}$$

$$(6) \text{ и } (3) \Longrightarrow F(t) = Q(t). \tag{7}$$

Точечные оценки ВБР $\widehat{P}(t)$ и функции распределения наработки до отказа $\widehat{F}(t)$ на интервале от 0 до t дают формулы:

$$\widehat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad \widehat{F}(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \tag{8}$$

где N_0 — количество объектов, работоспособных в начальный момент времени, а $n(t)$ — количество объектов, отказавших на отрезке от 0 до t. Для получения достоверных оценок объём выборки N_0 должен быть достаточно велик.

Статистическую оценку для определения частоты отказов на интервале наработки от t до $t + \Delta t$ можно получить следующим образом:

$$\widehat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t}, \tag{9}$$

где $n(\Delta t)$ — число объектов, отказавших на рассматриваемом интервале наработки, $N(t)$ — число работоспособных объектов в начале испытания.

Определение

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \tag{10}$$

Размерность

$$[\lambda] = \left[t^{-1}\right]. \tag{11}$$

$$1\ \text{FIT} = 10^{-9}\ 1/\text{ч}. \tag{12}$$

Пример: для современных NVMe SSD (PCIe Gen5) $\lambda \sim 10 \div 50$ FIT, а для серверных CPU $\lambda \sim 20 \div 100$ FIT на кристалл.

Статистическая оценка

$$\widehat{\lambda}(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N_{\text{ср}}\Delta t}, \quad N_{\text{ср}} = \frac{N(t) + N(t+\Delta t)}{2}. \tag{13}$$

Высоконадёжные системы

$$P(t) \approx 1, \quad (P(t) \geqslant 0.99) \tag{14}$$

$$\lambda(t) \approx f(t). \tag{15}$$

Связь $\lambda(t)$ и $P(t)$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)}\frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\ln P(t)}{\mathrm{d}t} \quad \Longrightarrow \quad \mathrm{d}\ln P(t) = -\lambda(t)\mathrm{d}t.$$

Интегрируя на интервале от 0 до t (с учётом $\ln P(0) = \ln 1 = 0$) и потенцируя, получаем

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t_1)\,\mathrm{d}t_1\right]. \tag{16}$$

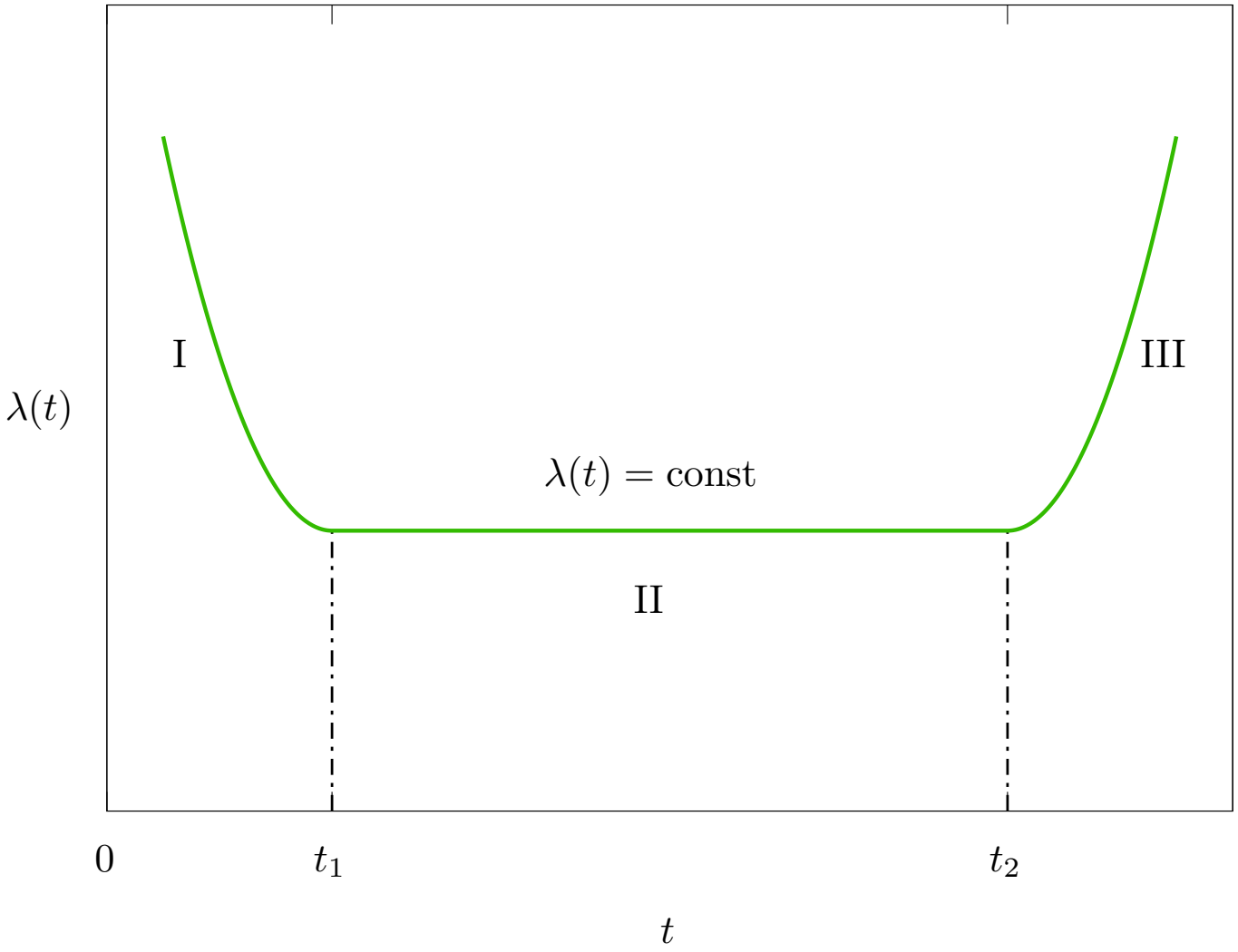


Рис. 2: Изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ с наработкой

Вообще говоря, различают

- среднюю наработку до отказа (Опр. 45, MTTF — Mean (operation) Time To Failure);
- и среднюю наработку между отказами (Опр. 47, MTBF — Mean (operation) Time Between Failures).

Вообще говоря, различают

- среднюю наработку до отказа (Опр. 45, MTTF — Mean (operation) Time To Failure);
- и среднюю наработку между отказами (Опр. 47, MTBF — Mean (operation) Time Between Failures).

С точки зрения математической статистики, среднее значение $x_{\text{ср}}$ любой случайной величины $x \in [a, b]$ определяется как её математическое ожидание

$$x_{\text{ср}} = \mathbb{M}[x] = \int_a^b x\, f(x)\, \mathrm{d}x, \tag{17}$$

где $f(x)$ — это плотность распределения соответствующей величины.

Из общей формулы (17) конкретно для MTTF имеем

$$MTTF = \mathbb{M}[t] = \int\limits_0^\infty t\, f(t)\, \mathrm{d}t \underset{(4)}{=} -\int\limits_0^\infty t\, \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t}\, \mathrm{d}t = -\int\limits_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t).$$

Из общей формулы (17) конкретно для MTTF имеем

$$MTTF = \mathbb{M}[t] = \int\limits_0^\infty t\, f(t)\, \mathrm{d}t \underset{(4)}{=} -\int\limits_0^\infty t\, \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t}\, \mathrm{d}t = -\int\limits_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t).$$

Интегрируя по частям, получаем

$$-\int\limits_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t) = -tP(t)\Big|_0^\infty + \int\limits_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t = \int\limits_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t.$$

Из общей формулы (17) конкретно для MTTF имеем

$$MTTF = \mathbb{M}[t] = \int_0^\infty t\, f(t)\, \mathrm{d}t \underset{(4)}{=} -\int_0^\infty t\, \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t}\, \mathrm{d}t = -\int_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t).$$

Интегрируя по частям, получаем

$$-\int_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t) = -tP(t)\Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t = \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t.$$

Таким образом, связь средней наработки до отказа с ВБР имеет вид

$$MTTF = T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t. \tag{18}$$

Из общей формулы (17) конкретно для MTTF имеем

$$MTTF = \mathbb{M}[t] = \int_0^\infty t\, f(t)\, \mathrm{d}t \underset{(4)}{=} -\int_0^\infty t\, \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t}\, \mathrm{d}t = -\int_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t).$$

Интегрируя по частям, получаем

$$-\int_0^\infty t\, \mathrm{d}P(t) = -tP(t)\Big|_0^\infty + \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t = \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t.$$

Таким образом, связь средней наработки до отказа с ВБР имеет вид

$$MTTF = T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)\, \mathrm{d}t. \tag{18}$$

В частном случае $\lambda(t) = \lambda = \mathrm{const}$ справедливо

$$MTTF = \int_0^\infty e^{-\lambda t}\, \mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda}. \tag{19}$$

Статистическая оценка средней наработки до отказа

$$\widehat{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N} t_j, \tag{20}$$

где N — количество работоспособных объектов при $t = 0$, а t_j — наработка до первого отказа j-го объекта.

Статистическая оценка средней наработки до отказа

$$\widehat{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N} t_j, \tag{20}$$

где N — количество работоспособных объектов при $t = 0$, а t_j — наработка до первого отказа j-го объекта.

Гамма-процентная наработка до отказа t_γ

$$P(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \tag{21}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы.

Статистическая оценка средней наработки до отказа

$$\widehat{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N} t_j, \tag{20}$$

где N — количество работоспособных объектов при $t = 0$, а t_j — наработка до первого отказа j-го объекта.

Гамма-процентная наработка до отказа t_γ

$$P(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \tag{21}$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы.

Общее определение гамма-процентных характеристик

$$F(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}, \tag{22}$$

где $F(t)$ — функции распределения соответствующих показателей (ресурса, срока службы, сохраняемости и т. д.).

Экспоненциальное распределение

$$P_{\mathrm{e}}(t) = e^{-\lambda t}, \quad \lambda = \mathrm{const}. \tag{23}$$

Применяется для электроники в период нормальной эксплуатации.

Распределение Вейбулла — Гнеденко

$$P_{\mathrm{w}}(t) = e^{-(t/t_0)^{\beta}}, \tag{24}$$

В первую очередь характеризуется параметром формы $\beta > 0$ (параметром Вейбулла). Значения $\beta < 1$ соответствуют приработке объекта, $\beta = 1$ — режиму нормальной эксплуатации, а $\beta > 1$ — износу объекта. Величину t_0 называют параметром масштаба.

Режим нормальной эксплуатации ($\beta = 1$)

$$P_{\mathrm{e}}(t) = P_{\mathrm{w}}(t), \quad \lambda = \frac{1}{t_0}.$$

Интенсивность отказов в общем случае ($\beta \neq 1$)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \underset{(4)}{=} -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{\mathrm{d}P(t)}{\mathrm{d}t} \underset{(24)}{=} \frac{\beta\, t^{\beta-1}}{t_0^{\beta}}. \tag{25}$$

Плотность распределения Вейбулла

$$f_{\mathrm{w}}(t) = \frac{\beta\, t^{\beta-1}}{t_0^{\beta}} e^{-(t/t_0)^{\beta}}. \tag{26}$$

$$\frac{\mathrm{d}g(f(x))}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}g(f)}{\mathrm{d}f} \cdot \frac{\mathrm{d}f(x)}{\mathrm{d}x}.$$

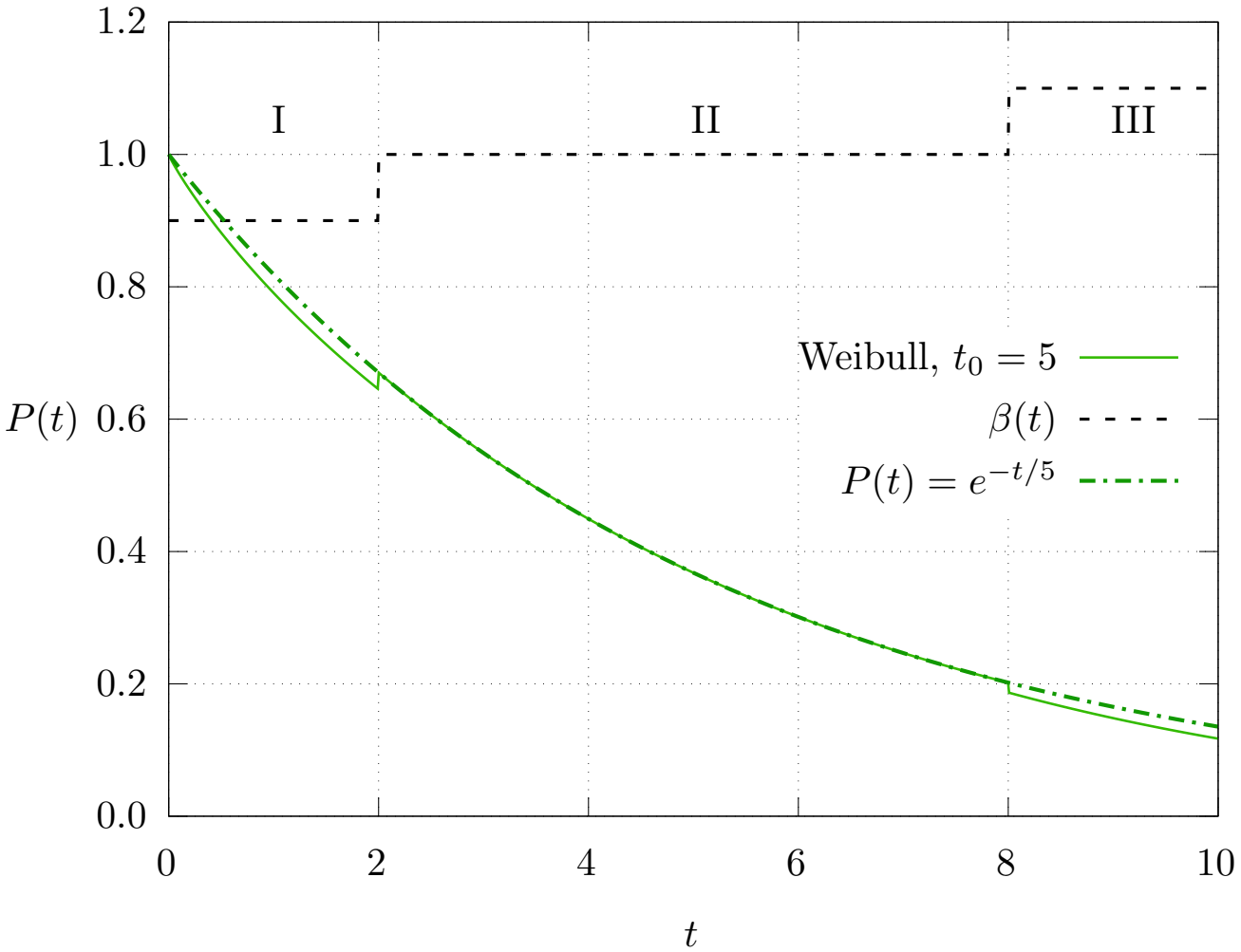


Рис. 3: Сравнение модели Вейбулла с экспоненциальной в случае скачкообразного изменения параметра β

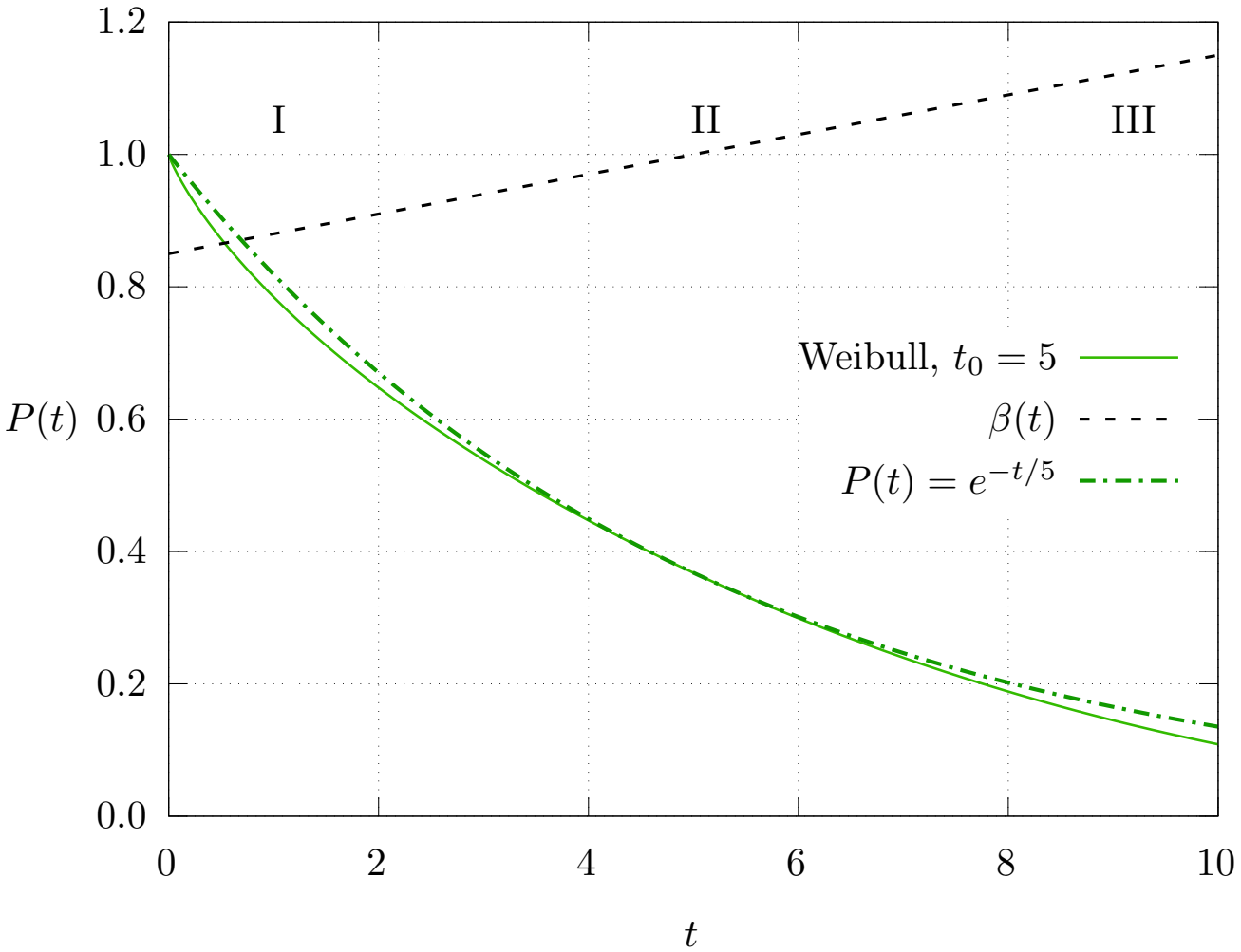


Рис. 4: Сравнение модели Вейбулла с экспоненциальной в случае линейного нарастания параметра β

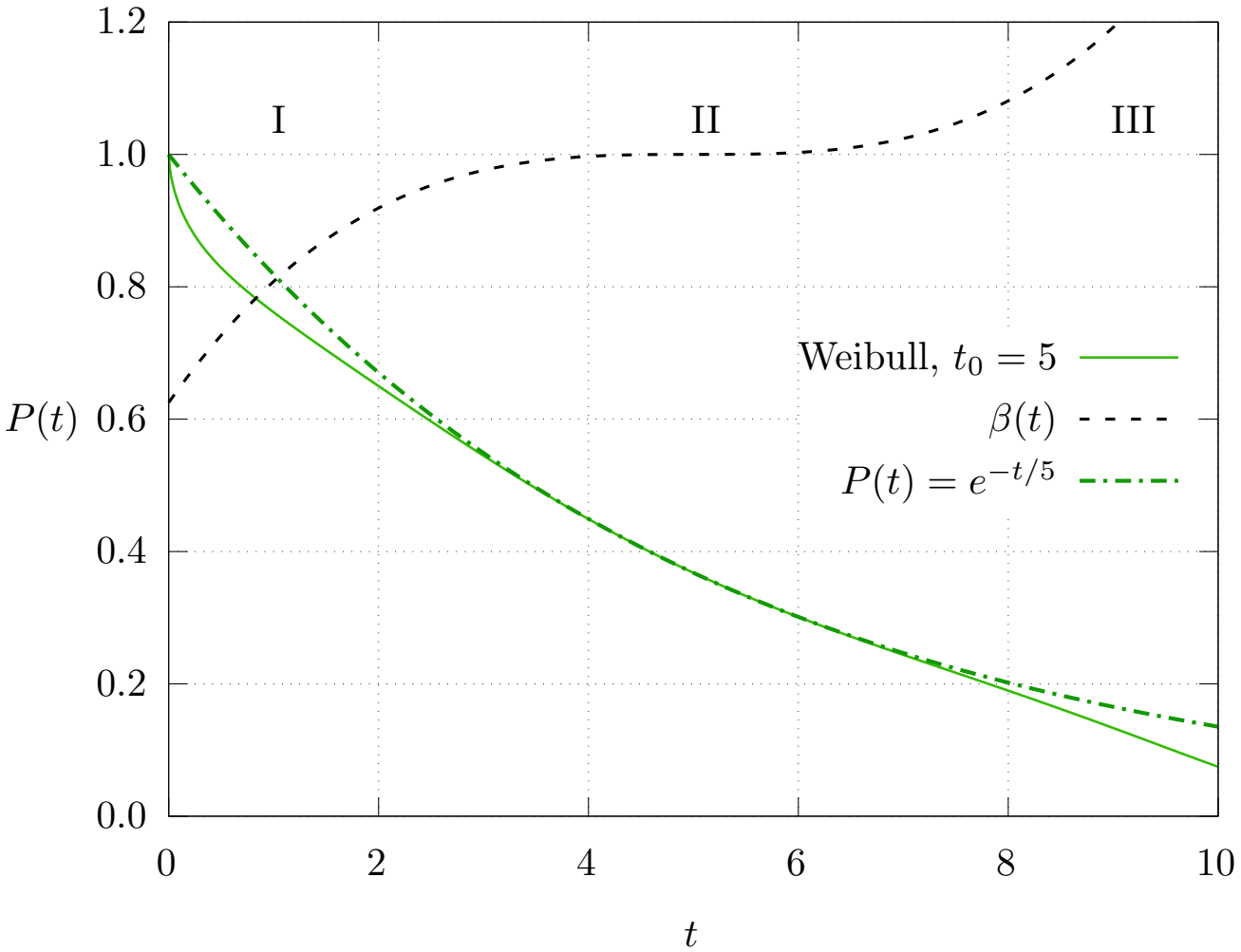


Рис. 5: Сравнение модели Вейбулла с экспоненциальной в случае нелинейного увеличения β

Нормальное распределение — это непрерывное симметричное распределение вероятностей случайной величины $x \in \mathcal{R}$, которое полностью определяется двумя параметрами:

- математическим ожиданием $\mu = \mathbb{M}[x]$ (центром распределения);
- стандартным отклонением σ (шириной распределения).

Связь стандартного отклонения с дисперсией

$$\sigma^2 = \mathbb{D}[x], \tag{27}$$

$$\mathbb{D}[x] = \mathbb{M}\Big[(x - \mathbb{M}[x])^2\Big]. \tag{28}$$

Нормальное распределение возникает, когда случайная величина формируется под воздействием множества **независимых аддитивных (суммируемых)** факторов, каждый из которых вносит малый вклад (ЦПТ — Центральная Предельная Теорема).

$$f_{\mathrm{g}}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \in (-\infty, \infty) \tag{29}$$

Примеры применения нормального распределения

- **Механические узлы и детали:** Точные размеры обработанных деталей (диаметр вала, толщина шайбы). Погрешность складывается из множества независимых факторов: микровибрации станка, неоднородность материала, износ инструмента, температурные деформации.
- **Погрешности измерений:** Ошибки измерительных приборов, тепловой шум в электронных компонентах.

Примечание: Поскольку время или наработка t не могут быть отрицательными ($t \geqslant 0$), нормальное распределение применяется для описания времени до отказа только в том случае, если $\mu \gg 3\sigma$ (вероятность попадания в отрицательную область ничтожно мала).

Говорят, что случайная величина x имеет логнормальное распределение, если её логарифм $\ln x$ распределён нормально. Это асимметричное (скошенное вправо) распределение, определённое на строго положительных значениях.

Плотность вероятности

$$f_{\text{l}}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x > 0 \qquad (30)$$

где μ и σ — это математическое ожидание и стандартное отклонение *логарифма*, а не самой величины x.

Логнормальное распределение возникает, когда случайная величина формируется под воздействием множества **мультипликативных (перемножаемых)** факторов.

- **Время реакции ПО (Latency):** Время отклика системы часто складывается из последовательных этапов (запрос к БД, сетевые задержки, вычисления). Задержка на каждом этапе при этом часто входит в общую задержку множителем, а не слагаемым.
- **Процессы восстановления (MTTR):** Время на поиск неисправности, диагностику и ремонт. Если каждый этап требует времени, зависящего от сложности предыдущего этапа, то общее время имеет логнормальное распределение.
- **Усталостная долговечность:** Количество циклов до разрушения материала при усталости (например, рост микротрещин носит мультипликативный характер).

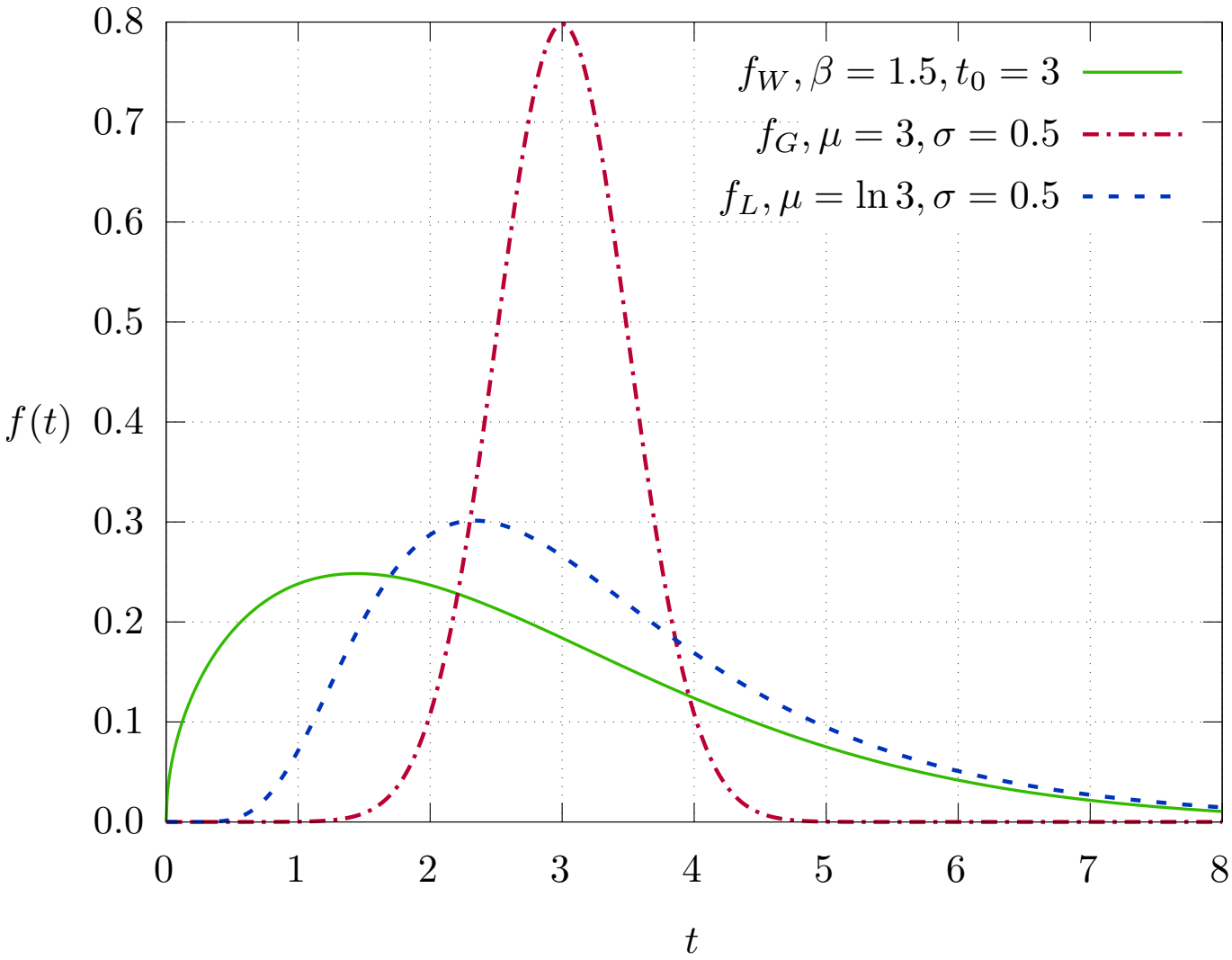


Рис. 6: Сравнение плотности $f(t)$ различных распределений

- **Нормальное:** Аддитивные процессы (сумма независимых случайных возмущений).
- **Логнормальное:** Мультипликативные процессы (произведение независимых случайных факторов).
- **Вейбулла:** Подчиняется **принципу «слабого звена»** (экстремальные значения). Отказ происходит из-за того, что один конкретный дефект или нагрузка превысил предел прочности. Объект состоит из множества элементов, и отказывает тот, что слабее всех.

- **Нормальное:** Определено на всей числовой прямой $(-\infty, \infty)$. Физически некорректно для времени, наработки или размеров, но часто используется даже для них как аппроксимация.
- **Логнормальное и Вейбулла:** Определены только на $[0, \infty)$ (строго говоря, логнормальное распределение справедливо на интервале $(0, \infty)$), что идеально подходит для описания времени до отказа, времени восстановления и задержек.

- **Распределение Вейбулла** обладает уникальной гибкостью благодаря параметру формы β:
  - Если $\beta < 1$: интенсивность отказов *убывает* (что моделирует приработку и ранние отказы из-за скрытых дефектов).
  - Если $\beta = 1$: интенсивность *постоянна* (переходит в экспоненциальное распределение, моделирует случайные отказы).
  - Если $\beta > 1$: интенсивность *возрастает* (моделирует износ и старение).
- **Логнормальное распределение** имеет интенсивность отказов, которая сначала *возрастает*, достигает пика, а затем *убывает*. Оно хорошо описывает процессы старения, но не способно моделировать период приработки (убывающую интенсивность) или случайные отказы.
- **Нормальное распределение** имеет монотонно *возрастающую* интенсивность отказов, что делает его пригодным только для моделирования чёткого периода износа (когда все объекты выходят на ресурс одновременно).

Контрольные вопросы и задания

1. Почему параметр MTBF, как правило, не применим непосредственно к самим микросхемам, но может использоваться для описания надёжности аппаратуры, построенной на их основе?
2. При каких условиях интенсивность отказов $\lambda(t)$ можно считать постоянной?
3. Докажите справедливость формулы (25).
4. Как изменение β в распределении Вейбулла отражает физическое состояние системы?
5. Постройте графики зависимости интенсивности отказов $\lambda(t)$ при нормальном и логнормальном распределении наработки до отказа.