Надёжность информационных систем

Лекции 4–5. Задачи и методы расчёта надёжности

П. А. Макаров





СЫКТЫВКАРСКИЙ
ЛЕСНОЙ
ИНСТИТУТ

23 октября и 6 ноября 2026 г.

Содержание

1. Классификация задач теории надёжности

2. Основные методы расчёта надёжности

3. Аналитические методы

4. Статистические методы

5. Имитационное (Монте-Карло) моделирование

6. Контрольные вопросы и задания

Классификация задач надёжности

- **Прогнозирование:** Оценка показателей на этапе проектирования (на основе конструктивных, технологических и эксплуатационных данных до изготовления или ввода в эксплуатацию объектов).
- **Оценка:** Расчёт показателей по результатам испытаний или эксплуатации.
- **Контроль:** Проверка соответствия показателей надёжности нормативным требованиям (приёмочные, периодические полевые испытания).
- **Оптимизация:** Выбор параметров системы, структуры резервирования, стратегии ТО для максимизации надёжности при тех или иных ограничениях (на стоимость, массу, габариты и т. п.).

Ключевое различие: априорные модели / апостериорные данные.

Основные методы расчёта надёжности

- Аналитические.
- Статистические.
- Имитационное моделирование.

Основаны на математическом описании структуры ИС и законов распределения времени безотказной работы.

- **Точные формулы:** для простых структур (последовательные и параллельные соединения).
- **Декомпозиция:** разложение по главным элементам (условная надёжность).
- **Граничные оценки:** $P_{\text{low}} \leqslant P_{\text{sys}} \leqslant P_{\text{up}}$.
- **Булевы методы:** функция работоспособности, метод непересекающихся путей, диаграммы бинарных решений.

Плюсы: скорость, точность, физическая интерпретация.

Минусы: сложность для большого числа элементов, требование независимости отказов.

Последовательное соединение N элементов

$$P_{\text{sys}} = \prod_{i=1}^{N} P_i. \tag{1}$$

Параллельное соединение N элементов

$$Q_{\text{sys}} = \prod_{i=1}^{N} Q_i = \prod_{i=1}^{N} (1 - P_i). \tag{2}$$

$$P_{\text{sys}} = 1 - Q_{\text{sys}} \quad \Longrightarrow \quad P_{\text{sys}} = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - P_i). \tag{3}$$

В частном случае параллельного соединения двух элементов из формулы (3) следует

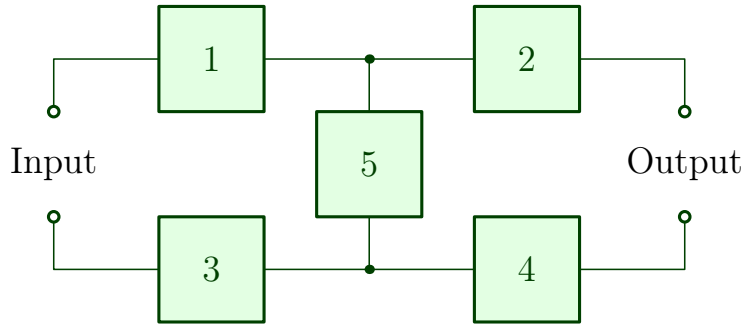
$$P_{\text{sys}} = P_1 + P_2 - P_1 P_2. \tag{4}$$

Система раскладывается на комбинации простых систем по главным элементам (pivotal element). Это приводит к оценке надёжности системы по формуле

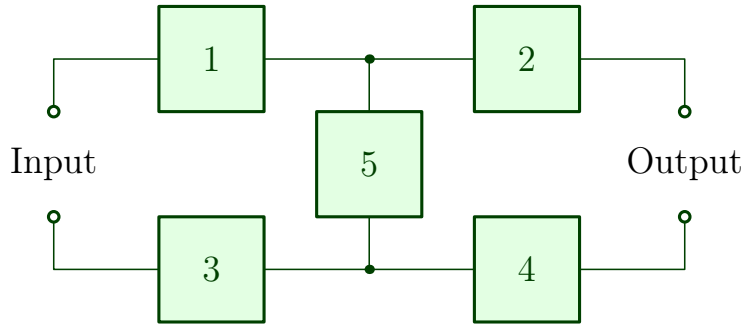
$$P_{\text{sys}} = p_e P_{\text{sys}}\Big|_{e=1} + (1 - p_e) P_{\text{sys}}\Big|_{e=0}, \tag{5}$$

где $P_{\text{sys}}\Big|_{e=1}$ — ВБР системы при условии, что элемент e абсолютно надёжен, т. е. $p_e \equiv 1$, а $P_{\text{sys}}\Big|_{e=0}$ — ВБР системы при условии, что элемент e абсолютно ненадёжен ($p_e \equiv 0$).

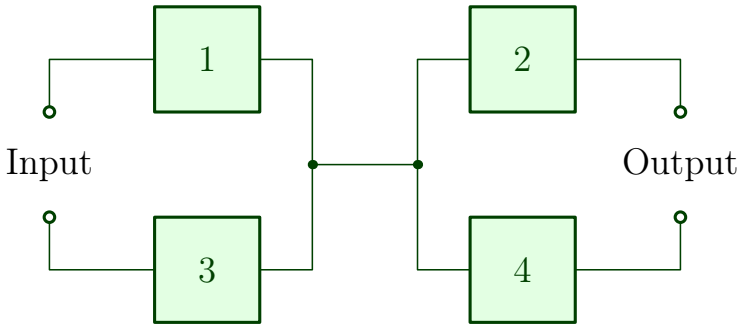
Выбор главного (pivotal) элемента e влияет на скорость сходимости расчётного алгоритма.



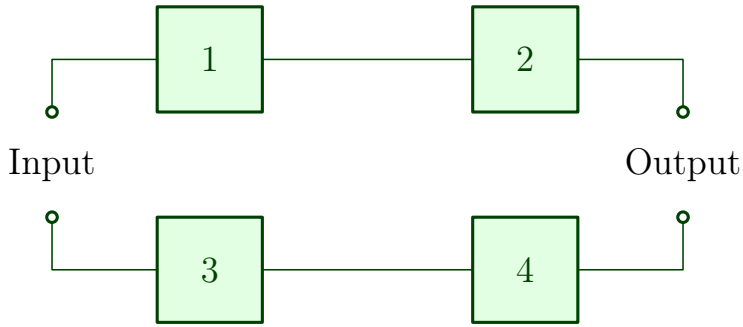
(a) Исходная расчётная схема



(a) Исходная расчётная схема



(b) $X_5 = 1$



(c) $X_5 = 0$

Рис. 1: Применение метода декомпозиции для мостовой схемы из пяти элементов

1. При $X_5 = 1$ схема сводится к двум последовательно соединённым блокам, в каждом из которых элементы соединены параллельно (рис. 1(b)). Примененяем (3) и (1)

$$P_{\text{sys}}\Big|_{e=1} = (P_1 + P_3 - P_1P_3) \cdot (P_2 + P_4 - P_2P_4). \tag{6}$$

2. При $X_5 = 0$ схема распадается на две параллельно-соединённые ветви, каждая из которых представляет собой последовательное соединение элементов (рис. 1(c)). Используя (1) и (3), получаем

$$P_{\text{sys}}\Big|_{e=0} = P_1P_2 + P_3P_4 - P_1P_2P_3P_4. \tag{7}$$

3. Окончательно, подставляя в (5) промежуточные результаты (6) и (7), и считая $p_e = P_5$, получаем

$$\begin{aligned} P_{\text{sys}} = P_5(P_1 + P_3 - P_1P_3)(P_2 + P_4 - P_2P_4) + \\ + (1 - P_5)(P_1P_2 + P_3P_4 - P_1P_2P_3P_4). \end{aligned} \tag{8}$$

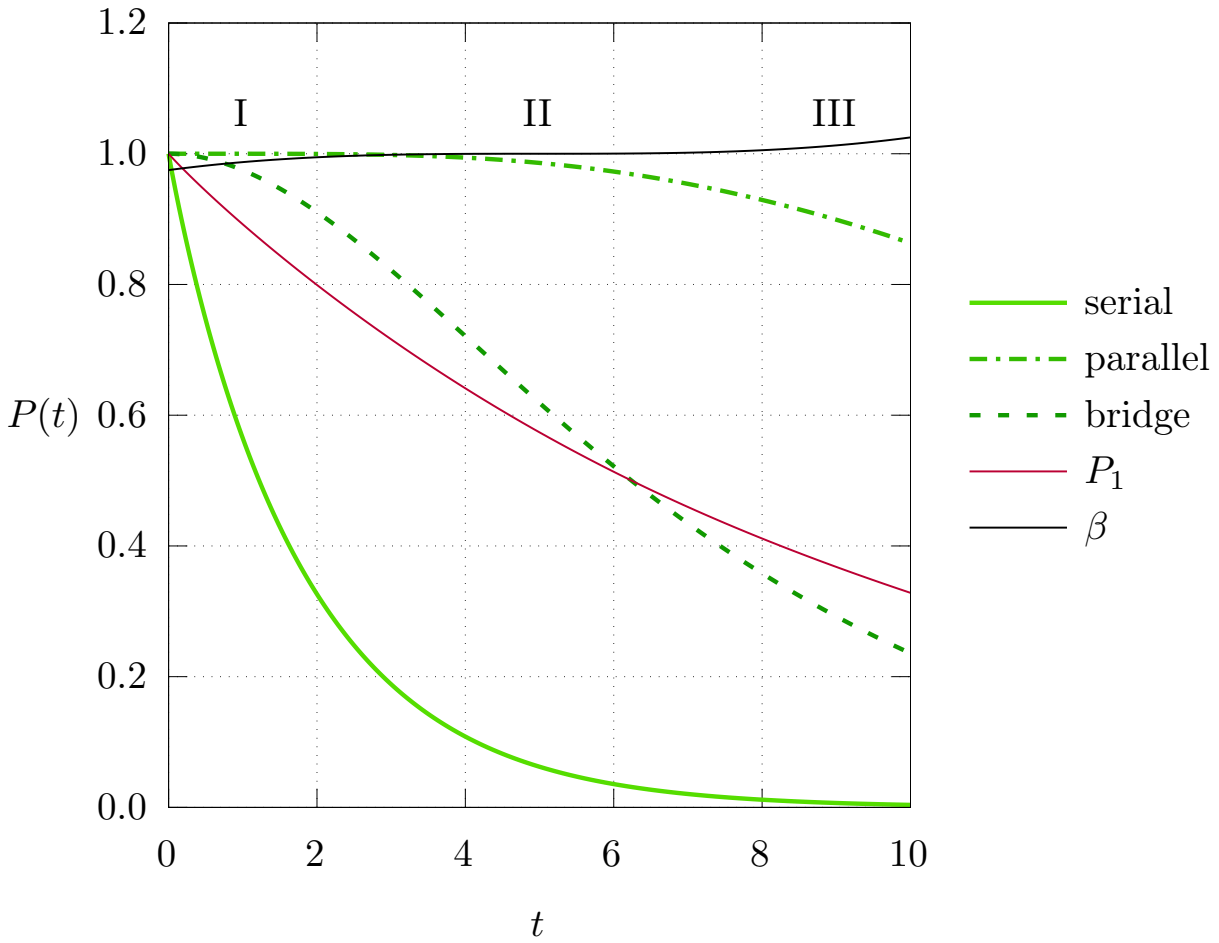


Рис. 2: Сравнение ВБР для различных схем включения пяти одинаковых элементов, работающих согласно модели Вейбулла при $t_0 = 9$

Система питания серверной стойки

В высоконадёжных ЦОД каждый сервер или стойка подключается к двум независимым вводам питания, но между ними есть автоматический выключатель связи (Bus Tie Breaker).

- Input — городская электрическая сеть / генераторы.
- 1 — ввод питания от электрического щита A (кабель + автомат).
- 2 — блок распределения питания PDU A (Power Distribution Unit).
- 3 — ввод питания от щита B (резервный кабель + автомат).
- 4 — блок распределения питания PDU B.
- 5 — межсекционный выключатель между PDU A и PDU B.
- Output — серверы.

Сеть хранения данных (SAN — Storage Area Network) с Multipath I/O

Сервер подключён к массиву дисков (реализующему SAN) через два независимых адаптера HBA (Host Bus Adapter) и два коммутатора (FS — Fabric Switch), чтобы исключить единую точку отказа.

- Input — сервер (приложение).
- 1 — HBA-порт 1 и кабель до коммутатора 1.
- 2 — коммутатор FS 1.
- 3 — HBA-порт 2 и кабель до коммутатора 2.
- 4 — коммутатор FS 2.
- 5 — магистральный кабель ISL (Inter-Switch Link), соединяющий коммутаторы FS 1 и FS 2.
- Output — контроллеры SAN и дисковый массив.

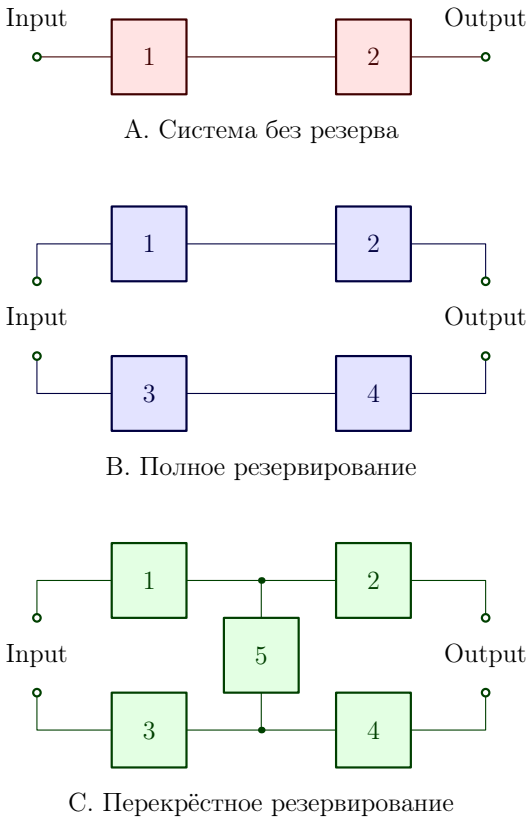
Микросервисная архитектура с fallback-маршрутизацией

Представим систему обработки платежей, где важно не потерять транзакцию, если отказал один из микросервисов.

- Input — API-шлюз (получает запрос от клиента).
- 1 — канал связи с микросервисом A (основной процессинг).
- 2 — микросервис A.
- 3 — канал связи с микросервисом B (резервный процессинг / асинхронная очередь).
- 4 — микросервис B.
- 5 — общая шина данных / кэш (например, Redis или Kafka), куда оба микросервиса могут писать и читать состояние.
- Output — успешная транзакция.

Теорема о перекрёстном резервировании

Перекрёстное резервирование повышает надёжность системы, но создаёт новые точки уязвимости.



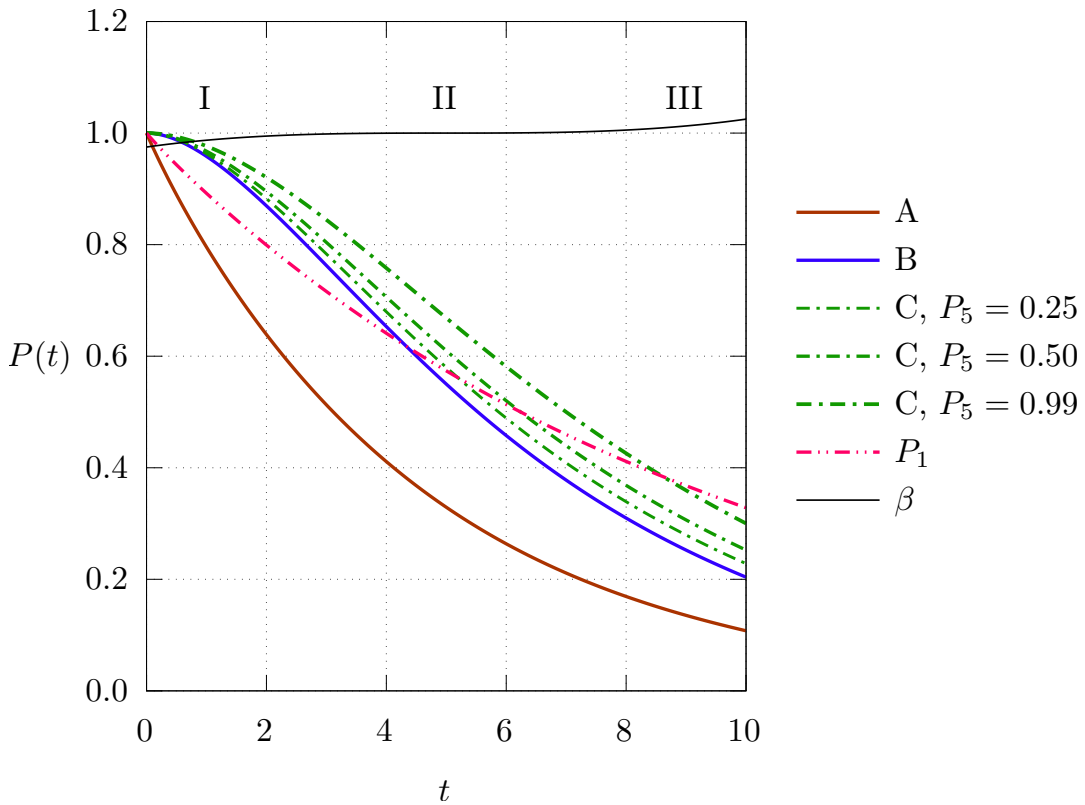


Рис. 3: $P_{1,2,3,4} = P(t) = \exp(t/t_0)^{\beta}$, $t_0 = 9$ и $P_5 = \text{const}$

Дают диапазон значений $P_{\text{low}} \leqslant P_{\text{sys}} \leqslant P_{\text{up}}$ в тех случаях, когда точное решение получить затруднительно. P_{low} и P_{up} строятся по минимальным путям и минимальным сечениям (или срезам).

Почему оценки P_{low} и P_{up} вообще возникают?

Дают диапазон значений $P_{\text{low}} \leqslant P_{\text{sys}} \leqslant P_{\text{up}}$ в тех случаях, когда точное решение получить затруднительно. P_{low} и P_{up} строятся по минимальным путям и минимальным сечениям (или срезам).

Почему оценки P_{low} и P_{up} вообще возникают?

Мы знаем, что

$$\mathbb{P}\{\text{сист. раб.}\} = \mathbb{P}\left\{\text{работоспособно } \bigcup_k j_k\right\} = P\left(\bigcup_k X_k\right), \quad (9)$$

однако пути j_k в общем случае пересекаются, так как могут содержать одинаковые элементы. Следовательно события X_k (состоящие в том, что путь j_k работоспособен), вероятность исхода которых мы оцениваем в правой части равенства (9), **зависимы** (или **положительно скоррелированы**). Формулы полного сложения вероятностей для зависимых событий достаточно громоздкие и сложные (если их вообще можно получить) $\Longrightarrow$ придуманы граничные оценки, опирающиеся на «пессимистичные» допущения, с помощью которых сложную систему с пересечениями можно заменить более простой.

Опр. 1. ***Минимальный путь*** / ***Minimal path*** **:** Это минимальный набор элементов, одновременная работа которых гарантирует, что система работоспособна.
Примечание: Минимальность здесь означает, что если убрать из этого набора хоть один элемент, то система становится неработоспособной.

Главное свойство: Система работает тогда и только тогда, когда работает хотя бы один минимальный путь.

Опр. 2. ***Минимальное сечение (или срез)*** / ***Minimal cut*** **:** Это минимальный набор элементов, одновременный отказ которых гарантирует неработоспособность системы.
Примечание: При этом реализуется логика операции конъюнкция для отказа системы.

Главное свойство: Система отказывает тогда и только тогда, когда отказывает хотя бы одно минимальное сечение.

При таком подходе делаются максимально пессимистичные допущения, полностью игнорирующие избыточность системы.

1. **Нижняя оценка (пессимистичный взгляд на успех).** Система точно работает, только если работают все минимальные пути одновременно (перестраховываемся на случй, если хоть один путь не работает).

$$P_{\text{low}} = \prod_k P(j_k). \tag{10}$$

2. **Верхняя оценка (пессимистичный взгляд на отказ).** Система точно откажет, только если откажут все минимальные сечения одновременно.

$$Q_{\min} = \prod_k Q(s_k). \tag{11}$$

Следовательно

$$P_{\text{up}} = 1 - Q_{\min} = 1 - \prod_k Q(s_k). \tag{12}$$

Таблица 1: Данные для граничных оценок надёжности моста Уитстона

k	j_k	$P(j_k)$	s_k	$Q(s_k)$
1	$1 \to 2$	$P_1 P_2$	$\{1, 3\}$	$(1 - P_1)(1 - P_3)$
2	$3 \to 4$	$P_3 P_4$	$\{2, 4\}$	$(1 - P_2)(1 - P_4)$
3	$1 \to 5 \to 4$	$P_1 P_4 P_5$	$\{1, 5, 4\}$	$(1 - P_1)(1 - P_4)(1 - P_5)$
4	$3 \to 5 \to 2$	$P_2 P_3 P_5$	$\{3, 5, 2\}$	$(1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_5)$

Таблица 2: Результаты строгих оценок для нескольких мостов

Type	P_i	P_{sys}	P_{low}	P_{up}
A	$\{P_i\}_1^5 = 0.5$	0.5	0.001	0.999
B	$\{P_i\}_1^4 = 0.5$, $P_5 = 0.9$	0.55	0.003	0.999
C	$\{P_i\}_1^4 = 0.9$, $P_5 = 0.5$	0.972	0.108	0.999
D	$\{P_i\}_1^5 = 0.9$	0.978	0.349	0.999

Таблица 2: Результаты строгих оценок для нескольких мостов

Type	P_i	P_{sys}	P_{low}	P_{up}
A	$\{P_i\}_1^5 = 0.5$	0.5	0.001	0.999
B	$\{P_i\}_1^4 = 0.5$, $P_5 = 0.9$	0.55	0.003	0.999
C	$\{P_i\}_1^4 = 0.9$, $P_5 = 0.5$	0.972	0.108	0.999
D	$\{P_i\}_1^5 = 0.9$	0.978	0.349	0.999

Вывод: Как видно из таблицы 2, полученные оценки верны (истинные вероятности P_{sys}, вычисленные согласно точной формуле (8) действительно лежат в интервале $P_{\text{sys}} \in [P_{\text{low}}, P_{\text{up}}]$), однако они **чрезвычайно широкие** $\Longrightarrow$ на практике используются другие методы, дающие более точные (узкие) границы. К их числу относятся: «инженерные» оценки, основанные на неравенстве Буля; формула включений-исключений; метод непересекающихся путей и т. п.

Функция работоспособности (структурная функция)

Булева функция, ставящая в соответствие вектору состояний элементов системы $\mathbf{X} = (X_1, \ldots, X_N) = \{0,1\}^N$ состояние работоспособности системы (1 – работоспособное состояние, 0 — отказ)

$$\phi(\mathbf{X}) : \{0,1\}^N \to \{0,1\}. \tag{13}$$

Надёжность системы

$$P_{\text{sys}} = \mathbb{M}[\phi(\mathbf{X})] = \sum_{\mathbf{x}} \phi(\mathbf{x}) \prod_{i=1}^{N} p_i^{x_i} (1-p_i)^{1-x_i}. \tag{14}$$

Веб-кластер

- Хранилище данных S.
- Приложение A_1 на сервере 1 или приложение A_2 на сервере 2.
- Каждому серверу необходима своя система питания B_1, B_2.

Функция работоспособности в этом случае:

$$\phi(\mathbf{X}) = S \wedge ((B_1 \wedge A_1) \vee (B_2 \wedge A_2)). \tag{15}$$

Таблица 3: Работоспособные конфигурации и их вероятности для функции (15)

S	A_1	B_1	A_2	B_2	$P_{\mathbf{x}}$
1	1	1	1	1	$P_S P_{A1} P_{B1} P_{A2} P_{B2}$
1	1	1	1	0	$P_S P_{A1} P_{B1} P_{A2} (1 - P_{B2})$
1	1	1	0	1	$P_S P_{A1} P_{B1} (1 - P_{A2}) P_{B2}$
1	1	1	0	0	$P_S P_{A1} P_{B1} (1 - P_{A2})(1 - P_{B2})$
1	1	0	1	1	$P_S P_{A1} (1 - P_{B1}) P_{A2} P_{B2}$
1	0	1	1	1	$P_S (1 - P_{A1}) P_{B1} P_{A2} P_{B2}$
1	0	0	1	1	$P_S (1 - P_{A1})(1 - P_{B1}) P_{A2} P_{B2}$

Таблица 3: Работоспособные конфигурации и их вероятности для функции (15)

S	A_1	B_1	A_2	B_2	$P_{\mathbf{x}}$
1	1	1	1	1	$P_S P_{A1} P_{B1} P_{A2} P_{B2}$
1	1	1	1	0	$P_S P_{A1} P_{B1} P_{A2} (1 - P_{B2})$
1	1	1	0	1	$P_S P_{A1} P_{B1} (1 - P_{A2}) P_{B2}$
1	1	1	0	0	$P_S P_{A1} P_{B1} (1 - P_{A2})(1 - P_{B2})$
1	1	0	1	1	$P_S P_{A1} (1 - P_{B1}) P_{A2} P_{B2}$
1	0	1	1	1	$P_S (1 - P_{A1}) P_{B1} P_{A2} P_{B2}$
1	0	0	1	1	$P_S (1 - P_{A1})(1 - P_{B1}) P_{A2} P_{B2}$

Булевы методы эффективны при автоматизации расчётов надёжности. Наиболее часто встречаются два следующих варианта.

- Метод непересекающихся путей (SDP — Sum of Disjoint Products).
- Диаграммы бинарных решений (BDD — Binary Decision Diagrams).

- Все элементы системы равнонадёжны: $\lambda_i = \lambda_{eq}$;
- Интенсивности отказов не зависят от времени: $\lambda_{eq} = \text{const}$;
- Отказ любого элемента приводит к отказу всей системы.

В этом случае результирующая интенсивность отказов:

$$\lambda_{sys} = N\lambda_{eq}, \tag{16}$$

где N — общее число элементов.

Основные сценарии применения

1. Раннее концептуальное проектирование.
2. Сравнительный анализ надёжности отдельных вариантов системы.
3. Расчёт нормативных данных по надёжности отдельных подсистем.
4. Определение минимально допустимого уровня надёжности элементов проектируемой системы.

- Все элементы данного типа равнонадёжны, т. е. величины интенсивности отказов λ_i для этих элементов одинаковы;
- Все элементы работают в номинальном (нормальном) режиме ($\lambda_i = \lambda_{0i}$), предусмотренном техническими условиями;
- Интенсивности отказов всех элементов не зависят от времени, т.е. в течение срока службы у элементов, входящих в изделие, отсутствует старение и износ, следовательно, $\lambda_{0i}(t) = \mathrm{const}$;
- Отказы элементов изделия являются событиями случайными и независимыми;
- Все элементы изделия работают одновременно.

$$\lambda_i = \lambda_i(T_0, K, v, \varphi, \dots), \tag{17}$$

где T_0 — температура окружающей среды, K — электрическая нагрузка, а v и φ — параметры механических и климатических воздействий.

$$\lambda_i = \alpha_i \prod_j k_i^{(j)} \lambda_{0i}. \tag{18}$$

Для современных полупроводниковых компонентов (CPU, NVMe, DDR5) зависимости $\alpha_i(T_0, K)$ опираются на соответствующие физико-технологические модели.
Закон Аррениуса, в частности, может быть представлен в следующем виде

$$\lambda_{\mathrm{SSD}}(T_0) = \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}} - \frac{1}{T_0}\right)\right]. \tag{19}$$

Цензурирование (censoring) — это ситуация в которой точное время безотказной работы объекта t_i не наблюдается в полном объёме (для всех элементов выборки), но известно, что t_i превышает некоторый порог наблюдения t_c. Формально, для i-го элемента наблюдается пара (t_i, δ_i), где

$$\delta_i = \begin{cases} 1, & \text{если отказ зафиксирован в момент } t_i, \\ 0, & \text{если элемент работал до } t_c \text{ и был изъят из испытаний.} \end{cases}$$

При $\delta_i = 0$ известно лишь, что $t_i \geqslant t_c$.

Типы цензурирования

- **Тип I (по времени).** Испытания останавливаются в фиксированный момент $T_{\max}$.
- **Тип II (по числу отказов).** Испытания останавливаются после возникновения d отказов.
- **Случайное/прогрессивное.** Объекты могут выходить из выборки моменты по причинам, не связанным с отказами.

Игнорирование цензурирования приводит к искажённым оценкам величин λ, $MTTF$ и т. п.

При цензурировании полные данные об отказах не наблюдаются $\Longrightarrow$ прямое вычисление $\lambda(t)$ невозможно!
Вместо этого используются приближённые подходы:

- Параметрические;
- Непараметрические (основанные на оценке кумулятивной интенсивности).

Рассмотрим только один параметрический подход — **метод максимального правдоподобия (ММП)**.

1. Предполагается, что ВБР подчиняется некоторому параметрическому распределению $P(t;\theta)$ с параметрами θ.

2. Для данной схемы цензурирования определяется функция правдоподобия $L(\theta)$.

3. Из условия максимальности

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\ln L(\theta) = 0 \tag{20}$$

находятся оценки параметров $\widehat{\theta}$.

4. Точечная интенсивность вычисляется по теоретической формуле для выбранного распределения при найденных на предыдущем этапе параметрах $\widehat{\lambda}(t) = \lambda(t;\widehat{\theta})$.

- **Цензурирование по времени:**

$$L_I(\theta) = \prod_{i=1}^{n} f(t_i;\theta) \cdot \prod_{j=1}^{N_0-n} P(T_{\max};\theta). \qquad (21)$$

- **Цензурирование по числу отказов:**

$$L_{II}(\theta) = \prod_{i=1}^{d} f(t_i;\theta) \cdot \prod_{j=1}^{N_0-d} P(t_d;\theta). \qquad (22)$$

В этом частном случае $P(t;\theta \equiv \lambda) = e^{-\lambda t}$ и, поскольку

$$f(t) = -\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \lambda\, e^{-\lambda t},$$

имеем

$$L_I(\lambda) = \lambda^n \exp\left[-\lambda\left(\sum_{i=1}^{n} t_i + (N_0 - n)\, T_{\max}\right)\right], \qquad (23)$$

$$L_{II}(\lambda) = \lambda^d \exp\left[-\lambda\left(\sum_{i=1}^{d} t_i + (N_0 - d)\, t_d\right)\right]. \qquad (24)$$

Условие (20) при этом даёт

$$\frac{\partial \ln L_I(\lambda)}{\partial \lambda} = \frac{n}{\widehat{\lambda}_I} - \left(\sum_{i=1}^{n} t_i + (N_0 - n) T_{\max} \right) = 0, \qquad (25)$$

$$\frac{\partial \ln L_{II}(\lambda)}{\partial \lambda} = \frac{d}{\widehat{\lambda}_{II}} - \left(\sum_{i=1}^{d} t_i + (N_0 - d) t_d \right) = 0. \qquad (26)$$

Точечные оценки интенсивности отказов

$$\widehat{\lambda}_I = \frac{n}{\sum\limits_{i=1}^{n} t_i + (N_0 - n) T_{\max}}, \qquad (27)$$

$$\widehat{\lambda}_{II} = \frac{d}{\sum\limits_{i=1}^{d} t_i + (N_0 - d) t_d}. \qquad (28)$$

Общее определение

Доверительным интервалом называют интервал $[x_L, x_U]$, накрывающий истинное значение величины x с заданной доверительной вероятностью $1 - \alpha$ (обычно 0.9 или 0.95) $P(x_L \leqslant x \leqslant x_U) = 1 - \alpha$. Доверительный интервал строится через распределение χ^2 (частный случай Г-распределения).

Для экспоненциального закона сумма n независимых времён наработки до отказа имеет распределение $\Gamma(n, \lambda)$. Суммарная наработка при этом описывается статистической величиной $2\lambda T_{\text{sum}}$, которая подчиняется распределению χ^2 с $2n$ степенями свободы ($2\lambda T_{\text{sum}} \sim \chi^2_{2n}$). Поэтому для интенсивности отказов имеем

$$\frac{\chi^2_{\alpha/2,2n}}{2T_{\text{sum}}} \leqslant \lambda \leqslant \frac{\chi^2_{1-\alpha/2,2n}}{2T_{\text{sum}}}. \tag{29}$$

Методы определения $\chi^2_{\alpha/2,2n}$ и $\chi^2_{1-\alpha/2,2n}$

- Специальные таблицы;
- Приближённые аппроксимации (Корниша — Фишера, Голдштейна и т. п.);
- С помощью специализированных библиотек (в частности, библиотека `scipy` для языка Python предоставляет для этого функцию `stats.chi2.ppf()`)

Зная границы доверительного интервала интенсивности отказов (29) можно рассчитать доверительные интервалы и других величин. В частности,

$$MTTF_L = \frac{1}{\lambda_U}, \quad MTTF_U = \frac{1}{\lambda_L} \tag{30}$$

и

$$P_L(t) = \exp(-\lambda_U t), \quad P_U(t) = \exp(-\lambda_L t). \tag{31}$$

Дано: Испытания $N_0 = 20$ серверов, $T_{\max} = 5\,000$ ч. Известно, что отказали $n = 3$ сервера на 1 200, 3 400, 4 100 ч, а остальные остались работоспособны.

Задача: Оценить $\widehat{\lambda}$ и 90% доверительный интервал.

Дано: Испытания $N_0 = 20$ серверов, $T_{\max} = 5\,000$ ч. Известно, что отказали $n = 3$ сервера на 1 200, 3 400, 4 100 ч, а остальные остались работоспособны.
Задача: Оценить $\widehat{\lambda}$ и 90% доверительный интервал.
Решение (начало):

1. Определяем суммарную наработку

$$T_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{n} t_i + (N_0 - n)\,T_{\max} =$$
$$= 1\,200 + 3\,400 + 4\,100 + 17 \cdot 5\,000 = 93\,700 \text{ ч.}$$

2. По формуле (27) определяем точечную интенсивность отказов

$$\widehat{\lambda} = \frac{n}{T_{\text{sum}}} = \frac{3}{93\,700} \approx 3.20 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Решение (продолжение):

3. Находим α исходя из уровня доверительной вероятности

$$P = 1 - \alpha = 0.9 \quad \Longrightarrow \quad \alpha = 0.1.$$

4. Определяем квантили распределения χ^2

$$\chi^2_{0.05,6} = 1.64, \quad \chi^2_{0.95,6} = 12.59.$$

5. С помощью (29) оцениваем границы доверительного интервала для интенсивности отказов

$$\lambda_L = \frac{\chi^2_{0.05,6}}{2T_{\text{sum}}} \approx 8.73{\cdot}10^{-6}\ \text{ч}^{-1}, \quad \lambda_U = \frac{\chi^2_{0.95,6}}{2T_{\text{sum}}} \approx 6.72{\cdot}10^{-5}\ \text{ч}^{-1}.$$

6. По найденным значениям $\widehat{\lambda}$, λ_L и λ_U оцениваем ВБР.

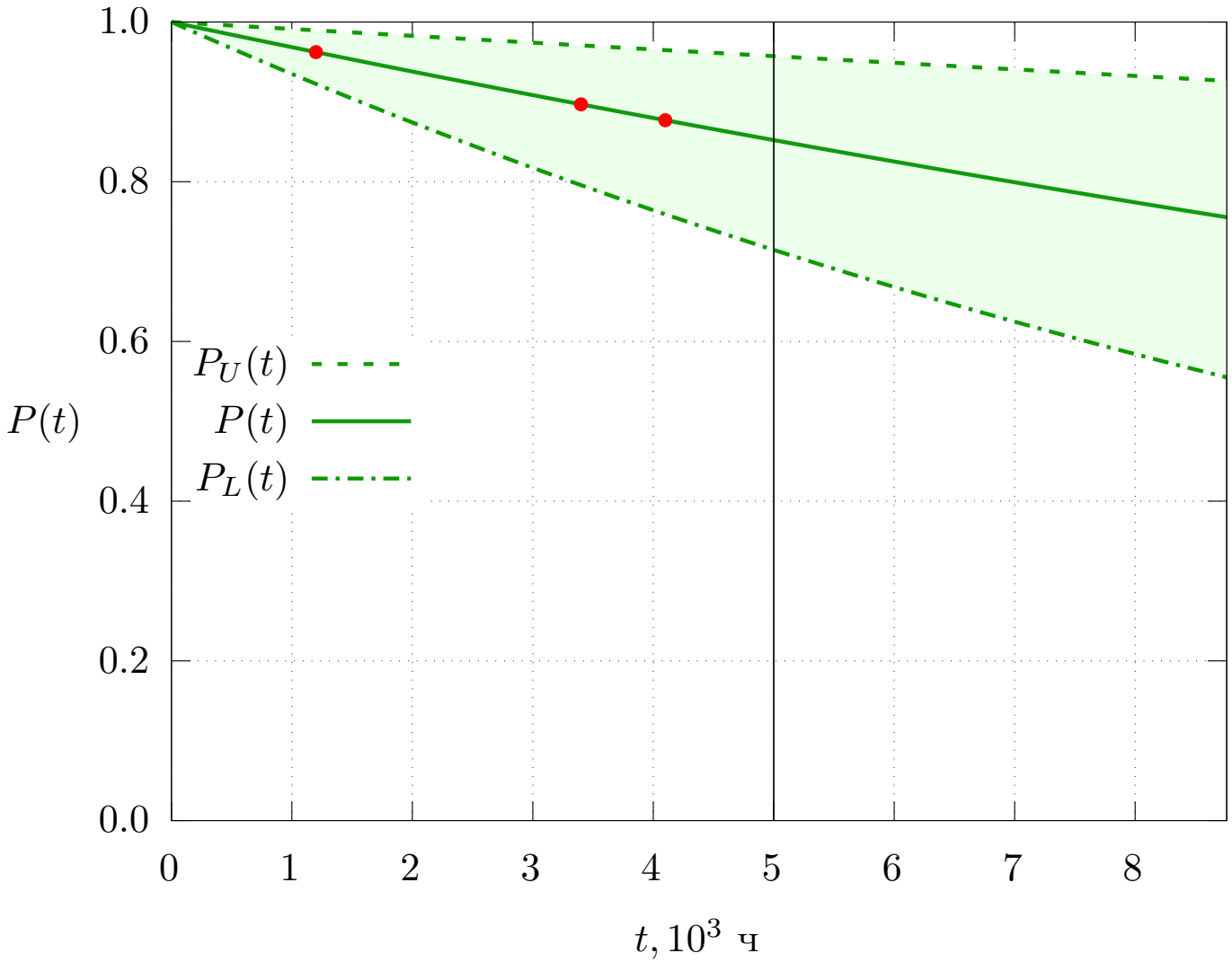


Рис. 4: Графические представление результатов решения для ВБР

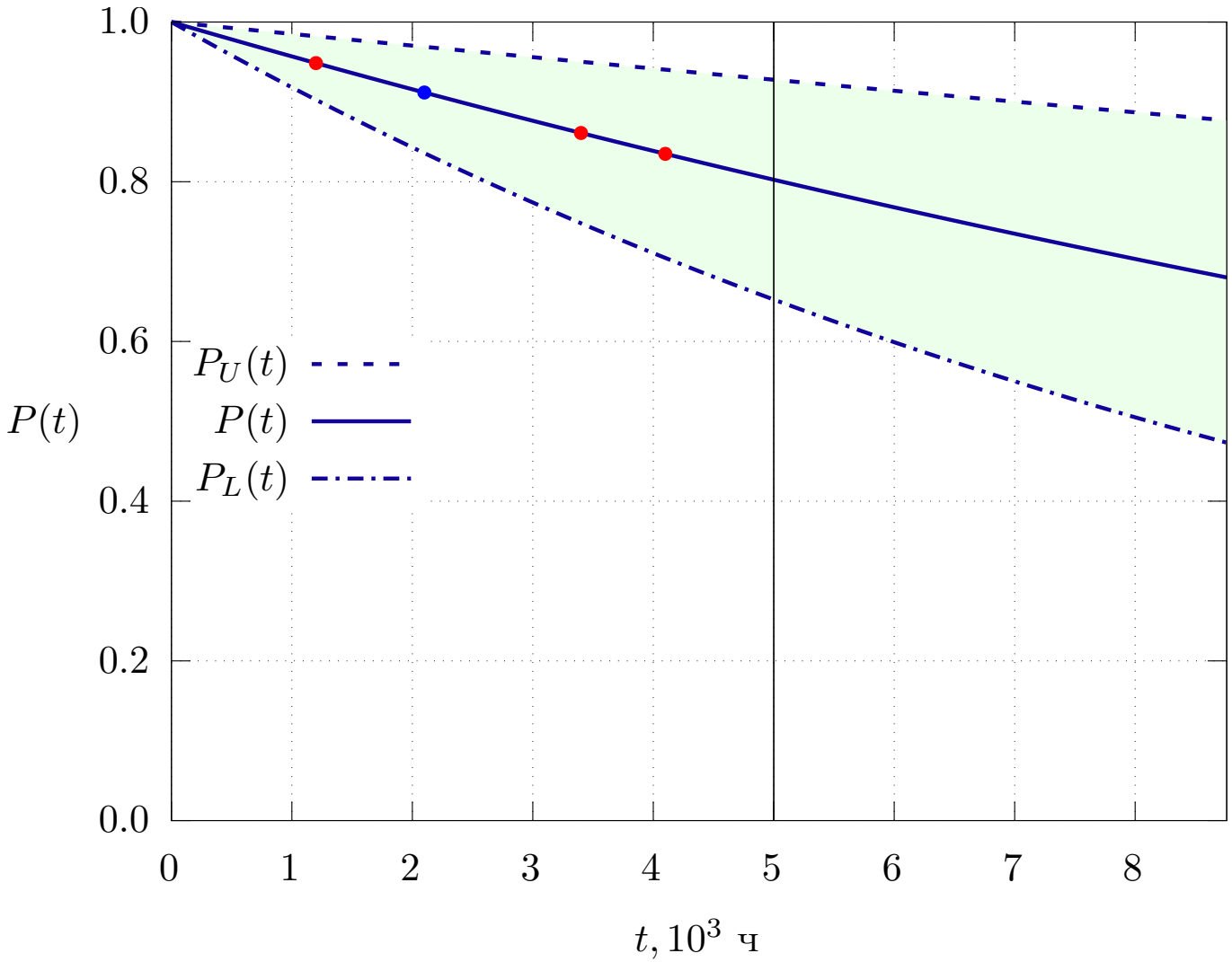


Рис. 5: Решение для случая $n = 4$ при прочих равных условиях

Общий алгоритм моделирования

1. Генерация времени отказа каждого элемента системы по заданному закону.
2. Проверка состояния работоспособности системы по структурной схеме. Если произошёл отказ системы — фиксация времени отказа.
3. Многократное «проигрывание» жизненного цикла системы ($N \sim 10^4 - 10^6$).
4. Оценка показателей надёжности системы $P(t)$, $MTTF$, K_g (и других) как выборочных статистических средних.

Точность оценки $\sim 1/\sqrt{N}$.

Применяется:

- При сложных зависимостях между элементами системы.
- Для нестационарных или неэкспоненциальных законов распределения.
- При наличии восстановлений, приоритетов ремонта, ограниченных ресурсов.

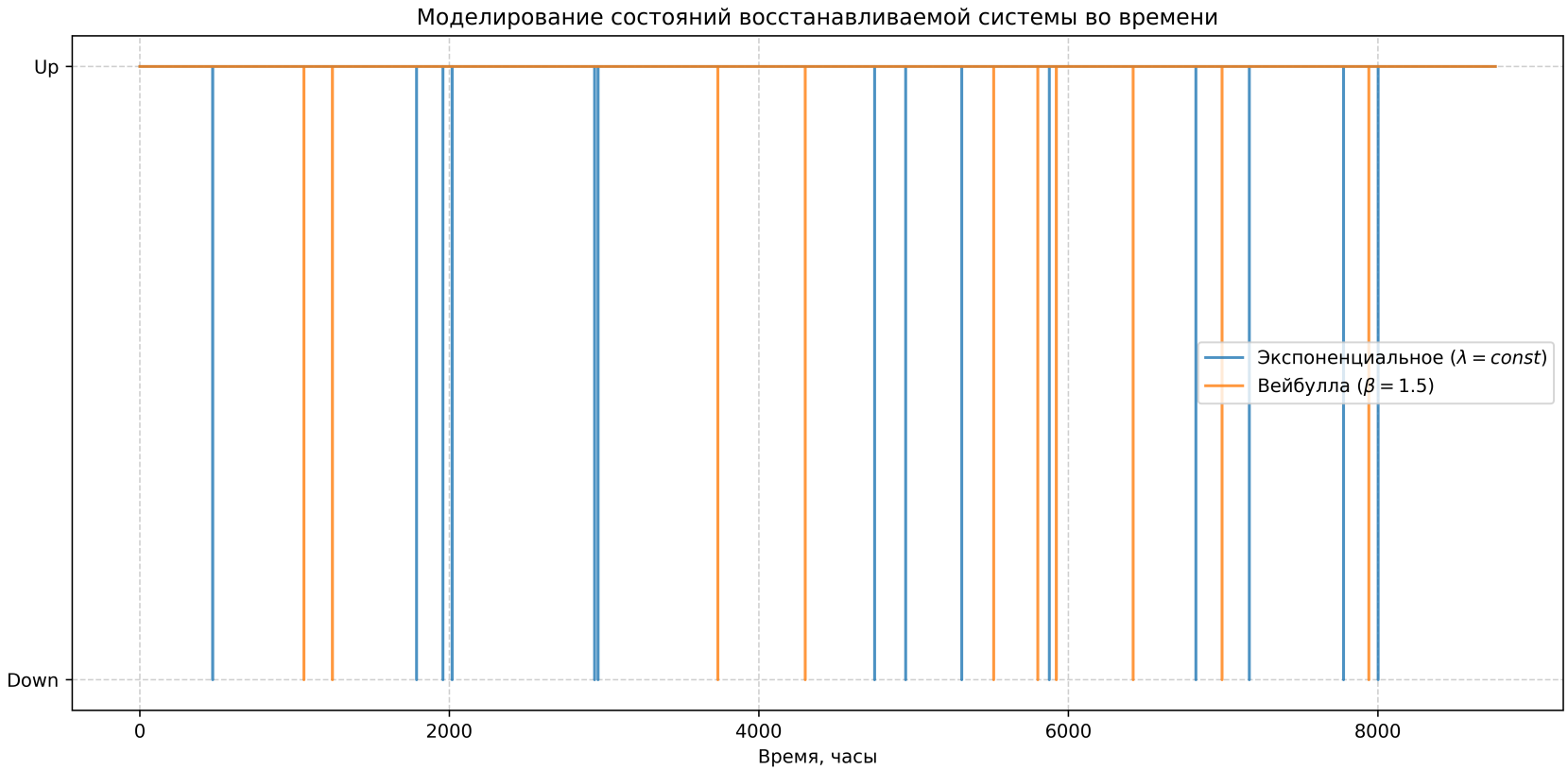


Рис. 6: Оценка временных характеристик различных состояний восстанавливаемых систем

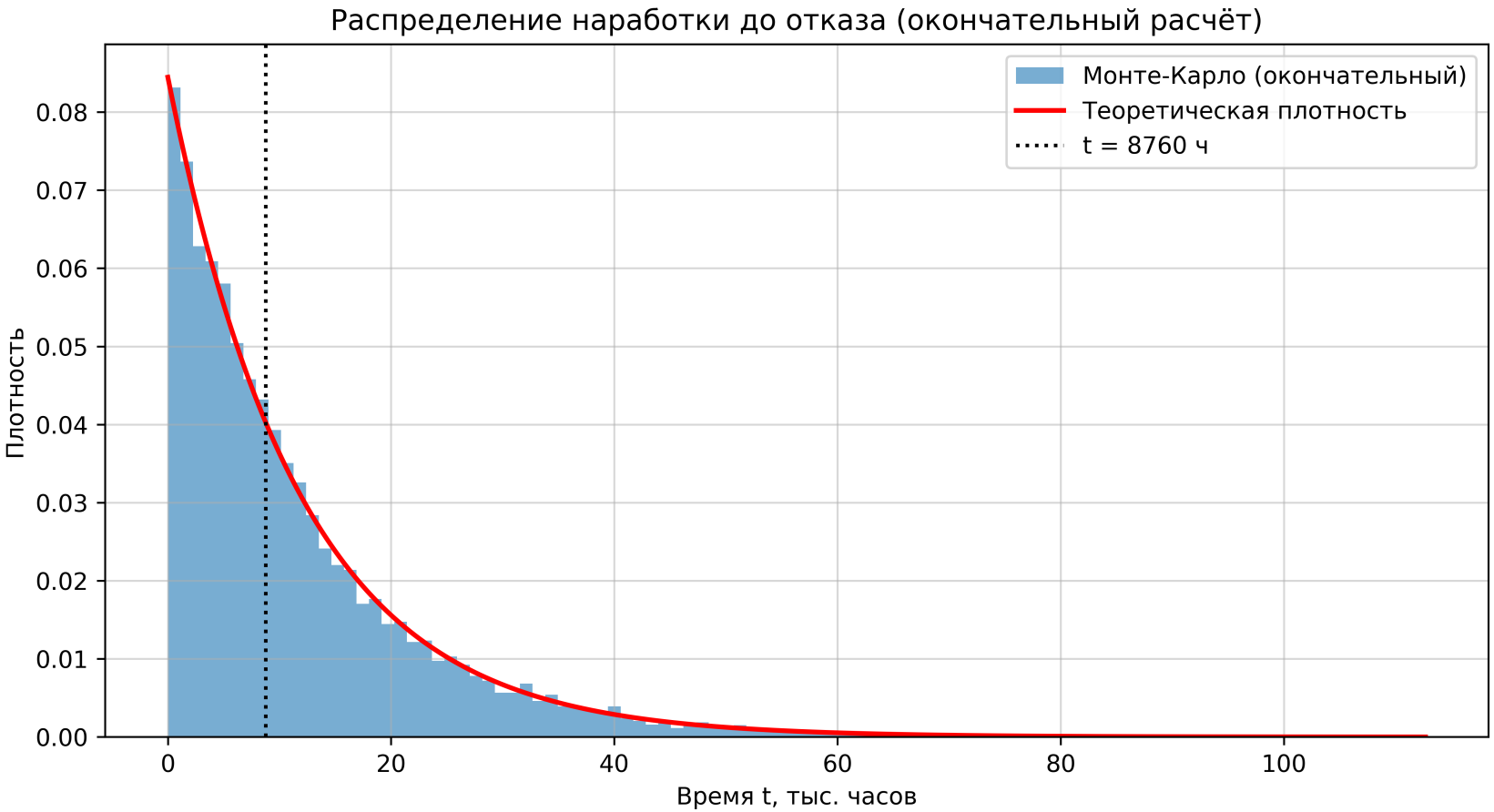


Рис. 7: Сравнение теоретических оценок с результатами моделирования

Контрольные вопросы и задания

1. Чем аналитический метод отличается от статистического?
2. Почему цензурирование увеличивает дисперсию оценок?
3. При каком числе компонентов аналитический расчет становится непрактичным?
4. Как проверить адекватность модели экспоненциального распределения?