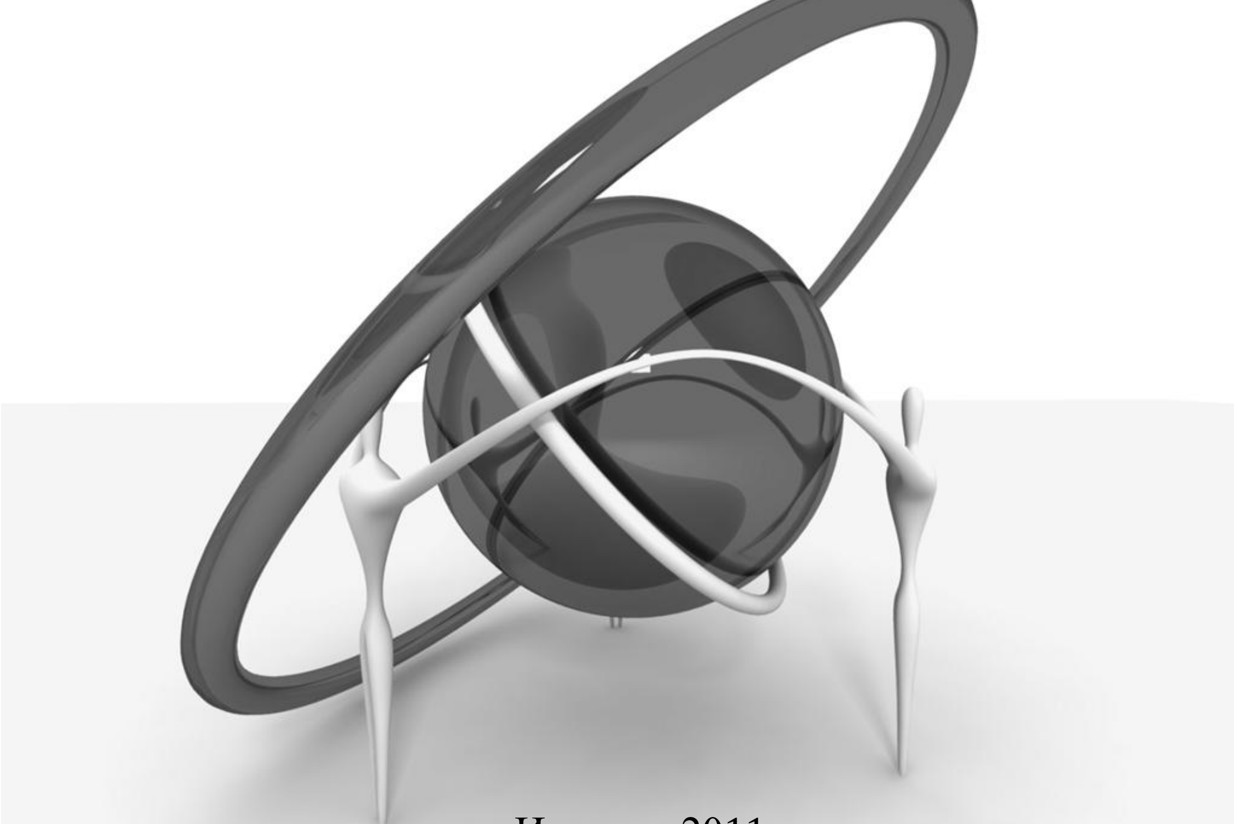
ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ОТКАЗАМИ



Иваново 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Ивановская государственная текстильная академия»
(ИГТА)

Кафедра технологии машиностроительного производства

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ОТКАЗАМИ

Методические указания для практических занятий

Иваново 2011

Предлагаемые методические указания предназначены для организации аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих дисциплины «Надежность машин», «Основы теории надежности», «Надежность бытовых машин и приборов». Указания содержат теоретические сведения по количественным показателям безотказности изделий, отказы которых описываются различными статистическими законами, примеры решения задач, задания для аудиторной и самостоятельной работы.

Составители: канд. техн. наук, проф. С.А. Егоров,
канд. физ.-мат. наук, доц. Н.Е. Егорова

Научный редактор д-р техн. наук, проф. Н.А. Коробов
Редактор И.Н. Худякова
Корректор К.А. Торопова

Подписано в печать 30.06.2011.
Формат 1/16 60×84. Бумага писчая. Плоская печать.
Усл. печ. л. 1,63. Уч-изд. л. 1,56. Тираж 100 экз.
Заказ № ______

Редакционно-издательский отдел
Ивановской государственной текстильной академии
Копировально-множительное бюро
153000 г. Иваново, пр. Ф.Энгельса, 21

Цель работы: получить практические навыки по расчету частных показателей безотказности ремонтируемых и неремонтируемых изделий, наработка которых подчинена известным законам распределения.

Теоретическая часть

Отказы производственных систем возникают в произвольные случайные моменты времени	$\Rightarrow$	Время работы оборудования между соседними отказами является непрерывной случайной величиной

Непрерывная случайная величина полностью определена, если известна функция ее распределения *F(t)*. В теории надежности наиболее удобной характеристикой распределения времени между соседними отказами является плотность распределения $f(t)=F'(t)$ (или, другими словами, дифференциальный закон распределения).

Зная плотность отказов, можно достаточно просто определить все остальные количественные характеристики надежности.

Время между соседними отказами, а также число отказов производственных систем могут изменяться в соответствии с различными законами распределения. Отказы большинства производственных систем (механических, электрических, электромеханических, электронных) подчиняются следующим законам распределения:

- экспоненциальный,
- нормальный,
- Пуассона,
- Вейбулла-Гнеденко,
- Рэлея.

Экспоненциальный (показательный) закон распределения

Экспоненциальному закону распределения подчиняется:

- наработка на отказ ремонтируемых и неремонтируемых изделий при рассмотрении внезапных отказов;
- время безотказной работы сложных систем, прошедших период приработки и состоящих из элементов с различной интенсивностью отказов.

При экспоненциальном законе распределения времени возникновения отказов имеют место следующие зависимости между основными количественными характеристиками надежности:

1. Плотность вероятности времени между отказами:

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}, \tag{1}$$

где λ – интенсивность отказов (параметр распределения);

t – время безотказной работы (случайная величина).

2. Вероятность безотказной работы:

$$P(t)=e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}=e^{-\lambda t}. \tag{2}$$

3. Вероятность отказа, представляющая собой интегральную функцию распределения:

$$F(t)\big(\text{или } Q(t)\big)=\int_0^t f(t)dt=\int_0^t \lambda e^{-\lambda t}dt=1-e^{-\lambda t}. \tag{3}$$

4. Гамма-процентная наработка на отказ (до отказа):

$$t_\gamma=\frac{1}{\lambda}\left[-ln(\gamma/100)\right]=T_{cp}\cdot Z_\gamma , \tag{4}$$

где γ – вероятность безотказной работы в процентах, Z_γ – квантиль экспоненциального закона распределения.

5. Интенсивность отказов:

$$\lambda(t)=\frac{f(t)}{P(t)}=\frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}}=\lambda=const. \tag{5}$$

Независимость интенсивности отказов от времени работы системы составляет главную отличительную особенность экспоненциального закона распределения случайной величины.

6. Среднее время безотказной работы:

$$T_{cp}=\int_0^\infty e^{-\lambda t}dt=-\frac{1}{\lambda e^{-\lambda t}}\Big|_0^\infty=\frac{1}{\lambda}. \tag{6}$$

Математическое ожидание наработки до отказа не может достаточно полно характеризовать эту случайную величину. Для более полной характеристики надежности производственных систем необходимо знать, по крайней мере, еще и ее *дисперсию*:

$$D = \lambda T_{ср}^{2} \int_{0}^{\infty} e^{-\lambda t} dt = T_{ср}^{2} = \frac{1}{\lambda^{2}}. \tag{7}$$

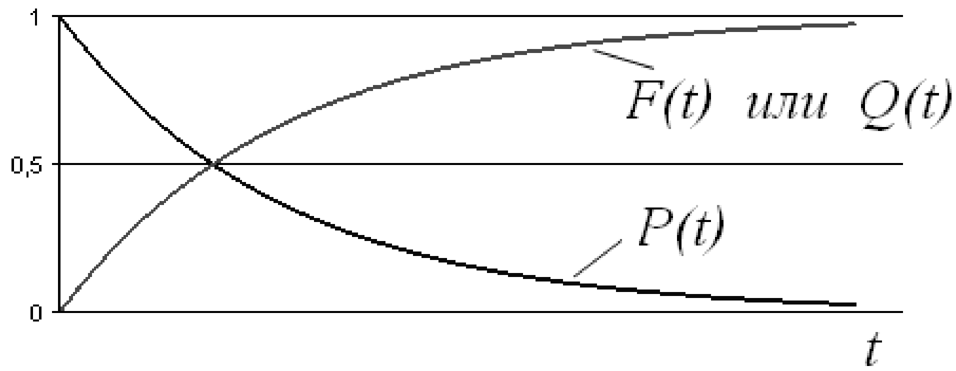
Среднее квадратическое отклонение при этом

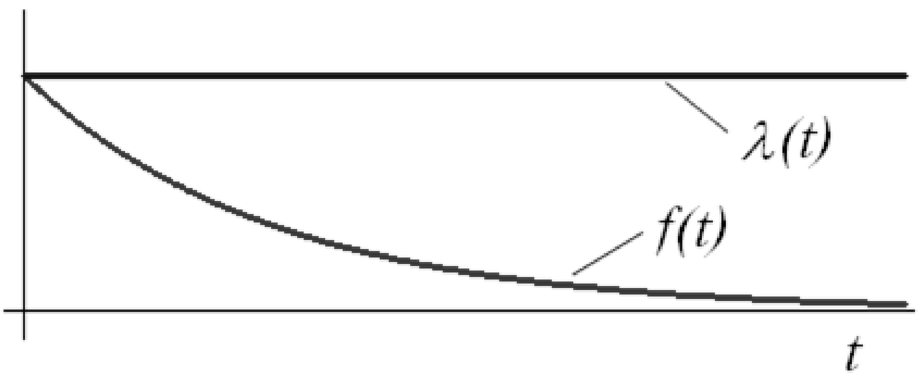
$$\sigma = \sqrt{D} = T_{ср} = \frac{1}{\lambda}. \tag{8}$$

Таким образом, при экспоненциальном законе распределения среднее квадратическое отклонение времени возникновения отказов равно среднему времени безотказной работы.

На практике это свойство часто используют для проверки истинности гипотезы о существовании экспоненциального закона распределения. Если $T_{ср}$ существенно отличается от σ, это означает, что экспоненциальный закон для данной технической системы несправедлив.

Графическое изображение основных количественных характеристик надежности:





Нормальный закон распределения (закон Гаусса)

Нормальному закону распределения подчиняются:

- время безотказной работы производственных систем, потеря работоспособности которых связана в основном с постепенными отказами, при этом доля внезапных отказов весьма мала;

- случайные величины массовых явлений, на которые оказывает влияние большое количество различных по величине факторов (например, износ и усталость деталей, технологические погрешности, точность размеров, получаемых при обработке, и т. д.).

Нормальному закону распределения подчиняются только непрерывные случайные величины. Поэтому нормальное распределение может быть задано:

- либо в виде плотности распределения (дифференциальной функции)

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - T_{cp})^2}{2\sigma^2}\right), \tag{9}$$

- либо в виде интегральной функции распределения

$$F(t) \text{ (или } Q(t)) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} \exp\left(-\frac{(t - T)^2}{2\sigma^2}\right) dt\,, \tag{10}$$

где σ – среднее квадратическое отклонение;

t – время безотказной работы (независимая переменная);

T_{cp} – среднее время (математическое ожидание) безотказной работы.

Из формул видно, что нормальное распределение является двухпараметрическим и определяется параметрами σ и T_{cp}.

При $T_{cp}= 0$ и $\sigma = 1$ получается центрированное и нормированное распределение, дифференциальная $f_0(t)$ и интегральная $F_0(t)$ функции которого табулированы и имеют вид:

$$f_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}; \qquad F_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt\,. \tag{11}$$

Соблюдаются следующие равенства:

$$f_0(-t) = f_0(t); \qquad F_0(-t) = 1 - F_0(t). \tag{12}$$

Показатели надежности при нормальном законе распределения определяются по следующим формулам:

1. Вероятность отказа
$$F(t)=F_0\left(\frac{t-T_{cp}}{\sigma}\right). \qquad (13)$$

2. Вероятность безотказной работы
$$P(t)=\int_t^{\infty} f(t)dt=1-F(t)=1-F_0\left(\frac{t-T_{cp}}{\sigma}\right)=F_0\left(\frac{T_{cp}-t}{\sigma}\right). \qquad (14)$$

3. Интенсивность отказов
$$\lambda(t)=\frac{1}{\sigma}\,f_1\left(\frac{T_{cp}-t}{\sigma}\right), \qquad (15)$$

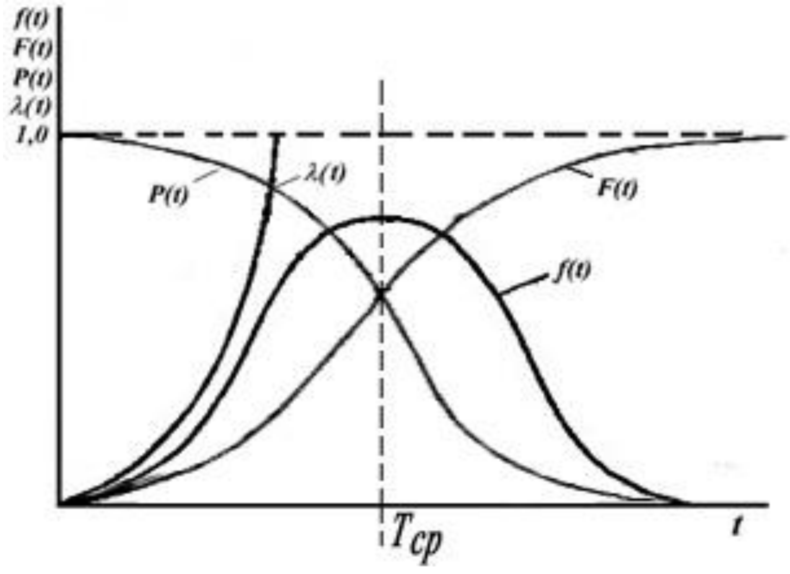
где $f_1(t)=f_0(t)/F_0(t)$ – табулированная функция.

4. Плотность распределения (частота отказов)
$$f(t)=\frac{1}{\sigma}\,f_0\left(\frac{t-T_{cp}}{\sigma}\right). \qquad (16)$$

5. Гамма-процентная наработка до отказа (на отказ)
$$t_\gamma=T_{cp}-U_\gamma\sigma, \qquad (17)$$

где U_γ – квантиль нормального распределения, т.е. аргумент функции Лапласа, при котором $F_0=\gamma$.

Графическое изображение основных характеристик надежности:



Из графиков видно, что:

– интенсивность отказов имеет тенденцию к резкому возрастанию с течением времени, т.е. поток отказов не является стационарным и имеет место старение элементов системы (постепенные отказы);

– в области малых значений t старение элементов оказывает на надежность несущественное влияние, и поэтому вероятность безотказной работы с течением времени уменьшается незначительно;

– дифференциальная кривая представляет собой колоколообразную фигуру (кривую Гаусса), симметричную относительно прямой, проходящей через точку $t=T_{ср}$, называемую центром распределения и асимптотически приближающуюся к оси абсцисс при $t \to \pm\infty$.

Время безотказной работы, подчиняющееся нормальному закону распределения, имеет следующие свойства:

- одинаковые положительные и отрицательные отклонения от средней арифметической $T_{ср}$ равновозможны;
- меньшие отклонения более вероятны, чем большие;
- весьма большие отклонения от $T_{ср}$ маловероятны;
- вероятность того, что случайная величина примет значение, находящееся в пределах от t_1 до t_2, может быть определена по формуле

$$P(t_1<t<t_2)=\Phi(t_2) - \Phi(t_1), \tag{18}$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – нормированная функция Лапласа.

Закон распределения Вейбулла - Гнеденко

Этот закон используют при определении уровня надежности изделий в период приработки и установления наработки на отказ неремонтируемых изделий.

Распределение Вейбулла–Гнеденко двухпараметрическое. Его параметрами являются $T_{ср}$ и b – положительные постоянные.

Показатели надежности при законе распределения Вейбулла – Гнеденко находятся по следующим формулам:

1. Плотность вероятности

$$f(t) = \frac{b}{T_{ср}^b} t^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T_{ср}}\right)^b}. \tag{19}$$

2. Интегральная функция распределения

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{cp}}\right)^{b}}. \tag{20}$$

3. Вероятность безотказной работы

$$P(t)=1 - F(t). \tag{21}$$

4. Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{b}{T_{cp}}\left(\frac{t}{T_{cp}}\right)^{b-1}. \tag{22}$$

5. Среднее время безотказной работы

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-(\lambda t)^b} dt = \frac{\Gamma(\frac{1}{b}+1)}{\lambda^{\frac{1}{b}}}, \tag{23}$$

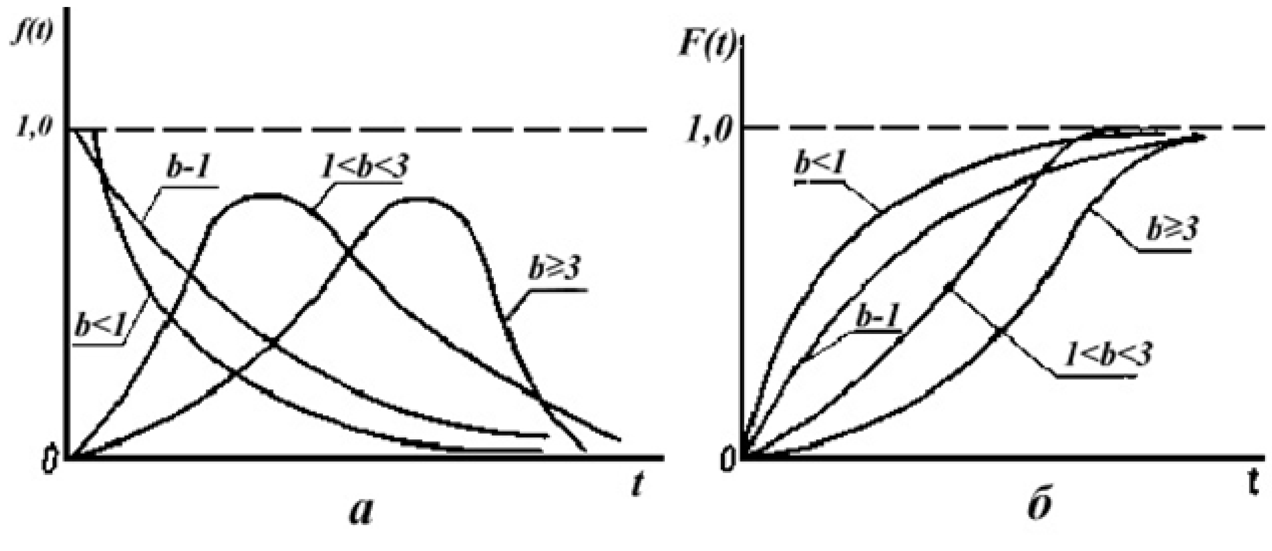
где *Г(х)* – гамма – функция.

6. Гамма-процентная наработка до отказа (на отказ)

$$t_\gamma = \frac{\Gamma(\frac{1}{b}+1)}{\lambda^{\frac{1}{b}}}\sqrt[b]{-\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right)} = T_{cp}\cdot Z_\gamma, \tag{24}$$

где Z_γ – квантиль распределения Вейбулла-Гнеденко.

Графики зависимости основных характеристик для распределения Вейбулла – Гнеденко:



Следует отметить, что при b=1 распределение Вейбулла - Гнеденко превращается в экспоненциальное, а при b=2 – в распределение Рэлея.

Закон распределения Пуассона

Закон распределения Пуассона применяется для исследования дискретных случайных величин при условии, что события происходят независимо друг от друга с постоянной средней интенсивностью за одинаковые промежутки времени. В практике надежности к таким величинам относится число отказов изделия за фиксированный промежуток времени.

Случайная величина распределена по закону Пуассона, если вероятность того, что она примет определенное значение m, выражается формулой

$$P_m = \frac{1}{m!} a^m e^{-a}, \tag{25}$$

где m = 0, 1, 2, ... – возможные значения случайной величины; a – положительная величина, характеризующая интенсивность появления событий в n испытаниях (параметр распределения).

Если в среднем в единицу времени наступает λ отказов и $a = \lambda t$, то формула может быть представлена в виде:

$$P_m(t) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}. \tag{26}$$

Если поток отказов производственной системы является простейшим, то сделанное выше допущение можно считать в достаточной степени оправданным для периода нормальной эксплуатации. В этом случае $\lambda = 1/T_{ср} = const$, и тогда формулу можно представить в виде:

$$P_m(t) = \frac{1}{m!} \left(\frac{t}{T_{ср}} \right)^m e^{-\frac{t}{T_{ср}}}, \tag{27}$$

где $P_m(t)$– вероятность появления в период t ровно m отказов; t – время, для которого определяется вероятность появления m отказов; $T_{ср}$ – среднее время безотказной работы производственной системы.

На основании этого уравнения можно вычислить вероятность появления в производственной системе любого числа отказов от $m = 0$ до $m = \infty$ – для заданного значения относительного времени $t/T_{ср}$.

Закон Рэлея

Закон Рэлея может быть применён при исследовании надежности изделий, имеющих элементы с выраженным эффектом старения.

Если случайная величина распределена по закону Рэлея, то:

1. Плотность распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \tag{28}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение (параметр распределения).

2. Вероятность безотказной работы определяется из уравнения:

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}. \tag{29}$$

3. Интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{t}{\sigma^2}. \tag{30}$$

4. Средняя наработка на отказ (средний ресурс, средний срок службы, среднее время восстановления работоспособного состояния) определяется следующим уравнением:

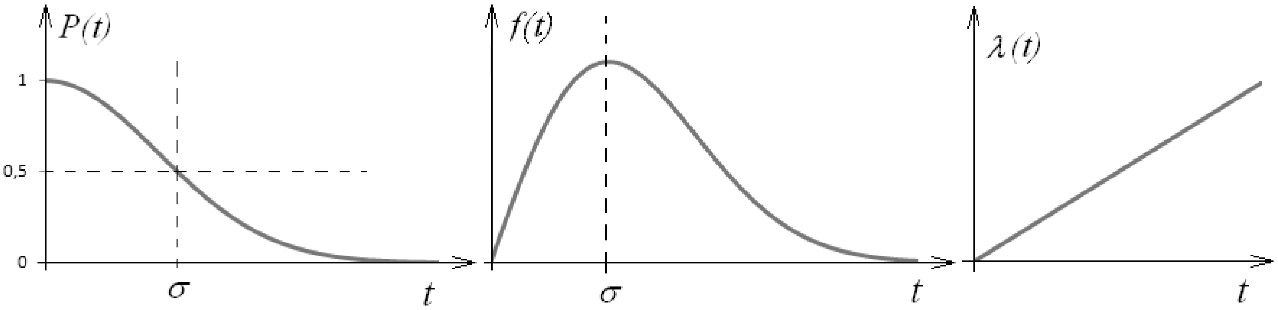
$$T_{cp} = \int_0^\infty P(t)\,dt = \int_0^\infty e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}\,dt = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx 1{,}253\sigma. \tag{31}$$

5. Гамма-процентная наработка до отказа (на отказ)

$$t_\gamma = \sqrt{2\sigma^2\left[-\ln(\gamma/100)\right]} = \sigma \cdot Z_\gamma, \tag{32}$$

где Z_γ – квантиль распределения.

Графики зависимостей основных показателей:



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Определить количественные характеристики надежности ткацкого станка за период *10* часов при T_{CP} = *62* ч, если известно, что наработка на отказ подчиняется экспоненциальному закону.

Решение. Интенсивность отказов вычисляют по формуле (6):

$$\lambda = 1/T_{CP} = 1/62 = 0{,}016 \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы станка вычисляют по формуле (2):

$$P(10)=e^{-10/62} = e^{-0{,}161} = 0{,}85.$$

Вероятность отказа находят по формуле (3): $Q(10) = 1 - 0{,}85 = 0{,}15$.

Пример 2. Допустим, средняя наработка на отказ чесальной машины имеет нормальное распределение с параметрами $T_{cp}=400$ *ч* и $\sigma = 50$ *ч*. Требуется определить вероятность безотказной работы за периоды $t_1 = 300$ *ч* и $t_2 = 450$ *ч*.

Решение. По формуле (14) находим:

$$P(300) = F_0\left(\frac{400-300}{50}\right) = F_0(2).$$

По таблице значений функции Лапласа (прил. 1) находим, что $F_0(2) = 0{,}97725$.

Аналогично $P(450) = F_0\left(\frac{400-450}{50}\right) = F_0(-1)$. Затем, используя соотношение (12), получаем $F_0(-1) = 1 - F_0(1) = 1 - 0{,}8413 = 0{,}1587$.

Пример 3. Известно, что наработка на отказ изделия подчиняется распределению Вейбулла–Гнеденко с параметрами $T_{cp}=200$ *ч* и $b=3$. Определить вероятность безотказной работы за период $t=100$ ч, плотность распределения в точке $t=100$ ч и интенсивность отказов в точке $t=100$ ч.

Решение. Находим t / T_{cp} = 100/200=0,5.

1) По прил. 4 для этого значения и $b=3$ получаем $P(100) = 0{,}8825$.

2) По прил. 5 для этого значения и $b= 3$ определяем: $Tf(t) = 0{,}6619$.

Отсюда $f(100) = 0{,}6619/200 = 0{,}0033$.

3) По прил. 6 определяем $T\lambda(t) = 0{,}7500$.

Отсюда $\lambda(100) = 0{,}7500/200 = 0{,}00375$ ч$^{-1}$.

Пример 4. У восстанавливаемого изделия после окончания периода приработки установился простейший поток отказов с $T_{ср} = 100$ *ч*. Требуется определить вероятность того, что за период работы $t=50$ *ч* у изделия произойдет 2 отказа.

Решение. Случайные отказы, образующие простейший поток отказов, распределены по закону Пуассона. Поэтому для нахождения вероятности можно применить формулу (25).

Определяем значение относительного времени:

$$a = t/T_{CP} = 50/100 = 0{,}5.$$

По таблице прил. 3 находим, что при $a = 0{,}5$ и $m = 2$ $P_2(50)=0{,}0758$.

Пример 5. Наработка до отказа зуба батана станка СТБ подчинена нормальному закону распределения с параметрами $T_{ср}=4200$ ч и $\sigma = 810$.

Определить гамма-процентную наработку до отказа зуба батана, отвечающую вероятности работы $P_1 = 0{,}85$ и $P_2 = 0{,}45$.

Решение. Гамма-процентную наработку до отказа находят по формуле (19): $t_\gamma = T_{ср} - U_\gamma \cdot \sigma$.

1) По таблице прил. 9 находим для вероятности 0,85 значение квантиля $U_{0,85} =1{,}036$.

$t_{0,85} = 4200 - 1{,}036 \cdot 810 = 3360{,}84$ *ч.*

2) Для значений вероятности, меньших 0,5, выполняется $U_\gamma = - U_{1-\gamma}$. По таблице прил. 9 находим для вероятности 0,45 значение квантиля

$U_{0,45} = -U_{1-0,45} = -U_{0,55} = - 0{,}126.$

$t_{0,45} = 4200 + 0{,}126 \cdot 810 = 4302{,}06$ *ч.*

Пример 6. Средняя наработка на отказ механизма сцепления составляет 24,2 часа. Требуется определить наработку t_γ , отвечающую вероятности *85 %*, если наработка на отказ подчинена экспоненциальному закону распределения.

Решение. Так как интенсивность отказов из формулы (6) $\lambda= 1/T_{CP}$, то формулу (4) можно видоизменить:

$$t_\gamma = \frac{1}{\lambda}\left[-\ln(\gamma/100)\right] = -T_{ср} \cdot \ln(\gamma/100) = -24{,}2 \cdot \ln(0{,}85) = 24{,}2 \cdot 0{,}163 = 3{,}94 \text{ ч.}$$

ЗАДАНИЯ ДЛЯ АУДИТОРНОЙ РАБОТЫ

ЗАДАЧА 1

Наработка до отказа станка подчинена экспоненциальному закону распределения. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа станка за 24 часа работы, если средняя наработка до отказа T_{CP} = 25,6 часа.

ЗАДАЧА 2

Для исследования уровня надежности станков АТПР-120-Л было выбрано 18 единиц оборудования. За период испытания 48 часов 16 станков имели хотя бы один отказ. Определить интенсивность отказов и среднюю наработку на отказ за 48 часов при условии, что наработка на отказ подчинена экспоненциальному закону распределения.

ЗАДАЧА 3

Основной причиной поломки прядильной машины является износ камеры, наработка на отказ которой подчинена нормальному закону распределения с параметрами $T_{CP} = 2160$ ч и $\sigma = 648$. За периоды времени $t_1 = 2000$ *ч* и $t_2 = 2500$ *ч* определить:

- вероятность безотказной работы и вероятность отказа камеры;
- интенсивность отказов камеры;
- плотность вероятности (частоту отказов) камеры.

ЗАДАЧА 4

Наработка на отказ изделия в период приработки подчиняется закону Вейбулла–Гнеденко с параметрами $T_{cp}=80$ *ч* и $b=1{,}8$. Определите вероятность безотказной работы за период $t=20$ ч, плотность распределения в точке $t=20$ ч и интенсивность отказов в точке $t=20$ ч.

ЗАДАЧА 5

Средняя наработка на отказ машины ЧММ равна *170* ч и подчинена экспоненциальному закону распределения. Определить наработку на отказ, при которой с вероятностью 0,95 машина ЧММ будет находиться в работоспособном состоянии.

ЗАДАЧА 6

Наработка на отказ диска сцепления подчинена нормальному закону распределения с параметрами $T_{ср} = 1440$ *ч* и $\sigma = 360$. Определить значение наработки, при которой с вероятностью 90 % и 40 % диск будет находиться в работоспособном состоянии.

ЗАДАЧА 7

После периода приработки на чесальной машине установился простейший поток отказов при средней наработке на отказ $T_{ср}=80$ *ч*. Определите вероятность того, что за 20 часов работы возникает 1, 2, 3 или 4 отказа.

ЗАДАЧА 8

При длительной эксплуатации кольцепрядильной машины стали проявляться признаки старения её элементов, а наработка на отказ подчинена закону Рэлея с параметром $\sigma =13{,}2$. Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы кольцепрядильной машины за период времени $t_1=24$ *ч* и $t_2=48$ *ч* работы.

ЗАДАЧА 9

Наработка на отказ изделия подчинена закону Рэлея с параметром $\sigma =24$. Определить значение средней наработки на отказ.

ЗАДАЧА 10

Наработка на отказ станка СТБ подчинена экспоненциальному закону распределения с параметром $T_{ср}=25$ *ч*. Определить значение 90 %-ной наработки на отказ.

ЗАДАЧА 11

В техническом задании на проектирование регламентированы следующие условия. Изделие состоит из элементов с максимально допустимой интенсивностью отказов: $\lambda_1=0{,}0025;$ $\lambda_2=0{,}0035;$ $\lambda_3=0{,}0020$. Наработка на отказ подчинена закону Вейбулла-Гнеденко с параметром $b=2$. Предельным состоянием изделия является отказ. Определить значение 90 % -го ресурса.

ЗАДАЧА 12

Срок службы изделия подчинен закону Рэлея с параметром σ=40. Определить 80 %-ный срок службы изделия.

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 1

Задача 1

Наработка на отказ машины *ЧММ-450-4* в период приработки подчинена закону Вейбулла-Гнеденко с параметрами b и λ. Определить вероятностное значение средней наработки на отказ.

№	b	λ
1	1,8	$60{\cdot}10^{-5}$
2	1,2	$12{\cdot}10^{-4}$
3	1,4	$72{\cdot}10^{-5}$
4	2,5	$24{\cdot}10^{-4}$
5	1,6	$16{\cdot}10^{-4}$
6	1,9	$56{\cdot}10^{-5}$
7	2,1	$32{\cdot}10^{-4}$
8	0,9	0,008
9	2,3	$14{\cdot}10^{-4}$
10	1,5	$42{\cdot}10^{-5}$
11	2,1	$60{\cdot}10^{-5}$
12	1,7	$63{\cdot}10^{-5}$
13	1,3	$28{\cdot}10^{-4}$
14	0,8	$92{,}3{\cdot}10^{-4}$
15	2,2	$15{,}2{\cdot}10^{-5}$
16	1,6	$64{\cdot}10^{-5}$
17	2,4	$96{\cdot}10^{-6}$
18	0,7	0,045
19	2,8	$22{\cdot}10^{-3}$
20	2,6	$12{\cdot}10^{-4}$

Задача 2

При исследовании уровня надёжности чесальной машины было установлено, что наработка на отказ подчинена нормальному закону распределения с параметрами T_{CP} и σ.

Определить вероятность безотказной работы, вероятность отказа и интенсивность отказов машины в точке t. Построить график зависимости частоты отказов за период времени от 0 до T, принимая $\Delta t = 0{,}1{\cdot}T$.

№	T_{CP}	σ	t	T
1	2000	400	2100	4000
2	2050	360	2530	4500
3	1200	377	1500	2500
4	3700	500	4000	7000
5	1700	365	2100	3500
6	520	115	670	1500
7	800	128	950	2000
8	1370	290	1550	3000
9	2180	475	2350	4500
10	960	125	1250	2200
11	1500	250	1720	3300
12	3600	705	3920	7500
13	670	95	810	1500
14	1250	370	1380	2500
15	400	53	560	900
16	1440	360	1760	3000
17	750	80	920	1250
18	980	225	1320	2000
19	1000	300	1650	2500
20	1110	320	1290	2600

Задача 3

При исследовании уровня надёжности изделия на заводе-изготовителе в течение *t* часов проводилось испытание, в результате которого отказало *n* изделий. Был установлен закон распределения времени между отказами и найдено среднее время безотказной работы T_{CP}.

Определить, сколько изделий было установлено под испытание.

№	Закон распределения	t	T_{CP}	n
1	нормальный закон (σ = 24)	210	180	186
2	экспоненциальный закон	3500	1000	702
3	закон Рэлея	4800	2000	915
4	закон Вейбулла - Гнеденко (b =1,8)	4250	2050	275
5	нормальный закон (σ = 238)	1700	1440	250
6	экспоненциальный закон	1000	500	640
7	закон Рэлея	800	360	245
8	закон Вейбулла - Гнеденко (b =1,4)	3000	1670	531
9	нормальный закон (σ = 128)	1500	1250	468
10	экспоненциальный закон	2000	980	282
11	закон Рэлея	850	400	344
12	закон Вейбулла - Гнеденко (b =1,6)	400	210	138
13	нормальный закон (σ =37)	260	205	85
14	экспоненциальный закон	500	230	174
15	закон Рэлея	1800	880	920
16	закон Вейбулла - Гнеденко (b =2,2)	320	172	1035
17	нормальный закон (σ =316)	3500	2800	470
18	экспоненциальный закон	5000	2630	545
19	закон Рэлея	1500	770	630
20	закон Вейбулла - Гнеденко (b =1,2)	700	302	265

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 2

Задача 1

Наработка на отказ прибора подчинена нормальному закону распределения с параметрами T_{CP} и σ. Определить значение наработки, при которой с вероятностью γ_1 и γ_2 прибор будет находиться в работоспособном состоянии.

№	T_{CP}	σ	γ_1	γ_2
1	*1000*	*300*	*45*	*70*
2	*2000*	*400*	*40*	*60*
3	*2050*	*360*	*35*	*90*
4	*1440*	*360*	*47*	*85*
5	*1500*	*250*	*44*	*78*
6	*3600*	*705*	*38*	*72*
7	*1670*	*520*	*25*	*82*
8	*1250*	*370*	*46*	*65*
9	*980*	*225*	*39*	*92*
10	*2400*	*530*	*31*	*68*

№	T_{CP}	σ	γ_1	γ_2
11	*2890*	*480*	*33*	*87*
12	*1740*	*365*	*45*	*75*
13	*520*	*115*	*30*	*66*
14	*862*	*128*	*37*	*88*
15	*1370*	*290*	*34*	*93*
16	*2180*	*475*	*35*	*95*
17	*1110*	*320*	*48*	*67*
18	*2215*	*410*	*36*	*74*
19	*68*	*15*	*32*	*86*
20	*1200*	*377*	*20*	*91*

Задача 2

Наработка на отказ машины *ЧММ-450-4* в период приработки подчинена закону Вейбулла-Гнеденко с параметрами T и b.

Определить наработку, при которой с вероятностью p машина будет находиться в работоспособном состоянии.

№	T	b	p
1	*56*	*1,8*	*0,70*
2	*130*	*2,1*	*0,65*
3	*60*	*2,5*	*0,85*
4	*85*	*1,6*	*0,60*
5	*38*	*0,9*	*0,75*
6	*65*	*1,9*	*0,90*
7	*84*	*2,1*	*0,80*
8	*110*	*2,3*	*0,95*
9	*96*	*1,7*	*0,85*
10	*120*	*1,6*	*0,70*

№	T	b	p
11	*64*	*2,5*	*0,80*
12	*80*	*2,0*	*0,75*
13	*75*	*1,4*	*0,85*
14	*93*	*1,8*	*0,65*
15	*100*	*2,4*	*0,90*
16	*86*	*1,5*	*0,60*
17	*45*	*2,1*	*0,95*
18	*54*	*3,2*	*0,80*
19	*72*	*1,7*	*0,70*
20	*76*	*2,6*	*0,85*

Задача 3

Наработка на отказ аппарата подчинена заданному закону распределения. При этом известно значение средней наработки на отказ данного аппарата.

Определить наработку, при которой с вероятностью γ аппарат будет находиться в работоспособном состоянии.

№	Закон распределения	T_{CP}	γ
1	экспоненциальный закон	1780	85
2	закон Рэлея	2500	74
3	экспоненциальный закон	3200	92
4	закон Рэлея	880	35
5	экспоненциальный закон	1720	47
6	закон Рэлея	1950	54
7	экспоненциальный закон	2630	63
8	закон Рэлея	770	86
9	экспоненциальный закон	2300	72
10	закон Рэлея	3110	95
11	экспоненциальный закон	1000	75
12	закон Рэлея	2000	25
13	экспоненциальный закон	2050	64
14	закон Рэлея	1440	39
15	экспоненциальный закон	1500	31
16	закон Рэлея	3600	68
17	экспоненциальный закон	1670	82
18	закон Рэлея	1250	44
19	экспоненциальный закон	980	38
20	закон Рэлея	2400	88

ОТВЕТЫ

ЗАДАЧА 1

$P(t) = 0{,}39;\ Q(t) = 0{,}61.$

ЗАДАЧА 2

$\lambda(t)=0{,}04577;\quad T_{CP} = 21{,}85$ *ч.*

ЗАДАЧА 3

$P(t_1) = 0{,}60;\ \ Q(t_1) = 0{,}40;\ \ \lambda(t_1)=99{,}89\cdot 10^{-5};\ \ f(t_1) = 59{,}68\cdot 10^{-5};$

$P(t_2) = 0{,}30;\ \ Q(t_2) = 0{,}70;\ \ \lambda(t_2)=17{,}83\cdot 10^{-4};\ \ f(t_2) = 53{,}73\cdot 10^{-5}.$

ЗАДАЧА 4

$P(t) = 0{,}92;\quad f(t) = 0{,}006767;\quad \lambda(t)=0{,}007398.$

ЗАДАЧА 5

$t_\gamma = 8{,}72$ *ч.*

ЗАДАЧА 6

$t_{\gamma 1}= 975{,}6$ *ч.*; $t_{\gamma 2} = 1533{,}6$ *ч.*

ЗАДАЧА 7

$P_1(t) = 0{,}195;\ \ P_2(t) = 0{,}024;\ \ P_3(t) = 0{,}002;\ \ P_4(t) = 0{,}0001.$

ЗАДАЧА 8

$P(t_1) = 0{,}1915;\ \ Q(t_1) = 0{,}8085;$

$P(t_2) = 0{,}0013;\ \ Q(t_2) = 0{,}9987.$

ЗАДАЧА 9

$T_{CP} = 30{,}08$ *ч.*

ЗАДАЧА 10.

$t_\gamma = 2{,}63$ *ч.*

ЗАДАЧА 11

$t_\gamma = 3{,}21$ *ч.*

ЗАДАЧА 12

$t_\gamma = 26{,}72$ *ч.*

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Значения функции Лапласа $F_0(x)$

x		**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0,0	0,	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	0,	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	0,	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,3	0,	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
0,4	0,	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,5	0,	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
0,6	0,	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,7	0,	7580	7611	7642	7673	7704	7734	7764	7794	7823	7852
0,8	0,	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
0,9	0,	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365	8389
1,0	0,	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,1	0,	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810	8830
1,2	0,	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,3	0,9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621	1774
1,4	0,9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056	3189
1,5	0,9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295	4408
1,6	0,9	4520	4630	4738	4845	4950	5053	5154	5254	5352	5449
1,7	0,9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246	6327
1,8	0,9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995	7062
1,9	0,9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7558	7615	7670
2,0	0,9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124	8169
2,1	0,9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537	8574
2,2	0,9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870	8899
2,3	0,9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134	9158
2,4	0,99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431	3613
2,5	0,99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060	5201
2,6	0,99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319	6428
2,7	0,99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282	7365
2,8	0,99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012	8074
2,9	0,99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559	8605
3,0	0,99	8650	7694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965	8999
3,1	0,999	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2378	2636	2886
3,2	0,999	3129	3363	3590	3810	4024	4230	4429	4623	4810	4991
3,3	0,999	5166	5335	5499	5658	5811	5959	6103	6242	6376	6505
3,4	0,999	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7398	7493	7585
3,5	0,999	7674	7760	7842	7922	7999	8074	8146	8215	8282	8347
3,6	0,999	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8787	8834	8879
3,7	0,999	8922	8964	9004	9043	9080	9116	9150	9184	9216	9247
3,8	0,9999	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4558	4777	4988
3,9	0,9999	5190	5385	5573	5753	5926	6092	6252	6406	6554	6696
4,0	0,9999	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7649	7748	7843

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Значения гамма–функции $\Gamma(x)=\int\limits_0^{\infty} e^{-t}\, t^{x-1} dt$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	1,00000	0,99433	0,98884	0,98355	0,97844	0,97350	0,96874	0,96415	0,95973	0,95546
1,1	0,95135	0,94740	0,94359	0,93993	0,93642	0,93304	0,92980	0,92670	0,92373	0,92089
1,2	0,91817	0,91558	0,91311	0,91075	0,90852	0,90640	0,90440	0,90250	0,90072	0,89904
1,3	0,89747	0,89600	0,89464	0,89338	0,89222	0,89115	0,89018	0,88931	0,88854	0,88785
1,4	0,88726	0,88676	0,88636	0,88604	0,88581	0,88566	0,88560	0,88563	0,88575	0,66595
1,5	0,88623	0,88659	0,88704	0,88757	0,88818	0,88887	0,88964	0,89049	0,89142	0,89243
1,6	0,89352	0,89468	0,89592	0,89724	0,89864	0,90012	0,90167	0,90330	0,90500	0,90678
1,7	0,90864	0,91057	0,91258	0,91467	0,91683	0,91906	0,92137	0,92376	0,92623	0,92877
1,8	0,93138	0,93408	0,93685	0,93369	0,94261	0,94561	0,94869	0,95184	0,95507	0,95838
1,9	0,96177	0,96523	0,96877	0,97240	0,97610	0,97988	0,98374	0,98768	0,99171	0,99581
2,0	1,00000									

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Значения $P_m = \dfrac{a^m}{m!} e^{-a}$ распределения Пуассона

m	*a*																	
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
0	0948	8187	7408	6703	6065	5488	4966	4493	4066	3679	1315	0408	0183	0067	0025	0009	0003	0001
1	0905	1638	2222	2681	3033	3293	3476	3595	3659	3679	2707	1494	0733	0337	0149	0064	0027	0011
2	0045	0164	0333	0536	0758	0988	1217	1438	1647	1839	2707	2240	1465	0842	0446	0223	0107	0050
3	0002	0019	033	0072	0126	0198	0284	0383	0494	0613	1804	2240	1954	1404	0892	0521	0286	0150
4	-	0001	0002	0007	0016	0030	0050	0077	0011	0153	0902	1680	1954	1755	1339	0912	0572	0337
5	-	-	-	0001	0002	0004	0007	0012	0020	0031	0361	1008	1563	1755	1606	1277	0916	0607
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0005	0120	0504	1042	1462	1377	1490	1221	0911
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0001	0037	0216	0595	1044	1033	1490	1396	1171
8	-	-	-	-	-	-		-	-	-	0009	0081	0298	0653	0688	1304	1396	1318
9	-	-	-		-				-	-	0002	0027	0132	0363	0413	1014	1241	1318
10	-	-	-							-	-	0008	0053	0181	0225	0710	0993	1186
11	-	-							-	-	-	0002	0019	0082	0126	0452	0722	0970
12	-	-						-	-	-	-	0001	0006	0034	0052	0263	0481	0728
13	-	-						-	-	-	-	-	0002	0013	0022	0142	0286	0504
14	-	-					-	-	-	-	-	-	0001	0005	0009	0071	0169	0324
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0002	0003	0033	0090	0194
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0001	0014	0045	0109
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0006	0021	0058
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0002	0009	0029
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0001	0004	0014
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0002	0006

Представлены десятитысячные доли вероятности

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Значение P(t) для распределения Вейбулла-Гнеденко

$\frac{t}{T_{ср}}$	***Постоянная величина b***											
	0,1	***0,2***	***0,3***	***0,4***	***0,5***	***0,6***	***0,7***	***0,8***	***0,9***	***1,0***	***1,1***	***1,2***
0,1	0,4519	0,5321	0,6058	0,6716	0,7289	0,7779	0,8191	0,8534	0,8817	0,9048	0,9236	0,9389
0,2	0,4268	0,4844	0,5395	0,5914	0,6394	0,6834	0,7232	0,7589	0,7906	0,8187	0,8434	0,8651
0,3	0,4121	0,4557	0,4982	0,5391	0,5783	0,6153	0,6502	0,6827	0,7129	0,7408	0,7665	0,7899
0,4	0,4015	0,4349	0,4673	0,5000	0,5313	0,5615	0,5906	0,6185	0,6451	0,6703	0,6942	0,7168
0,5	0,3934	0,4187	0,4439	0,4687	0,4931	0,5170	0,5403	0,5631	0,5852	0,6065	0,6272	0,6471
0,6	0,3867	0,4054	0,4240	0,4426	0,4609	0,4790	0,4969	0,5145	0,5318	0,5488	0,5655	0,5817
0,7	0,3810	0,3941	0,4072	0,4202	0,4332	0,4460	0,4588	0,4715	0,4841	0,4966	0,5089	0,5211
0,8	0,3761	0,3843	0,3925	0,4007	0,4088	0,4170	0,4251	0,4332	0,4413	0,4493	0,4573	0,4653
0,9	0,3718	0,3756	0,3795	0,3834	0,3873	0,3911	0,3950	0,3989	0,4027	0,4066	0,4104	0,4143
1,0	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679
1,1	0,3644	0,3609	0,3574	0,3539	0,3504	0,3469	0,3434	0,3399	0,3364	0,3329	0,3294	0,3259
1,2	0,3612	0,3545	0,3478	0,3411	0,3344	0,3277	0,3211	0,3144	0,3078	0,3012	0,2946	0,2881
1,3	0,3582	0,3486	0,3390	0,3293	0,3198	0,3102	0,3007	0,2913	0,2819	0,2725	0,2633	0,2541
1,4	0,3555	0,3431	0,3308	0,3185	0,3063	0,2941	0,2821	0,2701	0,2583	0,2466	0,2351	0,2237
1,5	0,3530	0,3381	0,3232	0,3085	0,2938	0,2793	0,2650	0,2508	0,2368	0,2231	0,2097	0,1966
1,6	0,3506	0,3334	0,3162	0,2991	0,2823	0,2656	0,2492	0,2331	0,2173	0,2019	0,1869	0,1724
1,7	0,3484	0,3289	0,3096	0,2904	0,2715	0,2529	0,2346	0,2168	0,1995	0,1827	0,1665	0,1510
1,8	0,3463	0,3247	0,3034	0,2822	0,2614	0,2410	0,2211	0,2018	0,1832	0,1653	0,1482	0,1321
1,9	0,3443	0,3208	0,2975	0,2745	0,2520	0,2300	0,2086	0,1880	0,1683	0,1496	0,1319	0,1153
2,0	0,2424	0,3170	0,2920	0,2673	0,2673	0,2431	0,2197	0,1970	0,1753	0,1547	0,1172	0,1005

$\frac{t}{T_{ср}}$	***Постоянная величина b***											
	1,3	***1,4***	***1,5***	***1,6***	***1,7***	***1,8***	***1,9***	***2,0***	***2,5***	***3,0***	***3,5***	***4,0***
0,1	0,9511	0,9610	0,9689	0,9752	0,9802	0,9843	0,9875	0,9900	0,9968	0,9990	0,9997	0,9999
0,2	0,8839	0,9003	0,9144	0,9267	0,9372	0,9463	0,9541	0,9608	0,9823	0,9920	0,9964	0,9984
0,3	0,8114	0,8308	0,8485	0,8644	0,8788	0,8918	0,9	0,9139	0,9519	0,9734	0,9853	0,9919
0,4	0,7380	0,7579	0,7765	0,7939	0,8101	0,8252	0,8392	0,8521	0,9038	0,9380	0,9603	0,9747
0,5	0,6662	0,6846	0,7022	0,7190	0,7351	0,7504	0,7650	0,7788	0,8380	0,8825	0,9154	0,9394
0,6	0,5976	0,6132	0,6283	0,6430	0,6573	0,6712	0,6846	0,6977	0,7566	0,8057	0,8459	0,8784
0,7	0,5331	0,5450	0,5567	0,5683	0,5796	0,5908	0,6018	0,6126	0,6637	0,7096	0,7505	0,7865
0,8	0,4732	0,4811	0,4889	0,4967	0,5044	0,5121	0,5197	0,5273	0,5642	0,5993	0,6326	0,6639
0,9	0,4181	0,4220	0,4258	0,4296	0,4334	0,4373	0,4411	0,4449	0,4637	0,4824	0,5008	0,5189
1,0	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679	0,3679
1,1	0,3224	0,3189	0,3155	0,3120	0,3085	0,3051	0,3016	0,2982	0,2811	0,2642	0,2476	0,2313
1,2	0,2815	0,2751	0,2686	0,2622	0,2558	0,2495	0,2432	0,2369	0,2065	0,1776	0,1500	0,1257
1,3	0,2450	0,2360	0,2271	0,2184	0,2097	0,2012	0,1928	0,1845	0,1456	0,1111	0,0817	0,0575
1,4	0,2125	0,2016	0,1908	0,1803	0,1700	0,1600	0,1503	0,1409	0,0984	0,0643	0,0389	0,0215
1,5	0,1838	0,1713	0,1593	0,1476	0,1364	0,1256	0,1153	0,1054	0,0636	0,0342	0,0160	0,0063
1,6	0,1585	0,1450	0,1321	0,1199	0,1082	0,0973	0,0869	0,0773	0,0392	0,0166	0,0566	0,0014
1,7	0,1362	0,1222	0,1090	0,0966	0,0850	0,0743	0,0645	0,0556	0,0231	0,0074	0,0017	0,0002
1,8	0,1168	0,1026	0,0894	0,0772	0,0661	0,0561	0,0471	0,0392	0,0129	0,0029	0,0004	-
1,9	0,0999	0,0858	0,0729	0,0613	0,0509	0,0418	0,0339	0,0271	0,0069	0,0010	-	-
2,0	0,0852	0,0714	0,0591	0,0482	0,0388	0,0307	0,0239	0,0183	0,0035	0,0003	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Значения функции $Tf(t)$ для распределения Вейбулла-Гнеденко

$$Tf(t) = b\left(\frac{t}{T_{cp}}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T_{cp}}\right)^{b}}$$

$\frac{t}{T_{cp}}$	*Постоянная величина* **b**											
	0,2	***0,4***	***0,6***	***0,8***	***1,0***	***1,2***	***1,4***	***1,6***	***1,8***	***2,0***	***3,0***	***4,0***
0,1	0,6714	1,0695	1,1724	1,0821	0,9048	0,7109	0,5356	0,3919	0,2808	0,1980	0,0300	0,0040
0,2	0,3511	0,6213	0,7805	0,8376	0,8187	0,7524	0,6621	0,5645	0,4700	0,3843	0,1190	0,0319
0,3	0,2388	0,4441	0,5976	0,6949	0,7408	0,7451	0,7186	0,6716	0,6127	0,5484	0,2628	0,1071
0,4	0,1811	0,3466	0,4861	0,5943	0,6703	0,7161	0,7354	0,7330	0,7136	0,6817	0,4502	0,2495
0,5	0,1458	0,2841	0,4093	0,5174	0,6065	0,6760	0,7264	0,7590	0,7758	0,7788	0,6619	0,4697
0,6	0,1220	0,2405	0,3526	0,4559	0,5488	0,6303	0,6998	0,7572	0,8028	0,8372	0,8702	0,7590
0,7	0,1048	0,2082	0,3087	0,4051	0,4966	0,5823	0,6616	0,7341	0,7995	0,8577	0,0432	1,0791
0,8	0,0919	0,1832	0,2736	0,3624	0,4493	0,5340	0,6160	0,6951	0,7711	0,8437	0,1506	1,3597
0,9	0,0817	0,1634	0,2448	0,3259	0,4066	0,4868	0,5664	0,6453	0,7234	0,8007	0,1722	1,5130
1,0	0,0736	0,1472	0,2207	0,2943	0,3679	0,4415	0,5150	0,5886	0,6622	0,7358	0,1036	1,4715
1,1	0,0669	0,1337	0,2003	0,2668	0,3329	0,3986	0,4639	0,5286	0,5927	0,6560	0,9591	1,2314
1,2	0,0613	0,1223	0,1828	0,2425	0,3012	0,3585	0,4142	0,4680	0,5195	0,5686	0,7674	0,8691
1,3	0,0565	0,1125	0,1676	0,2211	0,2725	0,3213	0,3670	0,4089	0,4467	0,4798	0,5635	0,5052
1,4	0,0524	0,1041	0,1543	0,2020	0,2466	0,2871	0,3228	0,3530	0,3770	0,3944	0,3782	0,2355
1,5	0,0489	0,0967	0,1425	0,1850	0,2231	0,2558	0,2821	0,3012	0,3127	0,3162	0,2310	0,0855
1,6	0,0458	0,0903	0,1320	0,1697	0,2019	0,2273	0,2450	0,2543	0,2550	0,2474	0,1278	0,0233
1,7	0,0430	0,0845	0,1227	0,1560	0,1827	0,2015	0,2116	0,2125	0,2046	0,1890	0,0637	0,0046
1,8	0,0406	0,0793	0,1143	0,1436	0,1653	0,1782	0,1817	0,1758	0,1616	0,1410	0,0285	-
1,9	0,0384	0,0747	0,1067	0,1323	0,1496	0,1573	0,1552	0,1441	0,1257	0,1028	0,0114	-
2,0	0,0364	0,0705	0,0999	0,1221	0,1353	0,1386	0,1320	0,1170	0,0963	0,0733	0,0040	-
2,1	0,0346	0,0667	0,0936	0,1128	0,1225	0,1218	0,1117	0,0942	0,0728	0,0511	0,0013	-
2,2	0,0330	0,0633	0,0879	0,1044	0,1108	0,1069	0,0941	0,0752	0,0542	0,0348	-	-
2,3	0,0315	0,0601	0,0827	0,0966	0,1003	0,0937	0,0789	0,0595	0,0398	0,0232	-	-
2,4	0,0302	0,0572	0,0779	0,0896	0,0907	0,0819	0,0659	0,0467	0,0288	0,0151	-	-
2,5	0,0289	0,0545	0,0735	0,0831	0,0821	0,0716	0,0548	0,0364	0,0206	0,0097	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Значения $T\lambda(t)$ для распределения Вейбулла-Гнеденко

$$T\lambda(t) = b\left(\frac{t}{T_{cp}}\right)^{b-1}$$

$\frac{t}{T_{cp}}$	***Постоянная величина b***											
	0,2	***0,4***	***0,6***	***0,8***	***1,0***	***1,2***	***1,4***	***1,6***	***1,8***	***2,0***	***3,0***	***4,0***
0,1	*1,2618*	*1,5925*	*1,5071*	*1,2680*	*1,0*	*0,7571*	*0,5573*	*0,4019*	*0,2853*	*0,2*	*0,300*	*0,0040*
0,2	*0,7248*	*1,0506*	*1,1421*	*1,1037*	*1,0*	*0,8697*	*0,7354*	*0,6092*	*0,4967*	*0,4*	*0,1200*	*0,0320*
0,3	*0,5240*	*0,8238*	*0,9712*	*1,0179*	*1,0*	*0,9433*	*0,8649*	*0,7770*	*0,6870*	*0,6*	*0,2700*	*0,1080*
0,4	*0,4164*	*0,6932*	*0,8657*	*0,9609*	*1,0*	*0,9990*	*0,9703*	*0,9233*	*0,8648*	*0,8*	*0,4800*	*0,2560*
0,5	*0,3482*	*0,6061*	*0,7917*	*0,9188*	*1,0*	*1,0447*	*1,0611*	*1,0556*	*1,0338*	*1,0*	*0,7500*	*0,5000*
0,6	*0,3009*	*0,5434*	*0,7361*	*0,8861*	*1,0*	*1,0835*	*1,1412*	*1,1776*	*1,1961*	*1,2*	*1,0801*	*0,8641*
0,7	*0,2659*	*0,4955*	*0,6922*	*0,8592*	*1,0*	*1,1174*	*1,2139*	*1,2917*	*1,3532*	*1,4*	*1,4701*	*1,3721*
0,8	*0,2391*	*0,4572*	*0,6561*	*0,8366*	*1,0*	*1,1476*	*1,2804*	*1,3994*	*1,5058*	*1,6*	*1,9199*	*2,0480*
0,9	*0,2175*	*0,4262*	*0,6259*	*0,8170*	*1,0*	*1,1750*	*1,3422*	*1,5021*	*1,6542*	*1,8*	*2,4299*	*2,9158*
1,0	*0,2001*	*0,4001*	*0,5999*	*0,7999*	*1,0*	*1,2001*	*1,3998*	*1,5999*	*1,7999*	*2,0*	*2,9997*	*3,9997*
1,1	*0,1854*	*0,3778*	*0,5774*	*0,7849*	*1,0*	*1,2231*	*1,4547*	*1,6942*	*1,9426*	*2,2*	*3,6302*	*5,3238*
1,2	*0,1729*	*0,3585*	*0,5578*	*0,7713*	*1,0*	*1,2444*	*1,5056*	*1,7849*	*2,0822*	*2,4*	*4,3209*	*6,9141*
1,3	*0,1621*	*0,3416*	*0,5403*	*0,7590*	*1,0*	*1,2645*	*1,5551*	*1,8723*	*2,2202*	*2,8*	*5,0720*	*8,7861*
1,4	*0,1527*	*0,3268*	*0,5247*	*0,7479*	*1,0*	*1,2834*	*1,6012*	*1,9578*	*2,3563*	*3,0*	*5,8818*	-
1,5	*0,1446*	*0,3135*	*0,5102*	*0,7376*	*1,0*	*1,3011*	*1,6468*	*2,0407*	*2,4896*	*3,2*	*6,7544*	-
1,6	*0,1374*	*0,3019*	*0,4970*	*0,7280*	*1,0*	*1,3184*	*1,6897*	*2,1209*	*2,6208*	*3,4*	*7,6988*	-
1,7	*0,1307*	*0,2910*	*0,4852*	*0,7196*	*1,0*	*1,3344*	*1,7316*	*2,1998*	*2,7537*	*3,8*	*8,6081*	-
1,8	*0,1250*	*0,2810*	*0,4743*	*0,7116*	*1,0*	*1,3490*	*1,7710*	*2,2772*	*2,8806*	*4,0*	*9,8276*	-
1,9	*0,1197*	*0,2721*	*0,4639*	*0,7037*	*1,0*	*1,3643*	*1,8089*	*2,3507*	*3,0072*	*4,2*	-	-
2,0	*0,1148*	*0,2637*	*0,4547*	*0,6965*	*1,0*	*1,3791*	*1,8487*	*2,4274*	*3,1368*	*4,4*	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Значения функции $f_0(z) = f_0\left(\dfrac{t-T}{\sigma}\right)$ для нормального распределения

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	1681	0669
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449
2,1	0440	0431	0422	0413	0404	0395	0387	0379	0371	0363
2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139
2,6	0136	0132	0129	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107
2,7	0104	0101	009	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061
2,9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034
3,1	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025	0025
3,2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018
3,3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013
3,4	0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009
3,5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006
3,6	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004
3,7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003
3,8	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002
3,9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001
4,0	0001	0001	0001	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Значения функции $f_1(y) = f_1\left(\frac{T_{ср} - t}{\sigma}\right)$ для нормального распределения

y	$f_1(y)$	y	$f_1(y)$	y	$f_1(y)$	y	$f_1(y)$
-6,0	6,158	-3,0	3,283	0,0	0,798	3,0	0,0044
-5,9	6,061	-2,9	3,190	0,1	0,735	3,1	0,00327
-5,8	5,963	-2,8	3,098	0,2	0,675	3,2	0,00239
-5,7	5,866	-2,7	3,006	0,3	0,617	3,3	0,00172
-5,6	5,769	-2,6	2,914	0,4	0,562	3,4	0,00123
-5,5	5,672	-2,5	2,823	0,5	0,509	3,5	0,000873
-5,4	5,574	-2,4	2,732	0,6	0,459	3,6	0,000612
-5,3	5,477	-2,3	2,641	0,7	0,412	3,7	0,000425
-5,2	5,380	-2,2	2,552	0,8	0,368	3,8	0,000292
-5,1	5,283	-2,1	2,462	0,9	0,326	3,9	0,000199
-5,0	5,186	-2,0	2,373	1,0	0,288	4,0	0,000134
-4,9	5,090	-1,9	2,285	1,1	0,252	4,1	0,0000893
-4,8	4,993	-1,8	2,197	1,2	0,219	4,2	0,0000589
-4,7	4,897	-1,7	2,110	1,3	0,190	4,3	0,0000385
-4,6	4,800	-1,6	2,024	1,4	0,163	4,4	0,0000249
-4,5	4,704	-1,5	1,939	1,5	0,139	4,5	0,0000160
-4,4	4,608	-1,4	1,854	1,6	0,117	4,6	0,0000101
-4,3	4,512	-1,3	1,770	1,7	0,0984	4,7	0,0(5)637
-4,2	4,417	-1,2	1,688	1,8	0,0819	4,8	0,0(5)396
-4,1	4,321	-1,1	1,606	1,9	0,0676	4,9	0,0(5)244
-4,0	4,226	-1,0	1,525	2,0	0,0552	5,0	0,0(5)149
-3,9	4,130	-0,9	1,446	2,1	0,0448	5,1	0,0(6)897
-3,8	4,035	-0,8	1,367	2,2	0,0360	5,2	0,0(6)536
-3,7	3,940	-0,7	1,290	2,3	0,0286	5,3	0,0(6)317
-3,6	3,846	-0,6	1,215	2,4	0,0226	5,4	0,0(6)186
-3,5	3,751	-0,5	1,141	2,5	0,0176	5,5	0,0(6)108
-3,4	3,657	-0,4	1,069	2,6	0,0136	5,6	0,0(7)618
-3,3	3,562	-0,3	0,998	2,7	0,0105	5,7	0,0(7)315
-3,2	3,470	-0,2	0,929	2,8	0,00794	5,8	0,0(7)198
-3,1	3,376	-0,1	0,863	2,9	0,00596	5,9	0,0(7)110
						6,0	0,0(8)61

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Квантили нормального распределения

(для значений вероятности меньших 0,5 выполняется $U_{\gamma} = -U_{1-\gamma}$)

γ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,50	*0,000*	*0,003*	*0,005*	*0,008*	*0,010*	*0,013*	*0,015*	*0,018*	*0,020*	*0,023*
0,51	*0,025*	*0,028*	*0,030*	*0,033*	*0,035*	*0,038*	*0,040*	*0,043*	*0,045*	*0,048*
0,52	*0,050*	*0,053*	*0,055*	*0,058*	*0,060*	*0,063*	*0,065*	*0,068*	*0,070*	*0,073*
0,53	*0,075*	*0,078*	*0,080*	*0,083*	*0,085*	*0,088*	*0,090*	*0,093*	*0,095*	*0,098*
0,54	*0,100*	*0,103*	*0,105*	*0,108*	*0,111*	*0,113*	*0,116*	*0,118*	*0,121*	*0,123*
0,55	*0,126*	*0,128*	*0,131*	*0,133*	*0,136*	*0,138*	*0,141*	*0,143*	*0,146*	*0,148*
0,56	*0,151*	*0,154*	*0,156*	*0,159*	*0,161*	*0,164*	*0,166*	*0,169*	*0,171*	*0,174*
0,57	*0,176*	*0,179*	*0,181*	*0,184*	*0,187*	*0,189*	*0,192*	*0,194*	*0,197*	*0,199*
0,58	*0,202*	*0,204*	*0,207*	*0,210*	*0,212*	*0,215*	*0,217*	*0,220*	*0,222*	*0,225*
0,59	*0,228*	*0,230*	*0,233*	*0,235*	*0,238*	*0,240*	*0,243*	*0,246*	*0,248*	*0,251*
0,60	*0,253*	*0,256*	*0,259*	*0,261*	*0,264*	*0, 266*	*0,269*	*0,272*	*0,274*	*0,277*
0,61	*0,279*	*0,282*	*0,285*	*0,287*	*0,290*	*0,292*	*0,295*	*0,298*	*0,300*	*0,303*
0,62	*0,305*	*0,308*	*0,311*	*0,313*	*0,316*	*0,319*	*0,321*	*0,324*	*0,327*	*0,329*
0,63	*0,332*	*0,335*	*0,337*	*0,340*	*0,342*	*0,345*	*0,348*	*0,350*	*0,353*	*0,356*
0,64	*0,358*	*0,361*	*0,364*	*0,366*	*0,369*	*0,372*	*0,375*	*0,377*	*0,380*	*0,383*
0,65	*0,385*	*0,388*	*0,391*	*0,393*	*0,393*	*0,399*	*0,402*	*0,404*	*0,407*	*0,410*
0,66	*0,412*	*0,415*	*0,418*	*0,421*	*0,423*	*0,426*	*0,429*	*0,432*	*0,434*	*0,437*
0,67	*0,440*	*0,443*	*0,445*	*0,448*	*0,451*	*0,454*	*0,457*	*0,459*	*0,462*	*0,465*
0,68	*0,468*	*0,470*	*0,473*	*0,476*	*0,479*	*0,482*	*0,485*	*0,487*	*0,490*	*0,493*
0,69	*0,496*	*0,499*	*0,502*	*0,504*	*0,507*	*0,510*	*0,513*	*0,516*	*0,519*	*0,522*
0,70	*0,524*	*0,527*	*0,530*	*0,533*	*0,536*	*0,539*	*0,542*	*0,545*	*0,548*	*0,550*
0,71	*0,553*	*0,556*	*0,559*	*0,562*	*0,565*	*0,568*	*0,571*	*0,574*	*0,577*	*0,580*
0,72	*0,583*	*0,586*	*0,589*	*0,592*	*0,595*	*0,598*	*0,601*	*0,604*	*0,607*	*0,610*
0,73	*0,613*	*0,616*	*0,619*	*0,622*	*0,625*	*0,628*	*0,631*	*0,634*	*0,637*	*0,640*
0,74	*0,643*	*0,646*	*0,650*	*0,653*	*0,656*	*0,659*	*0,662*	*0,665*	*0,668*	*0,671*
0,75	*0,674*	*0,678*	*0,681*	*0,684*	*0,687*	*0,690*	*0,693*	*0,697*	*0,700*	*0,703*
0,76	*0,706*	*0,710*	*0,713*	*0,716*	*0,719*	*0,722*	*0,726*	*0,729*	*0,732*	*0,736*
0,77	*0,739*	*0,742*	*0,745*	*0,749*	*0,752*	*0,755*	*0,759*	*0,762*	*0,765*	*0,769*
0,78	*0,772*	*0,776*	*0,779*	*0,782*	*0,786*	*0,789*	*0,793*	*0,796*	*0,800*	*0,803*
0,79	*0,806*	*0,810*	*0,813*	*0,817*	*0,820*	*0,824*	*0,827*	*0,831*	*0,834*	*0,838*
0,80	*0,842*	*0,845*	*0,849*	*0,852*	*0,856*	*0,860*	*0,863*	*0,867*	*0,871*	*0,874*
0,81	*0,878*	*0,882*	*0,885*	*0,889*	*0,893*	*0,896*	*0,900*	*0,904*	*0,908*	*0,912*
0,82	*0,915*	*0,919*	*0,923*	*0,927*	*0,931*	*0,935*	*0,938*	*0,942*	*0,946*	*0,950*
0,83	*0,954*	*0,958*	*0,962*	*0,966*	*0,970*	*0,974*	*0,978*	*0,982*	*0,986*	*0,990*
0,84	*0,994*	*0,999*	*1,003*	*1,007*	*1,011*	*1,015*	*1,019*	*1,024*	*1,028*	*1,032*
0,85	*1,036*	*1,041*	*1,045*	*1,049*	*1,054*	*1,058*	*1,063*	*1,067*	*1,071*	*1,076*
0,86	*1,080*	*1,085*	*1,089*	*1,094*	*1,098*	*1,103*	*1,108*	*1,112*	*1,117*	*1,122*
0,87	*1,126*	*1,131*	*1,136*	*1,141*	*1,146*	*1,150*	*1,155*	*1,160*	*1,165*	*1,170*
0,88	*1,175*	*1,180*	*1,185*	*1,190*	*1,195*	*1,200*	*1,206*	*1,211*	*1,216*	*1,221*
0,89	*1,227*	*1,232*	*1,237*	*1,243*	*1,248*	*1,254*	*1,259*	*1,265*	*1,270*	*1,276*
0,90	*1,282*	*1,287*	*1,293*	*1,299*	*1,305*	*1,311*	*1,317*	*1,323*	*1,329*	*1,335*
0,91	*1,341*	*1,347*	*1,353*	*1,359*	*1,366*	*1,372*	*1,379*	*1,385*	*1,392*	*1,398*
0,92	*1,405*	*1,412*	*1,419*	*1,426*	*1,433*	*1,440*	*1,447*	*1,454*	*1,461*	*1,468*
0,93	*1,476*	*1,483*	*1,491*	*1,499*	*1,506*	*1,514*	*1,522*	*1,530*	*1,538*	*1,546*
0,94	*1,555*	*1,563*	*1,572*	*1,580*	*1,589*	*1,598*	*1,607*	*1,616*	*1,626*	*1,635*
0,95	*1,645*	*1,655*	*1,665*	*1,675*	*1,685*	*1,695*	*1,706*	*1,717*	*1,728*	*1,739*
0,96	*1,751*	*1,762*	*1,774*	*1,787*	*1,799*	*1,812*	*1,825*	*1,838*	*1,852*	*1,866*
0,97	*1,881*	*1,896*	*1,911*	*1,927*	*1,943*	*1,960*	*1,977*	*1,995*	*2,014*	*2,034*
0,98	*2,054*	*2,075*	*2,097*	*2,120*	*2,144*	*2,170*	*2,197*	*2,226*	*2,257*	*2,290*
0,99	*2,320*	*2,366*	*2,409*	*2,457*	*2,512*	*2,576*	*2,652*	*2,748*	*2,878*	*3,090*