

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого»

Механико-технологический факультет

Кафедра «Сельскохозяйственные машины»

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ
по дисциплине
«НАДЕЖНОСТЬ МАШИН»

для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и
производство сельскохозяйственной техники»

Попов В.Б.
Голопятин А.В.
Шельманова Е.П.

Гомель 2014

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Практическая работа №1. Обработка информации о показателях надёжности..... | 4 |
| Практическая работа №2. Расчёт показателей надёжности при полной информации..... | 14 |
| Практическая работа №3. Определение вероятности появления случайной величины..... | 23 |
| Практическая работа №4. Определение количественных характеристик надёжности по статическим данным об отказах изделий..... | 30 |
| Практическая работа №5. Стендовые и полигонные испытания. Определение коэффициента ускорений..... | 34 |
| Литература..... | 40 |
| Приложение..... | 41 |

Практическая работа №1 ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О ПОКАЗАТЕЛЯХ НАДЁЖНОСТИ

Общие сведения

Существует несколько методов обработки информации. Некоторые из них (например, метод максимального правдоподобия) сложны, трудоемки, нуждаются в применении электронно-вычислительной техники. Использование таких методов в хозяйствах и на ремонтных предприятиях для обработки информации о надежности тракторов и сельскохозяйственных машин не только затруднено, но и нецелесообразно, так как их точность превышает точность входной информации. Рекомендуемые ниже методы обработки информации просты и надежны. Их могут применять инженеры сельскохозяйственного производства без использования электронно-вычислительных машин.

После составления сводной таблицы информации в порядке возрастания показателя надежности (табл. 1.1) её обрабатывают в такой последовательности:

- Построение статистического ряда исходной информации и определение величины смещения начала рассеивания $t_{см}$.
- Определение среднего значения \bar{t} и среднего квадратического отклонения σ показателя надежности (ПН).
- Проверка информации на выпадающие точки.
- Построение гистограммы, полигона и кривой наклонных опытных вероятностей показателя надежности.
- Определения коэффициента вариации V .
- Выбор теоретического закона распределения (ТЗР), определение его параметров и графическое построение интегральной $F(t)$ и дифференциальной $f(t)$ функций.
- Проверка совпадения опытных и теоретических законов распределения ПН по критериям согласия.
- Определение доверительных границ рассеивания одиночных и средних значений показателя надежности и возможных наибольших ошибок переноса.

Задание

Выполнить обработку информационных данных о показателях надёжности на основании экспериментальной информации о доремонтных ресурсах двигателей по варианту.

Пример выполнения задания

Таблица 1.1

Информация о доремонтных ресурсах двигателя по варианту

| № двигателя | Доремонтный ресурс (мото-ч) | № двигателя | Доремонтный ресурс (мото-ч) | № двигателя | Доремонтный ресурс (мото-ч) |
|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | 1450 | 24 | 3280 | 47 | 4610 |
| 2 | 1510 | 25 | 3320 | 48 | 4640 |
| 3 | 1560 | 26 | 3380 | 49 | 4790 |
| 4 | 1670 | 27 | 3420 | 50 | 4820 |
| 5 | 1680 | 28 | 3480 | 51 | 4940 |
| 6 | 1750 | 29 | 3510 | 52 | 4980 |
| 7 | 2010 | 30 | 3570 | 53 | 5030 |
| 8 | 2140 | 31 | 3600 | 54 | 5110 |
| 9 | 2290 | 32 | 3670 | 55 | 5200 |
| 10 | 2350 | 33 | 3780 | 56 | 5460 |
| 11 | 2410 | 34 | 3920 | 57 | 5580 |
| 12 | 2550 | 35 | 4020 | 58 | 5620 |
| 13 | 2690 | 36 | 4170 | 59 | 5750 |
| 14 | 2720 | 37 | 4210 | 60 | 6180 |
| 15 | 2880 | 38 | 4230 | 61 | 6280 |
| 16 | 2900 | 39 | 4250 | 62 | 6410 |
| 17 | 3040 | 40 | 4300 | 63 | 6680 |
| 18 | 3070 | 41 | 4360 | 64 | 6740 |
| 19 | 3100 | 42 | 4390 | 65 | 6820 |
| 20 | 3150 | 43 | 4460 | 66 | 7180 |
| 21 | 3180 | 44 | 4480 | 67 | 7350 |
| 22 | 3210 | 45 | 4530 | 68 | 7490 |
| 23 | 3250 | 46 | 4570 | 69 | 7870 |
| | | | | 70 | 8000 |

1. Построение статистического ряда исходной информации и определение величины смещения начала рассеивания.

1.1. Количество интервалов статистического ряда n определяем из уравнения:

$$n = \sqrt{N}.$$

Полученный результат округляем в сторону увеличения до ближайшего целого числа. Количество интервалов не должно выходить за пределы $n = 6 \dots 20$.

$n = \sqrt{70} \approx 9$ интервалов.

1.2. Величину одного интервала A определяем из уравнения:

$$A = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{n},$$

где t_{\max} и t_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее значения показателей надежности в сводной таблице данных.

$t_{\max} = T_{op70} = 8000$ мото-ч, $t_{\min} = T_{op1} = 1450$ мото-ч.

$$A = \frac{8000 - 1450}{9} \approx 728 \text{ мото-ч.}$$

1.3. Определяем границы каждого интервала в единицах показателя надежности по формулам

$$t_{iH} = t_{(i-1)B},$$

$$t_{iB} = t_{iH} + A,$$

где t_{iH} и t_{iB} – нижняя и верхняя граница интервала соответственно.

За начало первого интервала t_{1H} следует принимать наименьшее значение показателя надёжности (ПН).

Для первого интервала $t_{1H} = T_{op1} = 1450$ мото-ч;

$$t_{1B} = t_{1H} + A = 1450 + 728 = 2178 \text{ мото-ч.}$$

Для второго интервала $t_{2H} = t_{1B} = 2178$ мото-ч;

$$t_{2B} = t_{2H} + A = 2178 + 728 = 2906 \text{ мото-ч.}$$

Для третьего интервала $t_{3H} = t_{2B} = 2906$ мото-ч;

$$t_{3B} = t_{3H} + A = 2906 + 728 = 3634 \text{ мото-ч.}$$

Для четвертого интервала $t_{4H} = t_{3B} = 3634$ мото-ч;

$$t_{4B} = t_{4H} + A = 3634 + 728 = 4362 \text{ мото-ч.}$$

Для пятого интервала $t_{5H} = t_{4B} = 4362$ мото-ч;

$$t_{5B} = t_{5H} + A = 4362 + 728 = 5090 \text{ мото-ч.}$$

Для шестого интервала $t_{6H} = t_{5B} = 5090$ мото-ч;

$$t_{6B} = t_{6H} + A = 5090 + 728 = 5818 \text{ мото-ч.}$$

Для седьмого интервала $t_{7H} = t_{6B} = 5818$ мото-ч;

$$t_{7B} = t_{7H} + A = 5818 + 728 = 6546 \text{ мото-ч.}$$

Для восьмого интервала $t_{8H} = t_{7B} = 6546$ мото-ч;

$$t_{8B} = t_{8H} + A = 6546 + 728 = 7274 \text{ мото-ч.}$$

Для девятого интервала $t_{9H} = t_{8B} = 7274$ мото-ч;

$$t_{9B} = t_{9H} + A = 7274 + 728 = 8002 \text{ мото-ч.}$$

1.4. Определяем количество случаев (частота m) в каждом интервале. Если точка информации попадает на границу между интервалами, то в предыдущий и в последующий интервалы вносят по 0,5 точки.

| | |
|--------------------------|-------------|
| Для первого интервала | $m_1 = 8.$ |
| Для второго интервала | $m_2 = 8.$ |
| Для третьего интервала | $m_3 = 15.$ |
| Для четвертого интервала | $m_4 = 10.$ |
| Для пятого интервала | $m_5 = 12.$ |
| Для шестого интервала | $m_6 = 6.$ |
| Для седьмого интервала | $m_7 = 3.$ |
| Для восьмого интервала | $m_8 = 4.$ |
| Для девятого интервала | $m_9 = 4.$ |

1.5. Определяем опытную вероятность появления показателя надежности в каждом интервале

$$P_i = m_i / N.$$

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Для первого интервала | $P_1 = 8 / 70 = 0,114.$ |
| Для второго интервала | $P_2 = 8 / 70 = 0,114.$ |
| Для третьего интервала | $P_3 = 15 / 70 = 0,214.$ |
| Для четвертого интервала | $P_4 = 10 / 70 = 0,143.$ |
| Для пятого интервала | $P_5 = 12 / 70 = 0,171.$ |
| Для шестого интервала | $P_6 = 6 / 70 = 0,086.$ |
| Для седьмого интервала | $P_7 = 3 / 70 = 0,043.$ |
| Для восьмого интервала | $P_8 = 4 / 70 = 0,057.$ |
| Для девятого интервала | $P_9 = 4 / 70 = 0,057.$ |

1.6. Определяем накопленную (интегральную) опытную вероятность $\sum P_i$.

$$\sum P_i = P_i + \sum P_{i-1}$$

| | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Для первого интервала | $\sum P_1 = 0,114.$ |
| Для второго интервала | $\sum P_2 = 0,114 + 0,114 = 0,228.$ |
| Для третьего интервала | $\sum P_3 = 0,214 + 0,228 = 0,442.$ |
| Для четвертого интервала | $\sum P_4 = 0,143 + 0,442 = 0,585$ |
| Для пятого интервала | $\sum P_5 = 0,171 + 0,585 = 0,756$ |
| Для шестого интервала | $\sum P_6 = 0,086 + 0,756 = 0,842$ |
| Для седьмого интервала | $\sum P_7 = 0,043 + 0,842 = 0,885$ |
| Для восьмого интервала | $\sum P_8 = 0,057 + 0,885 = 0,942$ |
| Для девятого интервала | $\sum P_9 = 0,057 + 0,942 = 0,999$ |

1.7. Определяем смещение начала рассеивания показателя надежности.

При определении величины смещения начала рассеивания $t_{см}$ используем практические рекомендации:

- при наличии статистического ряда информации ($N > 25$) величина смещения $t_{см}$ равна:

$$t_{см} = t_{1н} - 0,5 \cdot A,$$

где $t_{1н}$ – значение начала первого интервала;

A – величина одного интервала.

$$t_{см} = 1450 - 0,5 \cdot 728 = 1086$$

2. Определение среднего значения и среднего квадратического отклонения показателя надежности.

2.1. Среднее значение является важной характеристикой показателя надежности. Зная средние значения, планируют работу машины, составляют заявку на запасные части, определяют объем ремонтных работ и т. д.

Среднее значение показателя надежности \bar{t} определяем по уравнению:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n t_{ic} \cdot P_i,$$

где n – количество интервалов в статистическом ряду;

t_{ic} – значение середины i -го интервала;

P_i – опытная вероятность i -го интервала.

Определим значения середины каждого интервала:

$$t_{ic} = \frac{t_{iн} + t_{iк}}{2}.$$

$$t_{1c} = \frac{1450 + 2178}{2} = 1814; \quad t_{2c} = \frac{2178 + 2906}{2} = 2542;$$

$$t_{3c} = \frac{2906 + 3634}{2} = 3270; \quad t_{4c} = \frac{3634 + 4362}{2} = 3998;$$

$$t_{5c} = \frac{4362 + 5090}{2} = 4726; \quad t_{6c} = \frac{5090 + 5818}{2} = 5454;$$

$$t_{7c} = \frac{5818 + 6546}{2} = 6182; \quad t_{8c} = \frac{6546 + 7274}{2} = 6910;$$

$$t_{9c} = \frac{7274 + 8002}{2} = 7638.$$

Среднее значение показателя

$$\bar{t} = \sum_1^9 1814 \cdot 0,114 + 2542 \cdot 0,114 + \dots + 6910 \cdot 0,057 + 7638 \cdot 0,057 = 4144$$

2.2. При определении среднего значения величин \bar{q} , обратных основным показателям надежности \bar{t} , воспользуемся средними гармоническими значениями, определяемыми по уравнению:

$$\bar{q} = \frac{1}{\bar{t}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i}.$$

$$\bar{q} = \frac{1}{4144} = 2,4 \cdot 10^{-4}.$$

2.3. Среднее квадратическое отклонение определим по уравнению:

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^N (t_i - \bar{t})^2 \cdot P_i}.$$

$$\sigma = \sqrt{(1814 - 4144)^2 \cdot 0,114 + \dots + (7638 - 4144)^2 \cdot 0,057} = 1612 \text{ мото-ч.}$$

3. Проверка информации на выпадающие точки.

3.1. Грубую проверку информации проводим по правилу

$$\bar{t} = \pm 3\sigma,$$

т. е. полученное расчетным путем среднее значение показателя надежности последовательно уменьшаем и увеличиваем на 3σ . Если крайние точки информации не выходят за пределы $\bar{t} = \pm 3\sigma$, все точки информации действительны.

$$4144 - 3 \cdot 1612 = -692 \text{ мото-ч (нижняя граница)}$$

$$4144 + 3 \cdot 1612 = 8980 \text{ мото-ч (верхняя граница)}.$$

Наименьший доремонтный ресурс двигателя $T_{dp1} = 1450$ мото-ч. Следовательно, эта точка информации действительна и должна быть учтена при дальнейших расчетах ($1450 > -692$).

Наибольший ресурс двигателя $T_{dp70} = 8000$ также не выходит за верхнюю границу достоверности ($8000 > 8979$ мото-ч). Поэтому она тоже должна учитываться в дальнейших расчетах.

3.2. Проверим смежные точки информации по критерию λ (критерий Ирвина).

Фактическое значение критерия λ_{on} определим по уравнению:

$$\lambda_{on} = \frac{1}{\sigma} \cdot (t_i - t_{i-1}),$$

где t_i и t_{i-1} – смежные точки информации.

λ_{on} для крайних точек информации:

- для наименьшей точки информации ($T_{dp1} = 1450$ мото-ч)

$$\lambda_{on} = \frac{1}{\sigma}(T_{dp1} - T_{dp2}) = \frac{1510 - 1450}{1612} \approx 0,37;$$

- для наибольшей точки информации ($T_{dp70} = 8000$ мото-ч)

$$\lambda_{on} = \frac{1}{\sigma}(T_{dp70} - T_{dp69}) = \frac{8000 - 7870}{1612} \approx 0,08.$$

Сравним опытные и теоретические (см. табл. П.1) критерии при $N = 70$:

- первая точка информации $T_{dp1} = 1450$ мото-ч является достоверной точкой ($\lambda_{on} = 0,37 < \lambda = 1,1$) и её следует учитывать при дальнейших расчетах;
- последняя точка информации $T_{dp70} = 8000$ мото-ч является достоверной точкой ($\lambda_{on} = 0,08 < \lambda = 1,1$), и её следует учитывать в дальнейших расчетах.

Если проверка исключает точки информации, то необходимо вновь перестроить статистический ряд и пересчитать среднее значение и среднее квадратическое отклонение показателя надежности.

Приведем уточненный статистический ряд распределения доремонтного ресурса двигателя в таблицу.

Таблица 1.2

Уточненный статический ряд распределения

| Интервал, мото-ч | m_i | P_i | $\sum P_i$ |
|------------------|-------|-------|------------|
| 1450-2178 | 8 | 0,114 | 0,114 |
| 2178-2906 | 8 | 0,114 | 0,228 |
| 2906-3634 | 15 | 0,214 | 0,442 |
| 3634-4362 | 10 | 0,143 | 0,585 |
| 4362-5090 | 12 | 0,171 | 0,756 |
| 5090-5818 | 6 | 0,086 | 0,842 |
| 5818-6546 | 3 | 0,043 | 0,885 |
| 6546-7274 | 4 | 0,057 | 0,942 |
| 7274-8002 | 4 | 0,057 | 0,999 |

4. Построение гистограммы, полигона и кривой накопленных опытных вероятностей показателя надежности.

Составленный по данным исходной информации уточненный статистический ряд (табл. 1.2) дает полную характеристику опытного распределения показателя надежности.

По данным статистического ряда можно строим гистограмму,

полигон и кривую накопленных опытных вероятностей (рис. 1.1). По оси абсцисс откладываем в масштабе значение показателя надежности t , а по оси ординат – опытную вероятность P_i (у гистограммы и полигона) и накопленную опытную вероятность $\sum P_i$ (у кривой накопленных вероятностей).

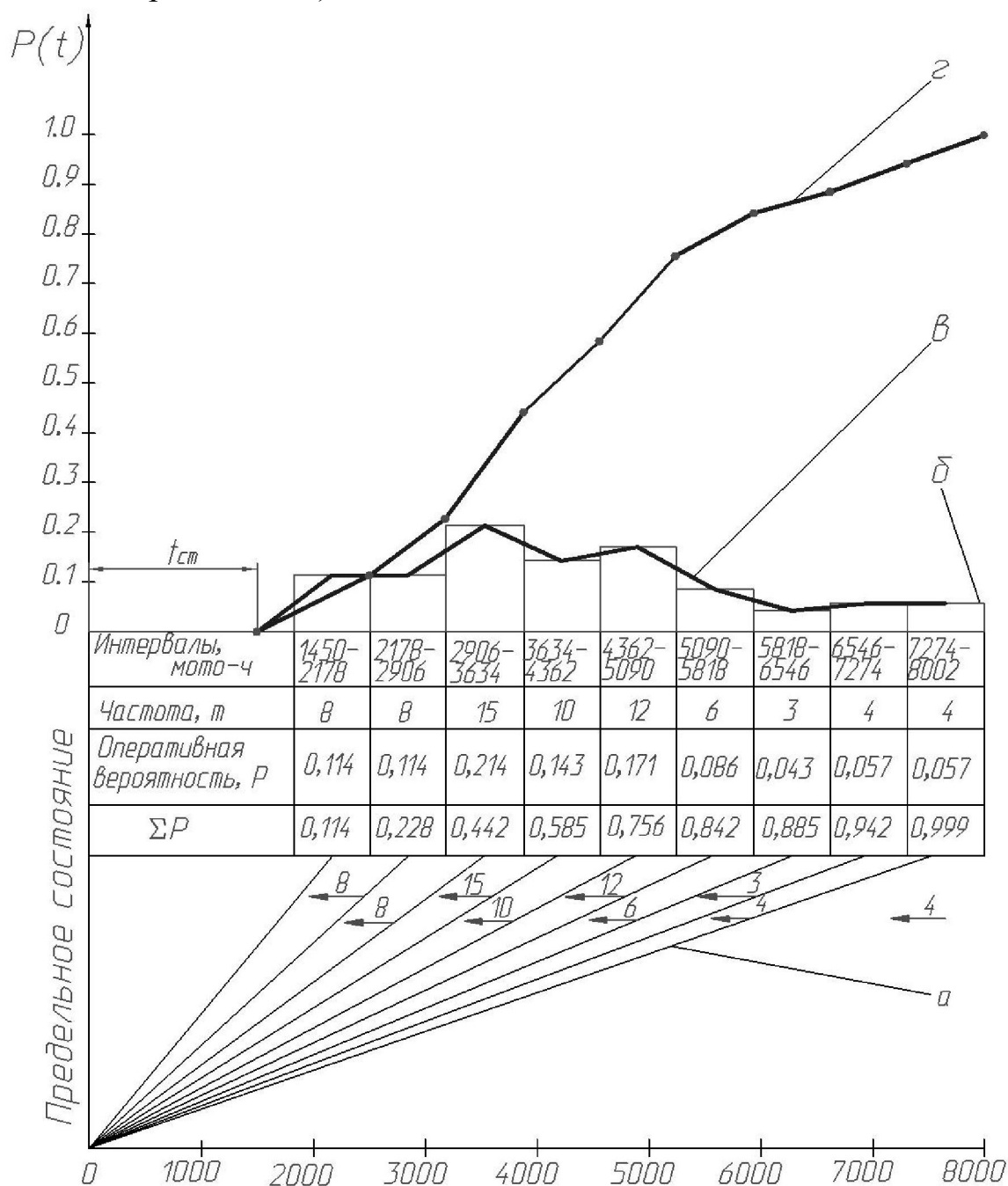


Рис. 1.1. Схема обработки информации о показателях надежности: а – распределение первичной информации; б – гистограмма распределения; в – полигон распределения; z – кривая накопленных вероятностей

5. Определим значение коэффициента вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{t} - t_{cm}},$$

где $\bar{t} = 4144$ мото-ч; $\sigma = 1612$ мото-ч; $t_{cm} = 1086$.

$$\nu = \frac{1612}{4144 - 1086} = 0,527.$$

6. Определяем параметры закона распределения Вейбулла

6.1. По коэффициенту вариации из таблицы П.2. приложения практического руководства выбираем коэффициенты:

$b = 2$; $K_b = 0,886$; $C_b = 0,463$.

6.2. Параметр a находим по уравнению:

$$a = \frac{\sigma}{C_b} = \frac{1612}{0,463} = 3482 \text{ мото-ч.}$$

Таблица 1.3

Исходные данные

| Вариант 1 | | | | | | | Вариант 2 | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 1340 | 2500 | 3440 | 3920 | 4200 | 4790 | 5680 | 1490 | 3080 | 3650 | 4110 | 4600 | 5590 | 6640 |
| 1350 | 2740 | 3480 | 3960 | 4220 | 4800 | 5840 | 1520 | 3120 | 3710 | 4180 | 4750 | 5620 | 6720 |
| 1420 | 2950 | 3520 | 4650 | 4280 | 4820 | 5980 | 1640 | 3140 | 3750 | 4240 | 4760 | 5780 | 6980 |
| 1550 | 3080 | 3550 | 3790 | 4320 | 4890 | 6030 | 1710 | 3160 | 3790 | 4280 | 4890 | 5840 | 6990 |
| 1760 | 3190 | 3590 | 3820 | 4370 | 4930 | 6170 | 2180 | 3230 | 3810 | 4350 | 4930 | 5910 | 7210 |
| 2050 | 3250 | 3630 | 3960 | 4420 | 5060 | 6240 | 2390 | 3300 | 3840 | 4420 | 4950 | 5960 | 7390 |
| 2160 | 3260 | 3650 | 4080 | 4490 | 5120 | 6420 | 2430 | 3360 | 3880 | 4440 | 4990 | 6010 | 7550 |
| 2210 | 3300 | 3770 | 4120 | 4540 | 5200 | 6940 | 2660 | 3410 | 3950 | 4470 | 5300 | 6290 | 7960 |
| 2300 | 3350 | 3860 | 4140 | 4680 | 5360 | 7020 | 2890 | 3450 | 4050 | 4500 | 5420 | 6320 | 8010 |
| 2450 | 3360 | 3890 | 4180 | 4750 | 5470 | 7140 | 3060 | 3540 | 4080 | 4560 | 5450 | 6590 | 8100 |
| Вариант 3 | | | | | | | Вариант 4 | | | | | | |
| 1500 | 3200 | 3580 | 4000 | 4300 | 4600 | 5210 | 1550 | 2570 | 3320 | 4040 | 4780 | 5140 | 6290 |
| 1870 | 3210 | 3610 | 4000 | 4350 | 4710 | 5350 | 1610 | 2640 | 3350 | 4100 | 4790 | 5290 | 6460 |
| 2010 | 3210 | 3620 | 4100 | 4370 | 4730 | 5400 | 1780 | 2790 | 3440 | 4150 | 4820 | 5480 | 6540 |
| 2010 | 3260 | 3700 | 410 | 4380 | 4820 | 5670 | 1790 | 2850 | 3450 | 4220 | 4840 | 5510 | 7190 |
| 2720 | 3300 | 3790 | 410 | 4420 | 4850 | 5790 | 1880 | 2900 | 3510 | 4330 | 4860 | 5740 | 7500 |
| 2900 | 3300 | 3810 | 4180 | 4470 | 4910 | 5840 | 1920 | 3060 | 3560 | 4380 | 4870 | 5830 | 7680 |
| 3020 | 3300 | 3900 | 4210 | 4470 | 4930 | 5900 | 2100 | 3110 | 3680 | 4450 | 4930 | 6010 | 7800 |
| 3060 | 3420 | 3920 | 4230 | 4490 | 4990 | 5950 | 2210 | 3190 | 3770 | 4510 | 4940 | 6080 | 8000 |
| 3060 | 3460 | 3940 | 4260 | 4490 | 4990 | 5970 | 2340 | 3240 | 3810 | 4680 | 5010 | 6120 | 8210 |
| 3180 | 3480 | 3970 | 4300 | 4570 | 5100 | 7800 | 2450 | 3310 | 3940 | 4700 | 5080 | 6160 | 8300 |

Продолжение табл. 1.3

| Вариант 5 | | | | | | | Вариант 6 | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|
| 1600 | 2360 | 3280 | 3880 | 4460 | 5020 | 6220 | 1580 | 2640 | 3380 | 3920 | 4340 | 4950 | 6120 |
| 1680 | 2450 | 3320 | 3910 | 4480 | 5080 | 6340 | 1630 | 2780 | 3410 | 3980 | 4370 | 5020 | 6240 |
| 1750 | 2560 | 3380 | 3970 | 4510 | 5120 | 6450 | 1740 | 2900 | 3450 | 4020 | 4420 | 5120 | 6350 |
| 1840 | 2620 | 3400 | 4020 | 4580 | 5240 | 6620 | 1850 | 2960 | 3540 | 4080 | 4490 | 5230 | 6480 |
| 1920 | 3040 | 3480 | 4180 | 4590 | 5310 | 6810 | 1910 | 3100 | 3660 | 4110 | 4530 | 5340 | 6510 |
| 2020 | 3080 | 3510 | 4190 | 4600 | 5380 | 6950 | 2030 | 3140 | 3720 | 4160 | 4540 | 5410 | 6700 |
| 2160 | 3140 | 3690 | 4220 | 4670 | 5420 | 7240 | 2150 | 3160 | 3760 | 4200 | 4610 | 5560 | 7100 |
| 2170 | 3160 | 3710 | 4290 | 4710 | 5680 | 7360 | 2220 | 3220 | 3780 | 4250 | 4700 | 5700 | 7320 |
| 2230 | 3200 | 3770 | 4360 | 4800 | 5810 | 7800 | 2410 | 3250 | 3820 | 4290 | 4770 | 5790 | 7420 |
| 2300 | 3260 | 3810 | 4400 | 4940 | 5990 | 8050 | 2560 | 3300 | 3840 | 4300 | 4820 | 5840 | 7900 |
| Вариант 7 | | | | | | | Вариант 8 | | | | | | |
| 1540 | 2500 | 3400 | 3950 | 4360 | 4800 | 5690 | 1520 | 3100 | 3440 | 3800 | 4300 | 4820 | 5560 |
| 1600 | 2750 | 3460 | 4040 | 4440 | 4890 | 5740 | 1650 | 3160 | 3480 | 3850 | 4360 | 4890 | 5680 |
| 1740 | 3080 | 3500 | 4060 | 4460 | 4920 | 5890 | 1720 | 3210 | 3520 | 3860 | 4380 | 4920 | 5900 |
| 1750 | 3090 | 3550 | 4100 | 4550 | 4980 | 6020 | 1800 | 3230 | 3550 | 3900 | 4490 | 4960 | 5960 |
| 1860 | 3150 | 3600 | 4110 | 4560 | 5010 | 6090 | 2040 | 3240 | 3590 | 3990 | 4510 | 5010 | 6020 |
| 2000 | 3190 | 3680 | 4160 | 4600 | 5100 | 6320 | 2050 | 3280 | 3620 | 4000 | 4590 | 5100 | 6240 |
| 2040 | 3240 | 3720 | 4220 | 4650 | 5190 | 6540 | 2300 | 3310 | 3690 | 4060 | 4640 | 5120 | 6350 |
| 2100 | 3290 | 3800 | 4240 | 4670 | 5230 | 7100 | 2410 | 3350 | 3710 | 4100 | 4680 | 5230 | 6500 |
| 2250 | 3340 | 3860 | 4290 | 4720 | 5340 | 7260 | 3050 | 3400 | 3750 | 4180 | 4710 | 5340 | 7000 |
| 2360 | 3370 | 3900 | 4310 | 4730 | 5600 | 7800 | 3060 | 3420 | 3760 | 4230 | 4730 | 5460 | 7240 |
| Вариант 9 | | | | | | | Вариант 10 | | | | | | |
| 1510 | 2860 | 3380 | 3720 | 4310 | 4790 | 5920 | 1540 | 2530 | 3320 | 4110 | 4500 | 5100 | 6260 |
| 1620 | 2980 | 3410 | 3780 | 4360 | 4860 | 6080 | 1560 | 3000 | 3450 | 4120 | 4510 | 5160 | 6380 |
| 1740 | 3000 | 3470 | 3810 | 4420 | 4890 | 6150 | 1650 | 3050 | 3560 | 4150 | 4540 | 5240 | 6470 |
| 1800 | 3180 | 3490 | 3950 | 4430 | 4950 | 6250 | 1740 | 3060 | 3640 | 4160 | 4560 | 5380 | 6700 |
| 1940 | 3200 | 3520 | 4060 | 4460 | 5030 | 6320 | 1750 | 3110 | 3780 | 4200 | 4690 | 5450 | 6840 |
| 2100 | 3220 | 3580 | 4080 | 4510 | 5140 | 6450 | 2060 | 3160 | 3850 | 4260 | 4730 | 5670 | 6920 |
| 2220 | 3250 | 3610 | 4120 | 4520 | 5260 | 6780 | 2140 | 3190 | 3910 | 4310 | 4800 | 5800 | 7320 |
| 2330 | 3290 | 3640 | 4150 | 4560 | 5340 | 7200 | 2200 | 3200 | 3950 | 4350 | 4850 | 5900 | 7450 |
| 2560 | 3300 | 3700 | 4210 | 4610 | 5490 | 7340 | 2320 | 3220 | 4060 | 4360 | 4890 | 6120 | 7500 |
| 2640 | 3340 | 3710 | 4280 | 4720 | 5670 | 7540 | 2440 | 3250 | 4100 | 4420 | 4930 | 6180 | 8120 |

Окончание табл. 1.3

| Вариант 11 | | | | | | | Вариант 12 | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|------|
| 1590 | 2610 | 3310 | 3760 | 4260 | 4710 | 5680 | 1450 | 2450 | 3220 | 3540 | 4170 | 4720 | 5520 |
| 1650 | 2800 | 3350 | 3820 | 4270 | 4800 | 5810 | 1560 | 2560 | 3250 | 3550 | 4230 | 4790 | 5610 |
| 1790 | 2860 | 3390 | 3900 | 4340 | 4860 | 5920 | 1620 | 2660 | 3260 | 3660 | 4280 | 4860 | 5800 |
| 1850 | 2900 | 3440 | 3920 | 4350 | 4910 | 6100 | 1780 | 2710 | 3320 | 3780 | 4340 | 4920 | 6100 |
| 2100 | 3020 | 3480 | 4040 | 4380 | 4960 | 6150 | 1840 | 2830 | 3340 | 3800 | 4360 | 5030 | 6120 |
| 2260 | 3090 | 3510 | 4080 | 4410 | 5100 | 6230 | 1860 | 2980 | 3360 | 3910 | 4420 | 5160 | 6320 |
| 2340 | 3100 | 3550 | 4120 | 4490 | 5210 | 6500 | 1950 | 3050 | 3380 | 4000 | 4480 | 5190 | 6450 |
| 2410 | 3160 | 3580 | 4130 | 4560 | 5360 | 7120 | 2100 | 3110 | 3460 | 4080 | 4520 | 5230 | 7200 |
| 2450 | 3220 | 3620 | 4190 | 4600 | 5410 | 7240 | 2250 | 3120 | 3480 | 4110 | 4540 | 5290 | 7240 |
| 2560 | 3290 | 3650 | 4200 | 4640 | 5570 | 7680 | 2330 | 3180 | 3510 | 4150 | 4660 | 5340 | 8100 |
| Вариант 13 | | | | | | | Вариант 14 | | | | | | |
| 1610 | 2600 | 3250 | 3600 | 4190 | 4580 | 5480 | 1710 | 3000 | 3400 | 4060 | 4500 | 5020 | 6350 |
| 1630 | 2670 | 3280 | 3650 | 4220 | 4620 | 5610 | 1830 | 3070 | 3450 | 4100 | 4520 | 5130 | 6480 |
| 1780 | 2750 | 3320 | 3690 | 4230 | 4690 | 5740 | 1980 | 3120 | 3520 | 4150 | 4630 | 5260 | 6570 |
| 2100 | 3040 | 3340 | 3760 | 4280 | 4730 | 5820 | 2100 | 3140 | 3540 | 4160 | 4690 | 5460 | 6720 |
| 2130 | 3060 | 3390 | 3820 | 4310 | 4800 | 6110 | 2230 | 3160 | 3620 | 4220 | 4710 | 5510 | 6850 |
| 2240 | 3110 | 3410 | 3930 | 4330 | 4860 | 6240 | 2340 | 3210 | 3710 | 4230 | 4730 | 5640 | 7340 |
| 2320 | 3160 | 3420 | 4010 | 4370 | 4970 | 6320 | 2520 | 3250 | 3720 | 4310 | 4870 | 5780 | 7450 |
| 2410 | 3190 | 3490 | 4050 | 4420 | 5020 | 6450 | 2610 | 3300 | 3800 | 4350 | 4890 | 5910 | 7800 |
| 2500 | 3200 | 3520 | 4100 | 4460 | 5260 | 7200 | 2800 | 3340 | 3820 | 4400 | 4960 | 6120 | 8210 |
| 2560 | 3210 | 3550 | 4160 | 4500 | 5340 | 7350 | 2960 | 3370 | 3950 | 4460 | 5000 | 6240 | 8300 |

Практическая работа №2

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРИ ПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Общие сведения

При наличии полной информации расчёт показателей надёжности можно приводить как аналитическим, так и графическим методом на основе дифференциальной или интегральной функции выбранного теоретического закона распределения (закон нормального распределения ЗНР или закон распределения Вейбулла ЗРВ). К преимуществам графического метода расчета относится возможность наложения кривых этих функций соответственно на полигон и кривую накопленных опытных вероятностей и на этой основе визуального определения наиболее совпадаю-

щего с опытной информацией теоретического закона распределения, которым и следует пользоваться при дальнейших расчётах показателей надёжности.

Известно, что применительно к отказам дифференциальная и интегральная функция характеризует количество потерявших работоспособность машин или их элементов, или, что практически одно и то же, необходимое количество ремонтных воздействий (устранение эксплуатационных отказов и проведение ремонтов).

По дифференциальной функции $f(t)$ удобно определять количество отказов и соответственно количество ремонтных воздействий в любом интервале наработок, а по интегральной функции – суммарное их количество от начала наблюдения за машинами до заданной наработки t .

При наличии статистического ряда (в случае закона нормального распределения) точки дифференциальной кривой определяют по уравнениям (2.1) и (2.2) и по таблице П.3.

$$f(t_{ic}) = \frac{A}{\sigma} \cdot f_0 \cdot \left(\frac{t_{ic} - \bar{t}}{\sigma} \right); \quad (2.1)$$

$$f_0(-t) = f_0(+t), \quad (2.2)$$

где t_{ic} – среднее значение показателя надёжности в заданном интервале A (или значение середины интервала статистического ряда).

A – величина заданного интервала значений показателя надёжности (или величина интервала статистического ряда).

Значения интегральной функции $F(t)$ определяют по уравнениям (2.3) и (2.4) и данным таблицы П.1.4 приложения.

$$F(t_{is}) = F_0 \left(\frac{t_{is} - \bar{t}}{\sigma} \right), \quad (2.3)$$

где t_{is} – заданное значение показателя надёжности (или верхняя граница i -го интервала статистического ряда).

Из уравнения (2.3) следует, что

$$F_0(-t) = 1 - F_0(t). \quad (2.4)$$

Результаты расчёта позволяют заключить, что дифференциальная функция $f(t_{ic})$ в i -ом интервале статистического ряда равна разности интегральных функций в конце и начале этого же интервала:

$$f(t_{ic}) = F(t_{is}) - F(t_{in}), \quad (2.5)$$

где t_{ic} , t_{is} и t_{in} – значения показателя надёжности соответственно в середине, в конце и начале i -го интервала.

При законе распределения Вейбулла интегральную функцию $F(t)$ определяют по таблице П.5 приложения. Вход в таблицу осуществляется по значению параметра b , указанному в верхней строке таблицы, и по величине отношения

$$\frac{t_{ie} - t_{cm}}{a},$$

где t_{cm} – смещение начала рассеивания;

a – параметр Вейбулла.

Задание

Рассчитать показатели надежности при полной информации на основе обработки данных, взятых из первой практической работы по вариантам (табл. 1.3).

Пример выполнения задания

1. Определяем точки дифференциальной кривой по уравнениям (2.1) и (2.2) и по таблице П.3, используя данные первой практической работы ($\bar{t} = 4144$ мото-ч, $\sigma = 1612$ мото-ч).

1.1. Первый интервал (1450–2178)

абсцисса – значение показателя надёжности в середине первого интервала $t_{1c} = 1814$ мото-ч;

ордината – значение дифференциальной функции (2.1) и (2.2)

$$f(t_{1c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{1814 - 4144}{1612}\right) = 0,452 \cdot f_0(-1,44) = 0,452 \cdot f_0(1,44)$$

По таблице П.3 приложения находим $f_0(1,44) = 0,14$, тогда

$$f(t_{1c}) = 0,452 \cdot 0,14 = 0,063.$$

Следовательно, в первом интервале выйдет из строя (ресурсный отказ) и потребует ремонта 6,3% двигателей.

1.2. Второй интервал (2178–2906)

абсцисса $t_{2c} = 2542$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{2c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{2542 - 4144}{1612}\right) = 0,108,$$

т.е. для 10,8% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.3. Третий интервал (2906–3634)

абсцисса $t_{3c} = 3270$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{3c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{3270 - 4144}{1612}\right) = 0,16,$$

т.е. для 16% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.4. Четвертый интервал (3634–4362)

абсцисса $t_{4c} = 3998$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{4c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{3998 - 4144}{1612}\right) = 0,18,$$

т.е. для 18% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.5. Пятый интервал (4362–5090)

абсцисса $t_{5c} = 4726$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{5c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{4726 - 4144}{1612}\right) = 0,167,$$

т.е. для 16,7% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.6. Шестой интервал (5090–5818)

абсцисса $t_{6c} = 5454$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{6c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{5454 - 4144}{1612}\right) = 0,13,$$

т.е. для 13% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.7. Седьмой интервал (5818–6546)

абсцисса $t_{7c} = 6182$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{7c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{6182 - 4144}{1612}\right) = 0,08,$$

т.е. для 8% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.8. Восьмой интервал (6546–7274)

абсцисса $t_{8c} = 6910$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{8c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{6910 - 4144}{1612}\right) = 0,04,$$

т.е. для 4% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

1.9. Девятый интервал (7274–8002)

абсцисса $t_{9c} = 7638$ мото-ч;

$$\text{ордината } f(t_{9c}) = \frac{728}{1612} \cdot f_0\left(\frac{7638 - 4144}{1612}\right) = 0,018,$$

т.е. для 1,8% двигателей в этом интервале наработок потребуется ремонт.

2. Определяем точки интегральной кривой по уравнениям (2.3) и (2.4) и по таблице П.4.

2.1. Первый интервал (0–2178)

абсцисса 1-ой точки интегральной кривой $t_{1c} = 2178$ мото-ч;

$$\text{ордината } F(t_{1c}) = F_0\left(\frac{2178 - 4144}{1612}\right) = F_0(-1,22) = 1 - F_0(1,22)$$

По таблице П.4 приложения $F_0(1,22) = 0,89$.

$$F(t_{1c}) = 1 - 0,89 = 0,11.$$

Следовательно, в интервале наработок от 0 до 2178 мото-ч выйдет из строя около 11% двигателей.

2.2. Второй интервал (0–2906)

абсцисса $t_{2c} = 2906$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{2c}) = F_0\left(\frac{2906 - 4144}{1612}\right) = F_0(-0,768) = 1 - F_0(0,768) = 0,22$$

т.е. 22% двигателей потребуется ремонт к наработке 2906 мото-ч.

2.3. Третий интервал (0–3634)

абсцисса $t_{3c} = 3634$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{3c}) = F_0\left(\frac{3634 - 4144}{1612}\right) = F_0(-0,32) = 1 - F_0(0,32) = 0,37$$

т.е. 37% двигателей потребуется ремонт к наработке 3634 мото-ч.

2.4. Четвертый интервал (0–4362)

абсцисса $t_{4c} = 4362$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{4c}) = F_0\left(\frac{4362 - 4144}{1612}\right) = F_0(0,13) = 0,55,$$

т.е. 55% двигателей потребуется ремонт к наработке 4362 мото-ч.

2.5. Пятый интервал (0–5090)

абсцисса $t_{5c} = 5090$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{5c}) = F_0\left(\frac{5090 - 4144}{1612}\right) = F_0(0,59) = 0,72$$

т.е. 72% двигателей потребуется ремонт к наработке 5090 мото-ч

2.6. Шестой интервал (0–5818)

абсцисса $t_{6e} = 5818$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{6e}) = F_0\left(\frac{5818 - 4144}{1612}\right) = F_0(1,04) = 0,85$$

т.е. 85% двигателей потребуется ремонт к наработке 5818 мото-ч

2.7. Седьмой интервал (0–6546)

абсцисса $t_{7e} = 6546$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{7e}) = F_0\left(\frac{6546 - 4144}{1612}\right) = F_0(1,49) = 0,93$$

т.е. 93% двигателей потребуется ремонт к наработке 6456 мото-ч

2.8. Восьмой интервал (0–7274)

абсцисса $t_{8e} = 7274$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{8e}) = F_0\left(\frac{7274 - 4144}{1612}\right) = F_0(1,94) = 0,97$$

т.е. 97% двигателей потребуется ремонт к наработке 7274 мото-ч

2.9. Девятый интервал (0–8002)

абсцисса $t_{9e} = 8002$ мото-ч

$$\text{ордината } F(t_{9e}) = F_0\left(\frac{8002 - 4144}{1612}\right) = F_0(2,39) = 0,99$$

т.е. 99% двигателей потребуется ремонт к наработке 8002 мото-ч

3. Определим число вышедших из строя двигателей в каждом интервале наработок, если для выравнивания опытной информации используется закон распределения Вейбулла ($V = 0,527$; $b = 2$; $a = 3482$ мото-ч; $t_{cm} = 1086$ мото-ч).

3.1. Для конца первого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{1e} - t_{cm}}{a} = \frac{2178 - 1086}{3482} = 0,3.$$

По таблице П.5 приложения $F(t_{1e}) = 0,09$,

т.е. для 9% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 2178 мото-ч.

3.2. Для конца второго интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{2e} - t_{cm}}{a} = \frac{2906 - 1086}{3482} = 0,5.$$

По таблице П.5 приложения $F(t_{2e}) = 0,22$

или для 22% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 2906 мото-ч.

3.3. Для конца третьего интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{3\epsilon} - t_{см}}{a} = \frac{3634 - 1086}{3482} = 0,7.$$

$$F(t_{3\epsilon}) = 0,39$$

или для 39% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 3634 мото-ч.

3.4. Для конца четвертого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{4\epsilon} - t_{см}}{a} = \frac{4362 - 1086}{3482} = 0,9.$$

$$F(t_{4\epsilon}) = 0,56$$

или для 56% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 4362 мото-ч.

3.5. Для конца пятого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{5\epsilon} - t_{см}}{a} = \frac{5090 - 1086}{3482} = 1,1.$$

$$F(t_{5\epsilon}) = 0,7$$

или для 70% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 5090 мото-ч.

3.6. Для конца шестого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{6\epsilon} - t_{см}}{a} = \frac{5818 - 1086}{3482} = 1,4.$$

$$F(t_{6\epsilon}) = 0,86$$

или для 86% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 5818 мото-ч.

3.7. Для конца седьмого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{7\epsilon} - t_{см}}{a} = \frac{6546 - 1086}{3482} = 1,6.$$

$$F(t_{7\epsilon}) = 0,94$$

или для 94% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 6546 мото-ч.

3.8. Для конца восьмого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{8\epsilon} - t_{см}}{a} = \frac{7274 - 1086}{3482} = 1,8.$$

$$F(t_{8\epsilon}) = 0,97$$

или для 97% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 7274 мото-ч.

3.9. Для конца девятого интервала статистического ряда:

$$\frac{t_{98} - t_{см}}{a} = \frac{8002 - 1086}{3482} = 2,0.$$

$$F(t_{98}) = 0,98$$

ли для 98% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 0 до 8002 мото-ч.

4. Пользуясь уравнением (2.5) определим значение дифференциальной функции для ЗРВ $f(t_{ic})$.

4.1. Первый интервал (1450–2178)

$$f(t_{1c}) = 0,09 - 0,0 = 0,09,$$

т.е. 9% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 1450 до 2178 мото-ч.

4.2. Второй интервал (2178–2906)

$$f(t_{2c}) = 0,22 - 0,09 = 0,13,$$

т.е. 13% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 2178 до 2906 мото-ч.

4.3. Третий интервал (2906–3634)

$$f(t_{3c}) = 0,39 - 0,22 = 0,17,$$

т.е. 17% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 2906 до 3634 мото-ч.

4.4. Четвертый интервал (3634–4362)

$$f(t_{4c}) = 0,56 - 0,39 = 0,17,$$

т.е. 17% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 3634 до 4362 мото-ч.

4.5. Пятый интервал (4362–5090)

$$f(t_{5c}) = 0,7 - 0,56 = 0,14,$$

т.е. 14% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 4362 до 5090 мото-ч.

4.6. Шестой интервал (5090–5818)

$$f(t_{6c}) = 0,86 - 0,7 = 0,16,$$

т.е. 16% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 5090 до 5818 мото-ч.

4.7. Седьмой интервал (5818–6546)

$$f(t_{7c}) = 0,94 - 0,86 = 0,08,$$

т.е. 8% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 5818 до 6546 мото-ч.

4.8. Восьмой интервал (6546–7274)

$$f(t_{8c}) = 0,97 - 0,94 = 0,03,$$

т.е. 3% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 6546 до 7274 мото-ч.

4.9. Девятый интервал (7274–8002)

$$f(t_{1c}) = 0,98 - 0,97 = 0,01,$$

т.е. 1% двигателей потребуется ремонт в интервале наработок от 7274 до 8002 мото-ч.

5. Результаты расчёта интегральных и дифференциальных функций ЗНР и ЗРВ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Сводная таблица опытных и теоретических распределений доремонтных ресурсов двигателей

| Интервал, мото-ч | Опытная вероят- ность | Дифференциальная функция | | $\sum P_i$ | Интегральная функция | |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|------------|-------------------------|------|
| | | ЗНР | ЗРВ | | ЗНР | ЗРВ |
| 1450-2178 | 0,114 | 0,063 | 0,09 | 0,114 | 0,11 | 0,09 |
| 2178-2906 | 0,114 | 0,108 | 0,13 | 0,228 | 0,22 | 0,22 |
| 2906-3634 | 0,214 | 0,16 | 0,17 | 0,442 | 0,37 | 0,39 |
| 3634-4362 | 0,143 | 0,18 | 0,17 | 0,585 | 0,55 | 0,56 |
| 4362-5090 | 0,171 | 0,167 | 0,14 | 0,756 | 0,72 | 0,7 |
| 5090-5818 | 0,086 | 0,13 | 0,16 | 0,842 | 0,85 | 0,86 |
| 5818-6546 | 0,043 | 0,08 | 0,08 | 0,885 | 0,93 | 0,94 |
| 6546-7274 | 0,057 | 0,04 | 0,03 | 0,942 | 0,97 | 0,97 |
| 7274-8002 | 0,057 | 0,018 | 0,01 | 0,999 | 0,99 | 0,98 |

6. По данным табл. 2.1 строим кривые дифференциальной $f(t)$ и интегральной $F(t)$ функций ЗНР и ЗРВ, наложенные на полигон (рис. 2.1) и кривую накопленных опытных вероятностей (рис. 2.2).

7. Анализ данных табл. 2.1 и графиков (рис. 2.1 и 2.2) позволяет сделать рекомендации, имеющие практическое значение:

- Опытная информация отклоняется от теоретических функций и нуждается в выравнивании при помощи теоретического закона распределения.
- В интервале значений коэффициента вариации от 0,3 до 0,5 функции закона нормального распределения и закона распределения Вейбулла незначительно отличаются одна от другой, поэтому визуально трудно выбрать закон распределения для выравнивания опытной информации. В таких случаях рекомендуется выбирать теоретический закон распределения по критерию согласия.
- Интегральную кривую закона нормального распределения при достаточной повторности информации N можно построить по десяти точкам.

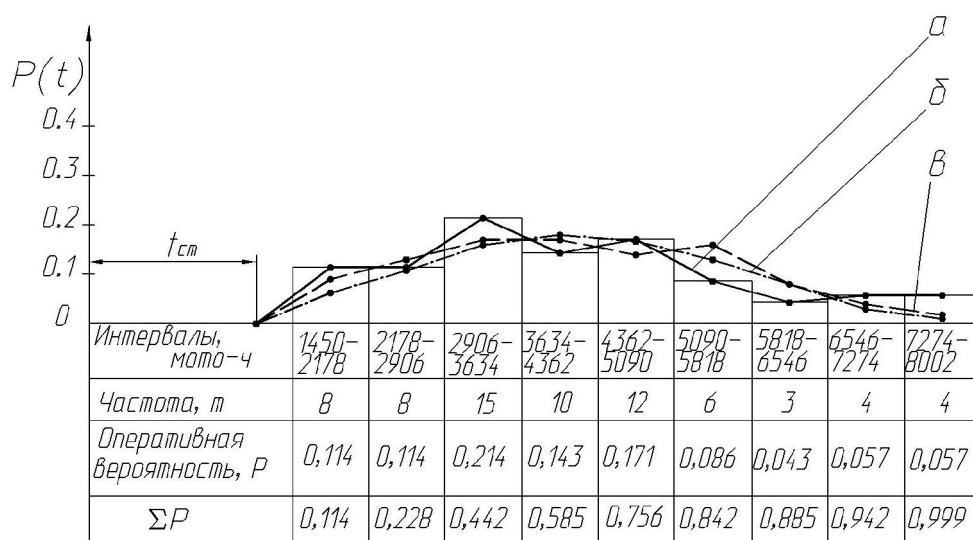


Рис. 2.1. Диаграмма дифференциальных $f(t)$ кривых функций ЗНР и ЗРВ, наложенных на полигон распределения: a – полигон распределения; b – дифференциальная кривая закона нормального распределения; v – дифференциальная кривая закона распределения Вейбулла

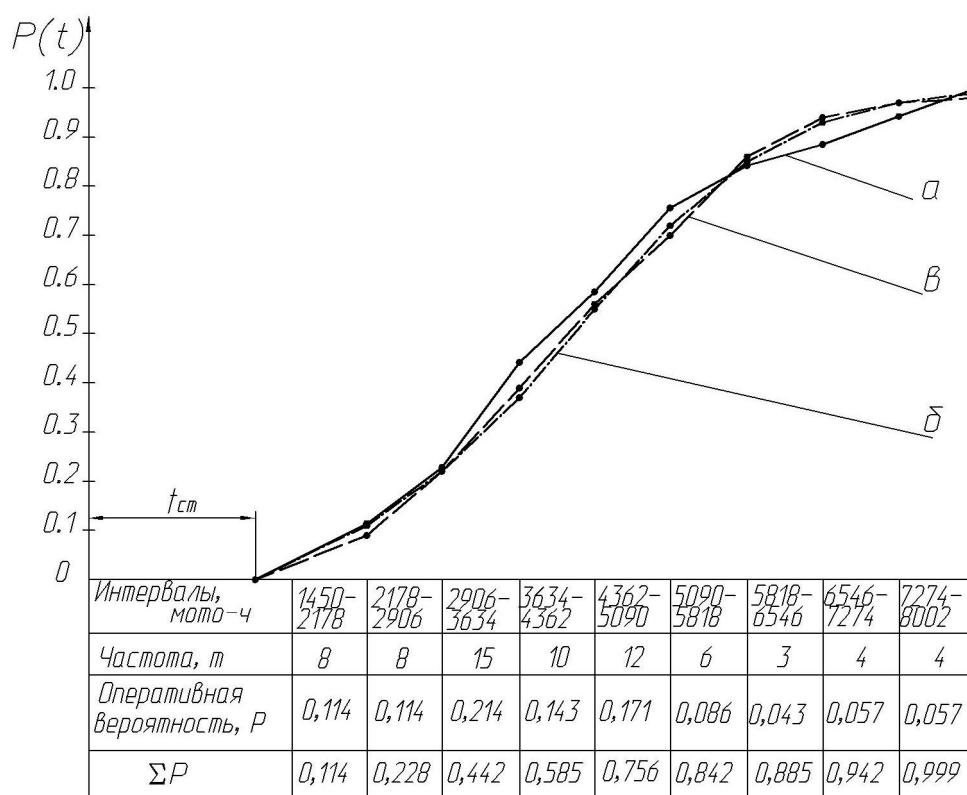


Рис. 2.2. Диаграмма интегральных $F(t)$ кривых функций ЗНР и ЗРВ, наложенных на кривую накопленных опытных вероятностей: a – кривая накопленных опытных вероятностей; b – интегральная кривая закона нормального распределения; v – интегральная кривая закона распределения Вейбулла

Практическая работа №3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Общие сведения

Опытная вероятность появления случайного события A определяется по формуле

$$P(A) = \frac{m}{N}, \quad (3.1)$$

где $P(A)$ – опытная вероятность появления случайного события A ;

m – опытное число благоприятных случаев появления случайного события A ;

N – общее количество опытов или повторностей информации или число наблюдаемых машин.

Закон сложения вероятностей независимых событий

В том случае, если интересующее событие A объединяет группу или сумму событий A_1, A_2, A_3 и т.д., то вероятность появления этого события A или вероятность суммы событий $A_1 + A_2 + A_3$ и т.д. равно сумме вероятностей этих событий

$$P(A_1 + A_2 + A_3) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3). \quad (3.2)$$

Закон умножения вероятностей независимых событий

Вероятность совместного проявления двух и более независимых событий A, B и т.д. в полной группе событий равно произведению вероятностей этих событий

$$P(A, B) = P(A) \cdot P(B). \quad (3.3)$$

Закон умножения вероятностей зависимых событий

Вероятность совместного появления двух и более зависимых событий A, B и т.д. в полной группе событий равна произведению вероятности появления первого события на условную вероятность второго события:

$$P(A, B) = P(A) \cdot P(B|A). \quad (3.4)$$

Задание 1

Были проведены испытания N тракторов. При этом установлено, что у m_1 тракторов эксплуатационные отказы появились в интервале наработок $A_1 = 100 \dots 200$ моточасов, у m_2 – в интервале $A_2 = 200 \dots 300$ моточасов, у m_3 – в интервале $A_3 = 300 \dots 400$ моточасов, у m_4 – в интервале $A_4 = 400 \dots 500$ моточасов и, наконец, у m_5 – в интервале $A_5 = 500 \dots 600$ моточасов.

Требуется определить, чему равна опытная вероятность появления эксплуатационного отказа в каждом интервале наработки трактора. Вариант задания – табл. 3.1.

Таблица 3.1

Исходные данные

| Вариант | N | m_1 | m_2 | m_3 | m_4 | m_5 |
|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 21 | 2 | 3 | 5 | 10 | 1 |
| 2 | 25 | 3 | 4 | 7 | 8 | 3 |
| 3 | 30 | 4 | 5 | 9 | 8 | 4 |
| 4 | 35 | 5 | 6 | 10 | 9 | 5 |
| 5 | 40 | 6 | 5 | 11 | 12 | 6 |
| 6 | 19 | 4 | 4 | 6 | 5 | 0 |
| 7 | 22 | 3 | 4 | 4 | 4 | 7 |
| 8 | 23 | 4 | 3 | 5 | 6 | 5 |
| 9 | 32 | 2 | 5 | 9 | 13 | 3 |
| 10 | 37 | 1 | 8 | 10 | 14 | 4 |
| 11 | 36 | 3 | 5 | 7 | 16 | 5 |
| 12 | 27 | 5 | 6 | 9 | 6 | 1 |
| 13 | 28 | 4 | 7 | 8 | 7 | 2 |
| 14 | 26 | 3 | 6 | 7 | 8 | 3 |

Пример выполнения задания 1

Исходные данные:

$N = 20$ шт; $m_1 = 3$ шт; $m_2 = 5$ шт; $m_3 = 7$ шт; $m_4 = 3$ шт; $m_5 = 2$ шт.

Решение

Пользуясь формулой (3.1) определим вероятность появления эксплуатационного отказа в каждом интервале наработок тракторов:

$$P(A_1) = \frac{3}{20} = 0,15 \text{ или } 15\%; \quad P(A_2) = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ или } 25\%;$$

$$P(A_3) = \frac{7}{20} = 0,35 \text{ или } 35\%; \quad P(A_4) = \frac{3}{20} = 0,15 \text{ или } 15\%;$$

$$P(A_5) = \frac{2}{20} = 0,1 \text{ или } 10\%.$$

Задание 2

Требуется определить, какой процент тракторов в условиях предыдущего задания (табл. 3.1) будет иметь отказы в интервале их средней наработки от 200 до 500 моточасов.

Пример выполнения задания 2

Исходные данные:

$$N = 20 \text{ шт; } m_2 = 5 \text{ шт; } m_3 = 7 \text{ шт; } m_4 = 3 \text{ шт.}$$

Решение

Событие A – количество отказов тракторов в интервале наработок от 200 до 500 моточасов определяет три события:

A_2 – количество отказов в интервале от 200 до 300 моточасов;

A_3 – количество отказов в интервале от 300 до 400 моточасов;

A_4 – количество отказов в интервале от 400 до 500 моточасов.

Следовательно, ожидаемое количество отказов в интервале параметров от 200 до 500 моточасов определим по закону сложения вероятностей независимых событий (3.2)

$$P(A) = P(A_2) + P(A_3) + P(A_4) = \frac{5}{20} + \frac{7}{20} + \frac{3}{20} = 0,75.$$

Т.е. 75% тракторов будут иметь отказы в интервале их наработки от 200 до 500 моточасов.

Задание 3

В двух колхозах работают по N тракторов одной марки, эксплуатационные отказы которых распределены по закону, приведенному в задании 1. Необходимо определить вероятности совместного проявления отказа у трактора A из первого колхоза и у трактора B из второго колхоза в интервале их наработок $A_3 = 300..400$ моточасов.

Пример выполнения задания 3

Исходные данные:

$$N = 20 \text{ шт; } m_3 = 7 \text{ шт.}$$

Решение

Эти два события не связаны между собой, т.к. вероятность появления одного из них не зависит от того, произошло или не произошло второе событие. Поэтому применяется уравнение (3.3)

$$P(A(A_3); B(A_3)) = P(A(A_3)) \cdot P(B(A_3)) = \frac{7}{20} \cdot \frac{7}{20} = 0,1225$$

Задание 4

По данным табл. 3.1 определить вероятность совместного появления отказов у тракторов A и B , работающих в одном колхозе, при их средней наработке $A_3 = 300 \dots 400$ моточасов.

Пример выполнения задания 4

Исходные данные:

$$N = 20 \text{ шт}; m_3 = 7 \text{ шт.}$$

Решение

Эти два события связаны между собой, т.к. вероятность появления одного из них зависит от того, произошло или нет второе событие (появление отказа у трактора B). Поэтому вероятность появления одного из них зависит от того, произошло или нет второе событие (появление отказа у трактора B). Поэтому вероятность совместного появления отказов у тракторов A и B определяется по закону умножения вероятностей зависимых событий (3.4)

$$P(A(A_3); B(A_3)) = P(A) \cdot P(B|A) = \frac{7}{20} \cdot \frac{6}{19} = 0,112.$$

Задание 5

Из условий по табл. 3.1 определить полную группу событий всех возможных вариантов совместного появления отказов у тракторов A и B , работающих в разных колхозах и при их разных наработках.

Пример выполнения задания 5

Исходные данные:

$$N = 20 \text{ шт}; m_1 = 3 \text{ шт}; m_2 = 5 \text{ шт}; m_3 = 7 \text{ шт}; m_4 = 3 \text{ шт}; m_5 = 2 \text{ шт.}$$

Решение

1. Определим количество событий в полной группе: трактор A отказал в интервале наработок $A_1 = 100 \dots 200$ моточасов, а трактор B соответственно $A_1 = 100 \dots 200$, $A_2 = 200 \dots 300$, $A_3 = 300 \dots 400$, $A_4 = 400 \dots 500$ и $A_5 = 500 \dots 600$ моточасов, всего 5 событий. Аналогично по 5 событий произойдёт при отказе трактора A в интервале $A_2 = 200 \dots 300$, $A_3 = 300 \dots 400$, $A_4 = 400 \dots 500$ и $A_5 = 500 \dots 600$ моточасов. Таким образом, полная группа событий состоит из 25 отдельных событий;

2. Определим вероятность всех событий в полной группе (события несвязанные):

$$\sum_1^{25} P(A, B) = \frac{3}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{5}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{7}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{2}{20} + \frac{5}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{5}{20} \times \\ \times \frac{5}{20} + \frac{5}{20} \cdot \frac{7}{20} + \frac{5}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{5}{20} \cdot \frac{2}{20} + \frac{7}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{7}{20} \cdot \frac{5}{20} + \frac{7}{20} \cdot \frac{7}{20} + \frac{7}{20} \cdot \frac{3}{20} + \\ + \frac{7}{20} \cdot \frac{2}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{5}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{7}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{3}{20} \cdot \frac{2}{20} + \frac{2}{20} \cdot \frac{3}{20} + \\ + \frac{2}{20} \cdot \frac{5}{20} + \frac{2}{20} \cdot \frac{7}{20} + \frac{2}{20} \cdot \frac{3}{20} + \frac{2}{20} \cdot \frac{2}{20} = 1.$$

Задание 6

Для условий задания 1 (табл. 3.1) (N тракторов работают в одном хозяйстве) определить полную группу событий всех возможных вариантов совместного появления отказов у тракторов A и B при всех возможных вариантах их наработок.

Пример выполнения задания 6

Исходные данные:

$N = 20$ шт; $m_1 = 3$ шт; $m_2 = 5$ шт; $m_3 = 7$ шт; $m_4 = 3$ шт; $m_5 = 2$ шт.

Решение

1. Определим количество событий в полной группе рассуждая так же, как в предыдущем задании, определяем, что число событий полной группы равно 25.

2. Определим вероятность всех событий в полной группе (события связанные):

$$\sum_1^{25} P(A, B) = \frac{3}{20} \cdot \frac{2}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{5}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{7}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{2}{19} + \frac{5}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{5}{20} \times \\ \times \frac{4}{19} + \frac{5}{20} \cdot \frac{7}{19} + \frac{5}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{5}{20} \cdot \frac{2}{19} + \frac{7}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{7}{20} \cdot \frac{5}{19} + \frac{7}{20} \cdot \frac{6}{19} + \frac{7}{20} \cdot \frac{3}{19} + \\ + \frac{7}{20} \cdot \frac{2}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{5}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{7}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{2}{19} + \frac{3}{20} \cdot \frac{2}{19} + \\ + \frac{2}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{2}{20} \cdot \frac{5}{19} + \frac{2}{20} \cdot \frac{7}{19} + \frac{2}{20} \cdot \frac{3}{19} + \frac{2}{20} \cdot \frac{1}{19} = 1.$$

Задание 7

На складе готовой продукции ремонтного предприятия имеется

N двигателей, из которых m_1 отремонтированных и m_2 новых (из обменного фонда) (табл. 3.2). Заказчик получает со склада 2 двигателя. В этом случае полную группу событий образуют следующие четыре события:

1. оба двигателя новые;
2. оба двигателя отремонтированные;
3. первый двигатель отремонтированный, второй - новый;
4. первый двигатель новый, второй - отремонтированный.

Требуется определить:

- а) Вероятность того, что оба двигателя окажутся новыми.
- б) Вероятность того, что хотя бы один двигатель из двух окажется новым.

События связанные.

Таблица 3.2

Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| N | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 31 | 29 | 27 | 25 | 23 | 21 | 20 | 19 |
| m_1 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24 | 28 | 27 | 24 | 21 | 20 | 20 | 18 | 16 | 16 |
| m_2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 4 | 4 | 5 | 6 | 5 | 3 | 3 | 4 | 3 |

Пример выполнения задания 7

Исходные данные

$$N = 25; m_1 = 20; m_2 = 5$$

Решение

Для решения воспользуемся уравнением связанных событий

$$P(D_n, D_n) = P(D_n) \cdot P(D_n | D_n) = \frac{5}{25} \cdot \frac{4}{24} = 0,0333.$$

Условиям задачи соответствует 1, 3 и 4-ое события. Вероятность появления каждого события определяется по закону умножения независимых событий, а вероятность получения хотя бы одного нового двигателя по закону сложения вероятностей трёх этих событий

$$\begin{aligned}
 P(D_n \text{ из } 2 D) &= P(D_n, D_n) + P(D_p, D_n) + P(D_n, D_p) = P(D_n) \cdot P(D_n | D_n) + \\
 &+ P(D_p) \cdot P(D_n | D_p) + P(D_n) \cdot P(D_p | D_n) = \frac{5}{25} \cdot \frac{4}{24} + \frac{20}{25} \cdot \frac{5}{24} + \frac{5}{25} \cdot \frac{20}{24} = \\
 &= \frac{220}{600} = 0,367.
 \end{aligned}$$

Решение этого задания может быть упрощено применением противоположных событий. В данном случае противоположным событием является получение двух отремонтированных двигателей. Вероятность такого события определяется по уравнению

$$P(D_p, D_p) = P(D_p) \cdot P(D_p | D_p) = \frac{20}{25} \cdot \frac{19}{24} = \frac{380}{600} \approx 0,63.$$

Вероятность получения хотя бы одного нового двигателя из двух определяется по уравнению

$$P(D_{из2D}) = 1 - P(D_p, D_p) = 1 - 0,63 = 0,37.$$

Правильность решения этого примера может быть проверена по сумме вероятностей полной группы событий, которая должна быть равна единице.

$$P = \frac{220}{600} + \frac{380}{600} = \frac{380}{380} = 1.$$

Практическая работа №4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЁЖНОСТИ ПО СТАТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ОБ ОТКАЗАХ ИЗДЕЛИЙ

Общие сведения

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Вероятность безотказной работы может применяться как количественный показатель надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ представляет собой безусловную вероятность того, что в интервале от 0 до t не наступит отказ, т. е. вероятность того, что отказ наступит в интервале от t до ∞ .

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (4.1)$$

где $\hat{P}(t)$ – статистическая оценка вероятности безотказной работы;

N_0 – число объектов в начале испытания;

$n(t)$ – число отказавших объектов за время t .

Вероятность отказа – это вероятность того, что при определен-

ных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки возникнет хотя бы один отказ.

$$Q(t) = 1 - P(t).$$

Для статистического определения

$$\hat{Q}(t) = 1 - \hat{P}(t) = 1 - \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (4.2)$$

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

Интенсивность отказов определяется по приближенной статистической формуле как отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, работоспособных в данный момент времени

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_{cp}(t)}, \quad (4.3)$$

где $n(\Delta t)$ – число объектов отказавших за время Δt ;

N_{cp} – среднее число изделий, работоспособных в данный момент времени.

Задание 1

На испытания представлена опытная партия зерноуборочных комбайнов N_0 . За время t нормативной работы отказало n комбайнов. Определить вероятность безотказной работы и вероятность отказа комбайнов в течение времени t (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| N_0 | 1550 | 1600 | 1650 | 1700 | 1750 | 1800 | 1850 |
| t | 260 | 270 | 300 | 320 | 340 | 350 | 370 |
| n | 105 | 110 | 116 | 125 | 120 | 115 | 125 |
| № | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| N_0 | 1900 | 1950 | 2000 | 2500 | 2550 | 2600 | 2650 |
| t | 380 | 400 | 410 | 430 | 440 | 470 | 500 |
| n | 130 | 150 | 135 | 145 | 155 | 130 | 100 |

Пример выполнения задания 1

Исходные данные:

$N_0 = 2000$ шт; $t = 250$ часов; $n = 150$ шт.

Решение

По формулам (4.1) и (4.2) определим вероятность безотказной работы и вероятность отказа комбайнов в течение времени $t = 250$ часов.

$$P(250) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{2000 - 150}{2000} = 0,925;$$

$$Q(250) = \frac{n(t)}{N_0} = \frac{150}{2000} = 0,075$$

или $\bar{Q}(250) = 1 - P(250) = 1 - 0,925 = 0,075$.

Задание 2

На испытание было представлено N_0 однотипных комбайнов. За первые 110 часов отказало n_1 комбайнов, а за последующий интервал времени Δt отказало ещё n_2 комбайнов. Определить интенсивность отказов комбайнов в промежутке времени Δt (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| N_0 | 1550 | 1600 | 1650 | 1700 | 1750 | 1800 | 1850 |
| Δt | 260 | 270 | 300 | 320 | 340 | 350 | 370 |
| n_1 | 50 | 60 | 55 | 70 | 80 | 40 | 25 |
| n_2 | 40 | 30 | 25 | 35 | 45 | 55 | 30 |
| № | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| N_0 | 1900 | 1950 | 2000 | 2500 | 2550 | 2600 | 2650 |
| Δt | 380 | 400 | 410 | 430 | 440 | 470 | 500 |
| n_1 | 30 | 20 | 25 | 50 | 80 | 30 | 50 |
| n_2 | 30 | 50 | 60 | 75 | 55 | 90 | 100 |

Пример выполнения задания 2

Исходные данные

$N_0 = 1500$ шт; $n_1 = 75$ шт; $\Delta t = 190$ часов; $n_2 = 65$ шт.

Решение

Интенсивность отказов определяется по формуле (4.3)

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_{cp}(t)}, \quad n(\Delta t) = n_2 = 65 \text{ шт};$$

$$N_{cp}(t) = \frac{(N_0 - n_1) + (N_0 - n_1 - n_2)}{2} = \frac{(1500 - 75) + (1500 - 75 - 65)}{2} =$$

$$= 1405 \text{ шт.}$$

$$\lambda(300) = \frac{65}{190 \cdot 1405} = 0.00024 \text{ 1/час.}$$

Задание 3

На испытание представлено N_0 жаток. За время t отказало n_1 изделий, за интервал времени Δt отказало n_2 жаток. Требуется определить вероятность безотказной работы за время t и $t + \Delta t$, а также интенсивность отказов в интервале времени $t + \Delta t$ (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N_0 | 520 | 540 | 550 | 560 | 570 | 580 | 590 |
| t | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 |
| Δt | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| n_1 | 165 | 170 | 175 | 180 | 185 | 190 | 195 |
| n_2 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| № | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| N_0 | 600 | 610 | 630 | 650 | 670 | 690 | 700 |
| t | 280 | 290 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 |
| Δt | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 | 210 | 220 |
| n_1 | 200 | 205 | 210 | 215 | 220 | 225 | 230 |
| n_2 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 |

Пример выполнения задания 3

Исходные данные:

$N_0 = 500$ шт; $t = 200$ часов; $n_1 = 160$ шт; $\Delta t = 80$ часов; $n_2 = 40$ шт.

Решение

Находим вероятность безотказной работы по формуле (4.1):

Для $t = 200$ часов:

$$P(200) = \frac{N_0 - n_1}{N_0} = \frac{500 - 160}{500} = 0,68.$$

Для $t + \Delta t = 200 + 80 = 280$ часов:

$$P(280) = \frac{N_0 - (n_1 + n_2)}{N_0} = \frac{500 - 200}{500} = 0,6.$$

Определим среднее число работоспособных изделий в интервале $t + \Delta t$:

$$N_{cp} = \frac{N_0 + (N_0 - n_1 - n_2)}{2} = \frac{500 + (500 - 160 - 40)}{2} = 400.$$

Определим интенсивность отказа по формуле 4.3:

$$\lambda(280) = \frac{n(t + \Delta t)}{(t + \Delta t) \cdot N_{cp}} = \frac{200}{280 \cdot 400} = 0,0018 \text{ 1/час.}$$

Практическая работа №5 **СТЕНДОВЫЕ И ПОЛИГОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ.** **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСКОРЕНИЙ**

Основные сведения

Стендовые и полигонные испытания проводят для получения информации о надежности объектов в более короткие сроки, чем в условиях эксплуатации. Такие испытания называются ускоренными.

Ускоренные испытания можно подразделить на два вида:

уплотненные (по времени);

ужесточенные (по факторам нагружения).

При уплотненных по времени испытаниях ускоренное получение информации достигается без интенсификации (в сравнении с эксплуатацией) физико-химического процесса разрушения (без увеличения нагружения). Уплотнение временем достигается круглосуточными испытаниями. Это позволяет увеличить наработку в сравнении с нормальной эксплуатацией.

Большое достоинство уплотненных испытаний – достижение эффекта ускорения без искажения физической картины потери объектом работоспособности.

При оценке уплотненных по времени испытаний следует отличать граничные испытания от учащенных в части определения по их результатам действительной надежности объекта в эксплуатации.

Если при учащенных испытаниях известно, что частота приложения нагрузки увеличена в K_{Π} раз или объект реализовал наработку в K_{Π} раз большую за календарное время, чем в эксплуатации, то средний ресурс, полученный при ускоренных испытаниях T_y , пересчитывается на ожидаемый средний ресурс в эксплуатации T_9 :

$$T_9 = K_{\Pi} T_y, \quad (5.1)$$

где K_{Π} – коэффициент перехода (ускорения).

При граничных испытаниях получают минимальный ресурс, возможный с определенной вероятностью в эксплуатации при неблагоприятном сочетании условий. Задача состоит в том, чтобы по этим результатам рассчитать средний гамма-процентный ресурс объектов в эксплуатации.

Коэффициент ускорения испытания при граничных испытаниях:

$$K_{\Pi} = \alpha \sqrt{\frac{\nu_{\gamma}}{\nu_{50}}}, \quad (5.2)$$

где α – неслучайный и постоянный для определенного объекта показатель степени;

ν_{γ} – параметр, характеризующий работоспособность объекта, при определенном гамма-процентном ресурсе;

ν_{50} – параметр, характеризующий работоспособность объекта, при 50-процентном ресурсе.

Ужесточенными по нагружению испытаниями называют такие испытания, при которых ускоренное получение информации достигается с интенсификацией физико-химического процесса разрушения.

Чтобы обеспечить эффективность ужесточенных испытаний, необходимо соблюдать их подобие с эксплуатационными испытаниями.

С физической точки зрения подобие состоит в том, чтобы физическая картина отказа при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях была одинаковой по характеру и виду разрушения.

Математическое подобие состоит в том, чтобы вероятности безотказной работы объекта при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях были одинаковы: $P(t_y) = P(t_3)$.

Если коэффициент перехода K_{Π} для любого t будет постоянным, то условие равенства вероятностей приведет к равенству коэффициентов вариации времени безотказной работы при ускоренных испытаниях и в эксплуатации: $\nu_y = \nu_3$.

Коэффициенты вариации при соответствующем испытании определяются выражениями:

$$\nu_y = \frac{\sigma_y}{T_y}, \quad \nu_3 = \frac{\sigma_3}{T_3}, \quad (5.3)$$

где σ_y , σ_3 – среднеквадратичные отклонения ресурсов при ускоренных и эксплуатационных испытаниях соответственно.

При расчете должно удовлетворяться условие неравенства

$$\frac{|v_{\text{э}} - v_{\text{у}}|}{\sqrt{\frac{v_{\text{э}}^2}{2n_{\text{э}}} + \frac{v_{\text{у}}^2}{2n_{\text{у}}}}} < 3, \quad (5.4)$$

где $n_{\text{э}}$, $n_{\text{у}}$ – количество объектов, подвергающихся эксплуатационным и ускоренным испытаниям соответственно.

Если это неравенство удовлетворено, то условие подобия эксплуатационных и ускоренных испытаний выполняется.

Задание 1

Определить коэффициент перехода по результатам испытаний ножей свеклокомбайна в условиях стенда (ужесточенные испытания) и эксплуатации и проверить условия подобия.

Количество ножей при ускоренных испытаниях $n_{\text{у}}$, при эксплуатации $n_{\text{э}}$. Время испытаний $T_{\text{у}}$, время эксплуатации $T_{\text{э}}$. Среднеквадратичные отклонения ресурсов при ускоренных испытаниях $\sigma_{\text{у}}$ и эксплуатации $\sigma_{\text{э}}$ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $n_{\text{у}}$, шт | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 |
| $n_{\text{э}}$, шт | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 17 |
| $T_{\text{у}}$, ч | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | 41 |
| $T_{\text{э}}$, ч | 250 | 255 | 260 | 265 | 270 | 275 | 280 |
| $\sigma_{\text{у}}$, ч | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 15 |
| $\sigma_{\text{э}}$, ч | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 |
| № | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| $n_{\text{у}}$, шт | 47 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
| $n_{\text{э}}$, шт | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| $T_{\text{у}}$, ч | 43 | 44 | 40 | 39 | 37 | 35 | 31 |
| $T_{\text{э}}$, ч | 285 | 290 | 295 | 300 | 305 | 310 | 315 |
| $\sigma_{\text{у}}$, ч | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| $\sigma_{\text{э}}$, ч | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 |

Пример выполнения задания 1

Исходные данные:

$$n_y = 48 \text{ шт}; n_3 = 16 \text{ шт}; T_y = 42 \text{ ч}; T_3 = 276 \text{ ч}; \sigma_y = 14 \text{ ч}; \sigma_3 = 108 \text{ ч}.$$

Решение

По формулам (5.3) определим коэффициенты вариации при ускоренных испытаниях и эксплуатации

$$\nu_y = \frac{\sigma_y}{T_y} = \frac{14}{42} = 0,33,$$

$$\nu_3 = \frac{\sigma_3}{T_3} = \frac{108}{276} = 0,39.$$

Коэффициент перехода (ускорения) определим из формулы (5.1)

$$K_{\Pi} = \frac{T_3}{T_y} = \frac{276}{42} = 6,57/$$

Проверяем условие подобия (5.4)

$$\frac{|\nu_3 - \nu_y|}{\sqrt{\frac{\nu_3^2}{2n_3} + \frac{\nu_y^2}{2n_y}}} = \frac{0,39 - 0,33}{\sqrt{\frac{0,39^2}{2 \cdot 16} + \frac{0,33^2}{2 \cdot 48}}} = 0,782 < 3$$

Условие подобия выполняется.

Задание 2

Число циклов N резьбового соединения до 50%-ого падения усилия начальной затяжки Q_3 (предельное состояние) связано с параметрами соединения и характеристиками нагрузки зависимостью:

$$N = \left(\frac{F \cdot Q_3 \cdot \sigma_{\text{пр}}}{K \cdot \chi_p \cdot P_a^2} \right)^m \cdot N_0,$$

где F – площадь поперечного сечения болта;

$\sigma_{\text{пр}}$ – предел стабильности затяжки;

χ_p – расчетный коэффициент основной нагрузки;

K – эмпирический коэффициент;

P_a – амплитуда циклической нагрузки, действующей на один болт соединения;

m – показатель степени;

N_0 – базовое число циклов.

Испытывается соединение с болтами М10, имеющее параметры:
 $F = 0,55 \text{ см}^2$; $K = 2,8$; $\chi_p = 0,3$; $m = 8$; $\sigma_{пр} = 15 \text{ кг/см}^2$;

$N_0 = 2 \cdot 10^5$ циклов.

Из результатов обследования в условиях эксплуатации известно, что величины P_a и Q_3 имеют логарифмически нормальное распределение. При этом $\ln P_a$ и $\ln Q_3$ распределены нормально. Их средние значения и среднеквадратические отклонения соответственно равны $\bar{P}_a = 100 \text{ Н}$; $\bar{Q}_3 = 770 \text{ Н}$; $\sigma_{P_a} = 30 \text{ Н}$; $\sigma_{Q_3} = 154 \text{ Н}$ (табл. 5.2).

Необходимо определить коэффициент ускорения при оценке 80%-ого ресурса.

Таблица 5.1

Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| \bar{P}_a , кг | 80 | 85 | 90 | 95 | 105 | 110 | 115 |
| \bar{Q}_3 , кг | 700 | 710 | 720 | 730 | 740 | 750 | 760 |
| σ_{P_a} , кг | 15 | 20 | 25 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| σ_{Q_3} , кг | 120 | 125 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 |
| № | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| \bar{P}_a , кг | 120 | 125 | 130 | 135 | 140 | 145 | 150 |
| \bar{Q}_3 , кг | 780 | 790 | 800 | 810 | 820 | 830 | 840 |
| σ_{P_a} , кг | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 |
| σ_{Q_3} , кг | 155 | 160 | 165 | 170 | 175 | 180 | 185 |

Решение

Введём меру повреждения за один цикл нагружения:

$$D_1 = 1/N.$$

По достижении предельного состояния, т.е. за N циклов, мера повреждения равна единице:

$$D_N = D_1 \cdot N = \frac{1}{N} \cdot N = 1.$$

Определим величину \tilde{D} , равную:

$$\tilde{D} = \ln D_1 = m \cdot \ln \frac{K \cdot \chi_p}{F \cdot \sigma_{пр} \cdot N_0^{1/m}} + 2 \cdot m \cdot \ln P_a - m \cdot \ln Q_3.$$

Так как $\ln P_a$ и $\ln Q_3$ распределены нормально, то можно считать, что нормально распределена и величина $\ln D_1$.

Параметры нормального распределения a_p и b_p^2 (среднее и дисперсия) величины $\ln P_a$ можно определить, используя зависимости:

$$\bar{P}_a = e^{a_p + \frac{b_p^2}{2}};$$

$$\sigma_{P_a} = \bar{P}_a \cdot \sqrt{e^{b_p^2} - 1}.$$

Откуда получим

$$b_p^2 = \ln \left(\left(\frac{\sigma_{P_a}}{\bar{P}_a} \right)^2 + 1 \right) = \ln \left(\left(\frac{30}{100} \right)^2 + 1 \right) = 0,086,$$

$$a_p = \ln \left(\bar{P}_a - e^{-\frac{b_p^2}{2}} \right) = \ln \left(100 - e^{-\frac{0,086}{2}} \right) = 4,562.$$

Аналогично определяются a_Q и b_Q^2 для величины $\ln Q_3$.

$$b_Q^2 = \ln \left(\left(\frac{\sigma_{Q_3}}{\bar{Q}_3} \right)^2 + 1 \right) = \ln \left(\left(\frac{154}{770} \right)^2 + 1 \right) = 0,039,$$

$$a_Q = \ln \left(\bar{Q}_3 - e^{-\frac{b_Q^2}{2}} \right) = \ln \left(770 - e^{-\frac{0,039}{2}} \right) = 6,645.$$

Моменты (средние и дисперсия) распределения величины $\ln D_1$, определяются по формулам:

$$M[\ln D_1] = m \cdot \ln \frac{K \cdot \chi_p}{F \cdot \sigma_{np} \cdot N_0^m} + 2 \cdot m \cdot a_p - m \cdot a_Q;$$

$$D[\ln D_1] = 4 \cdot m^2 \cdot b_p^2 + m^2 \cdot b_Q^2.$$

Расчёт по этим формулам даёт:

$$M[\ln D_1] = 8 \cdot \ln \frac{2,8 \cdot 0,3}{0,55 \cdot 15 \cdot (2 \cdot 10^5)^{0,125}} + 2 \cdot 8 \cdot 4,562 - 8 \cdot 6,645 = -10,65.$$

$$D[\ln D_1] = 4 \cdot 8^2 \cdot 0,086 + 8^2 \cdot 0,039 = 24,51.$$

Соответствующее значение среднего числа циклов рассчитывается с помощью формулы

$$N_{0,5} = e^{-M[\ln D_1]}.$$

$$N_{0,5} = e^{10,65} = 42000.$$

Среднеквадратическое отклонение

$$\ln D_1 = \sqrt{D[\ln D_1]} = 4,95.$$

Величину $\ln D_1$, соответствующую $\gamma = 0,8$, определим по формуле:

$$\tilde{D}_{0,8} = M[\ln D_1] + I_\gamma \cdot \sigma_{\ln D_1},$$

где I_γ – квантиль нормального распределения (при $\gamma = 0,8$

$$I_{0,8} = 0,84);$$

$\sigma_{\ln D_1}$ – среднеквадратическое отклонение.

Получаем

$$\tilde{D}_{0,8} = -10,503 + 0,84 \cdot 4,95 = -6,34.$$

Соответственно $N_{0,8} = e^{-\tilde{D}_{0,8}} = 567$ циклов.

Коэффициент ускорения при испытаниях равен:

$$K_{II} = \frac{N_{0,5}}{N_{0,8}} = \frac{42000}{567} = 74.$$

Литература

1. Ермолов, Л.С. Повышение надежности сельскохозяйственной техники (Основы теории и практики)/ Л.С. Ермолов.– М.: Колос, 1979.
2. Проников, А.С. Надежность машин/ А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978.
3. Кряжков, В.М., Ермолов Л.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники/ В.М. Кряжков, Л.С. Ермолов. – М.: Колос, 1982.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Коэффициенты Ирвина λ_T

| Повторность информации N | λ при $a = 0,95$ | λ при $a = 0,99$ |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2 | 2,8 | 3,7 |
| 3 | 2,2 | 2,9 |
| 10 | 1,5 | 2,0 |
| 20 | 1,3 | 1,8 |
| 30 | 1,2 | 1,7 |
| 50 | 1,1 | 1,6 |
| 100 | 1,0 | 1,5 |
| 400 | 0,9 | 1,3 |

Таблица П.2

Параметры и коэффициенты закона распределения Вейбулла (ЗРВ)

| b | K_b | C_b | V | S_b | P_{on} |
|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0,800 | 1,133 | 1,428 | 1,261 | 2,815 | 0,669 |
| 0,900 | 1,052 | 1,171 | 1,113 | 2,345 | 0,649 |
| 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 2,000 | 0,632 |
| 1,100 | 0,959 | 0,858 | 0,894 | 1,688 | 0,615 |
| 1,200 | 0,941 | 0,787 | 0,837 | 1,521 | 0,605 |
| 1,300 | 0,921 | 0,704 | 0,765 | 1,314 | 0,592 |
| 1,400 | 0,911 | 0,660 | 0,724 | 1,198 | 0,584 |
| 1,500 | 0,903 | 0,613 | 0,679 | 1,072 | 0,576 |
| 1,600 | 0,897 | 0,574 | 0,640 | 0,962 | 0,568 |
| 1,700 | 0,892 | 0,540 | 0,605 | 0,865 | 0,561 |
| 1,800 | 0,889 | 0,511 | 0,575 | 0,779 | 0,555 |
| 1,900 | 0,887 | 0,486 | 0,547 | 0,701 | 0,549 |
| 2,000 | 0,886 | 0,463 | 0,523 | 0,631 | 0,544 |
| 2,100 | 0,886 | 0,443 | 0,500 | 0,567 | 0,539 |
| 2,200 | 0,886 | 0,425 | 0,480 | 0,509 | 0,535 |
| 2,300 | 0,886 | 0,408 | 0,461 | 0,455 | 0,531 |
| 2,400 | 0,886 | 0,393 | 0,444 | 0,405 | 0,527 |
| 2,500 | 0,887 | 0,380 | 0,428 | 0,359 | 0,524 |
| 2,600 | 0,888 | 0,367 | 0,413 | 0,315 | 0,520 |
| 2,700 | 0,889 | 0,355 | 0,399 | 0,275 | 0,517 |
| 2,800 | 0,890 | 0,344 | 0,387 | 0,237 | 0,514 |
| 2,900 | 0,892 | 0,334 | 0,375 | 0,202 | 0,512 |
| 3,000 | 0,893 | 0,325 | 0,363 | 0,168 | 0,509 |
| 3,100 | 0,894 | 0,316 | 0,353 | 0,136 | 0,507 |
| 3,200 | 0,896 | 0,307 | 0,343 | 0,106 | 0,505 |
| 3,300 | 0,897 | 0,299 | 0,334 | 0,078 | 0,503 |
| 3,400 | 0,898 | 0,292 | 0,325 | 0,051 | 0,501 |
| 3,500 | 0,900 | 0,285 | 0,316 | 0,025 | 0,499 |

Окончание табл. П.2

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 3,600 | 0,901 | 0,278 | 0,308 | 0,001 | 0,497 |
| 3,700 | 0,902 | 0,272 | 0,301 | -0,023 | 0,495 |
| 3,800 | 0,904 | 0,266 | 0,294 | -0,045 | 0,494 |
| 3,900 | 0,905 | 0,260 | 0,287 | -0,067 | 0,493 |
| 4,000 | 0,906 | 0,254 | 0,280 | -0,087 | 0,491 |

Таблица П.3

**Дифференциальная функция (функция плотности вероятности)
закона нормального распределения (ЗНР)**

| $f_0\left(\frac{t_{ic} - \bar{t}}{\sigma}\right)$ | Сотые доли | | | | | | | | | |
|---|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,0 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| 0,1 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 |
| 0,2 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,38 | 0,38 |
| 0,3 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| 0,4 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,35 |
| 0,5 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,34 | 0,34 |
| 0,6 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,31 |
| 0,7 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,29 | 0,29 |
| 0,8 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| 0,9 | 0,27 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,24 |
| 1,0 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,22 |
| 1,1 | 0,22 | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 1,2 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 |
| 1,3 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 0,15 |
| 1,4 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,13 | 0,13 |
| 1,5 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,11 |
| 1,6 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| 1,7 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |
| 1,8 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| 1,9 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| 2,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 2,1 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 2,2 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 2,3 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 2,4 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 2,5 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 2,6 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 2,8 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 3,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Таблица П.4

Интегральная функция закона нормального распределения (ЗНР)

| $F_0\left(\frac{t_{ис} - \bar{t}}{\sigma}\right)$ | Сотые доли | | | | | | | | | |
|---|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,0 | 0,50 | 0,50 | 0,51 | 0,51 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 0,54 |
| 0,1 | 0,54 | 0,54 | 0,55 | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,57 | 0,57 | 0,58 |
| 0,2 | 0,58 | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,61 | 0,61 | 0,61 |
| 0,3 | 0,62 | 0,62 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,65 | 0,65 |
| 0,4 | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,69 |
| 0,5 | 0,69 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| 0,6 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| 0,7 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 0,79 |
| 0,8 | 0,79 | 0,79 | 0,79 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 |
| 0,9 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,84 |
| 1,0 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,86 | 0,86 |
| 1,1 | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| 1,2 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| 1,3 | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,92 |
| 1,4 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 |
| 1,5 | 0,93 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |
| 1,6 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,96 |
| 1,7 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |
| 1,8 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 1,9 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| 2,0 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| 2,1 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 2,2 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 2,3 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 2,4 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 2,5 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Таблица П.5

Интегральная функция (функция распределения) $F(t_{ис} - t_{см})$
закона распределения Вейбулла (ЗВР)

| $\frac{t_{ис} - t_{см}}{a}$ | Параметр b | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| 0,1 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| 0,2 | 0,21 | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,09 | 0,07 |
| 0,3 | 0,29 | 0,26 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,17 | 0,15 | 0,14 |
| 0,4 | 0,35 | 0,33 | 0,31 | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,21 |
| 0,5 | 0,41 | 0,39 | 0,37 | 0,35 | 0,33 | 0,32 | 0,30 | 0,28 |
| 0,6 | 0,47 | 0,45 | 0,43 | 0,42 | 0,40 | 0,39 | 0,37 | 0,36 |
| 0,7 | 0,52 | 0,50 | 0,49 | 0,48 | 0,47 | 0,46 | 0,44 | 0,43 |
| 0,8 | 0,56 | 0,55 | 0,54 | 0,54 | 0,53 | 0,52 | 0,51 | 0,50 |

Продолжение табл. П.5

| 0,9 | 0,60 | 0,59 | 0,59 | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,57 | 0,57 |
|----------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,0 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1 | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,69 |
| 1,2 | 0,69 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,73 | 0,73 | 0,74 |
| 1,3 | 0,72 | 0,73 | 0,74 | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,78 |
| 1,4 | 0,74 | 0,75 | 0,77 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,82 |
| 1,5 | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,85 |
| 1,6 | 0,78 | 0,80 | 0,81 | 0,83 | 0,84 | 0,86 | 0,87 | 0,88 |
| 1,7 | 0,80 | 0,82 | 0,83 | 0,85 | 0,86 | 0,88 | 0,89 | 0,90 |
| 1,8 | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 0,92 |
| 1,9 | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,94 |
| 2,0 | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 |
| 2,1 | 0,86 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 |
| 2,2 | 0,87 | 0,89 | 0,91 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 |
| 2,3 | 0,88 | 0,90 | 0,92 | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 |
| 2,4 | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 2,5 | 0,90 | 0,92 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 |
| 2,6 | 0,91 | 0,93 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 |
| 2,7 | 0,91 | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 |
| 2,8 | 0,92 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 2,9 | 0,93 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| 3,0 | 0,93 | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| 3,5 | 0,95 | 0,96 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 |
| 4,0 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| $\frac{t_{i\theta} - t_{CM}}{a}$ | Параметр b | | | | | | | |
| | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 |
| 0,1 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| 0,2 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 0,3 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,05 |
| 0,4 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 0,11 | 0,10 |
| 0,5 | 0,27 | 0,25 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,17 |
| 0,6 | 0,34 | 0,33 | 0,32 | 0,30 | 0,29 | 0,23 | 0,27 | 0,25 |
| 0,7 | 0,43 | 0,41 | 0,40 | 0,39 | 0,38 | 0,37 | 0,36 | 0,35 |
| 0,8 | 0,50 | 0,49 | 0,48 | 0,47 | 0,46 | 0,43 | 0,45 | 0,44 |
| 0,9 | 0,57 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,55 | 0,55 | 0,54 | 0,54 |
| 1,0 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1 | 0,69 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,72 |
| 1,2 | 0,74 | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,78 | 0,79 |
| 1,3 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,85 |
| 1,4 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,89 | 0,89 |
| 1,5 | 0,86 | 0,87 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 |
| 1,6 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,95 |
| 1,7 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,97 |
| 1,8 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 1,9 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 |
| 2,0 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |

Продолжение табл. П.5

| 2,1 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 |
|----------------------------------|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 2,2 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,3 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,4 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,5 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,6 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,7 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,8 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,9 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3,5 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 4,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| $\frac{t_{i\theta} - t_{CM}}{a}$ | Параметр b | | | | | | | |
| | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,2 |
| 0,1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,2 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 0,3 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 0,4 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,05 |
| 0,5 | 0,16 | 0,015 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,11 | 0,10 |
| 0,6 | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,19 | 0,19 | 0,18 |
| 0,7 | 0,34 | 0,33 | 0,32 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,27 |
| 0,8 | 0,44 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,41 | 0,40 | 0,39 | 0,39 |
| 0,9 | 0,54 | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 0,52 | 0,52 | 0,51 | 0,51 |
| 1,0 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1 | 0,72 | 0,72 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,74 |
| 1,2 | 0,79 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,84 |
| 1,3 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,90 |
| 1,4 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,94 | 0,95 |
| 1,5 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 1,6 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 |
| 1,7 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| 1,8 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,9 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| $\frac{t_{i\theta} - t_{CM}}{a}$ | Параметр b | | | | | | | |
| | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,0 |
| 0,1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,3 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 0,4 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 0,5 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| 0,6 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,12 |
| 0,7 | 0,27 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,23 | 0,22 | 0,21 |
| 0,8 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 0,34 | 0,34 |
| 0,9 | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,49 | 0,49 | 0,48 | 0,48 |

Окончание табл. П.5

| | | | | | | | | |
|-----|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 1,0 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| 1,1 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,77 |
| 1,2 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,865 | 0,87 | 0,87 |
| 1,3 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| 1,4 | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 1,5 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| 1,6 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,7 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,8 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1,9 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 2,0 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |