

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Надёжность изделий и систем  
ракетно-космической техники**

Электронный вариант  
контрольно-проверочных материалов

САМАРА

2010

УДК 629.7.017.1 (075)

**Составители: Куренков Владимир Иванович,  
Волоцув Владимир Валерьевич**

Приведены примеры выполнения и оформления отчётов по одному из вариантов лабораторных работ и вопросы к экзамену по курсу «Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники».

Приведены подробные вопросы для подготовки к экзамену.

Рекомендовано для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 160400.68 «Ракетные комплексы и космонавтика» магистерская программа «Проектирование и конструирование космических мониторинговых и транспортных систем».

Материалы разработаны на кафедре летательных аппаратов СГАУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	4
Лабораторная работа № 1	4
Построение функции надёжности по экспериментальным данным	4
Лабораторная работа № 2	7
Оценка надёжности элементов ракетно-космической техники при нормальном законе распределения случайных величин	7
Лабораторная работа №3	11
Доверительные интервалы	11
Лабораторная работа №4	15
Проверка статистических гипотез в задачах надёжности изделий и систем ракетно-космической техники	15
Лабораторная работа №5	19
Расчет надёжности электромеханического толкателя	19
Лабораторная работа №6	21
Оценка надёжности систем безударного разделения методом линеаризации и методом статистических испытаний	21
ВОПРОСЫ ДЛЯ ЭКЗАМЕНА	23

## ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### Лабораторная работа № 1

#### Построение функции надёжности по экспериментальным данным

Цель работы: уяснение физического смысла условий надёжной работы элемента или системы ЛА, повторение понятий случайных величин, используемых для оценки надёжности, законов их распределения и числовых характеристик, закрепление навыков студентов в построении функции надёжности по экспериментальным данным.

Задание (вариант 8): Были проведены замеры напряжений сжатия в одном из сухих отсеков летательного аппарата (ЛА) во время испытательных полетов. Регистрировались только максимальные значения напряжений.

Результаты измерения 10 ЛА следующие: 81, 105, 52, 21, 148, 94, 67, 135, 86, 114 МПа. Построить функцию надёжности. Определить конкретные показатели надёжности конструкции этого отсека, если критические напряжения сжатия конструкторы заложили в конструкцию следующими: а) 135, б) 148, в) 170, г) 250 МПа.

Расчёт функции распределения, функции плотности распределения и функции надёжности

№	Вариационный ряд, t	$F(t) = i/N$	$f(t)$	$H(t)$
1	52	0,1	0,0067	0,1
2	67	0,2	0,0071	0,2
3	81	0,3	0,0200	0,3
4	86	0,4	0,0125	0,4
5	94	0,5	0,0090	0,5
6	105	0,6	0,0111	0,6
7	114	0,7	0,0143	0,7
8	121	0,8	0,0071	0,8
9	135	0,9	0,0077	0,9
10	148	1,0	-	1,0

Расчёт математического ожидания

$$m_t = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{81 + 105 + 52 + 121 + 148 + 94 + 67 + 135 + 86 + 114}{10} = 100,3$$

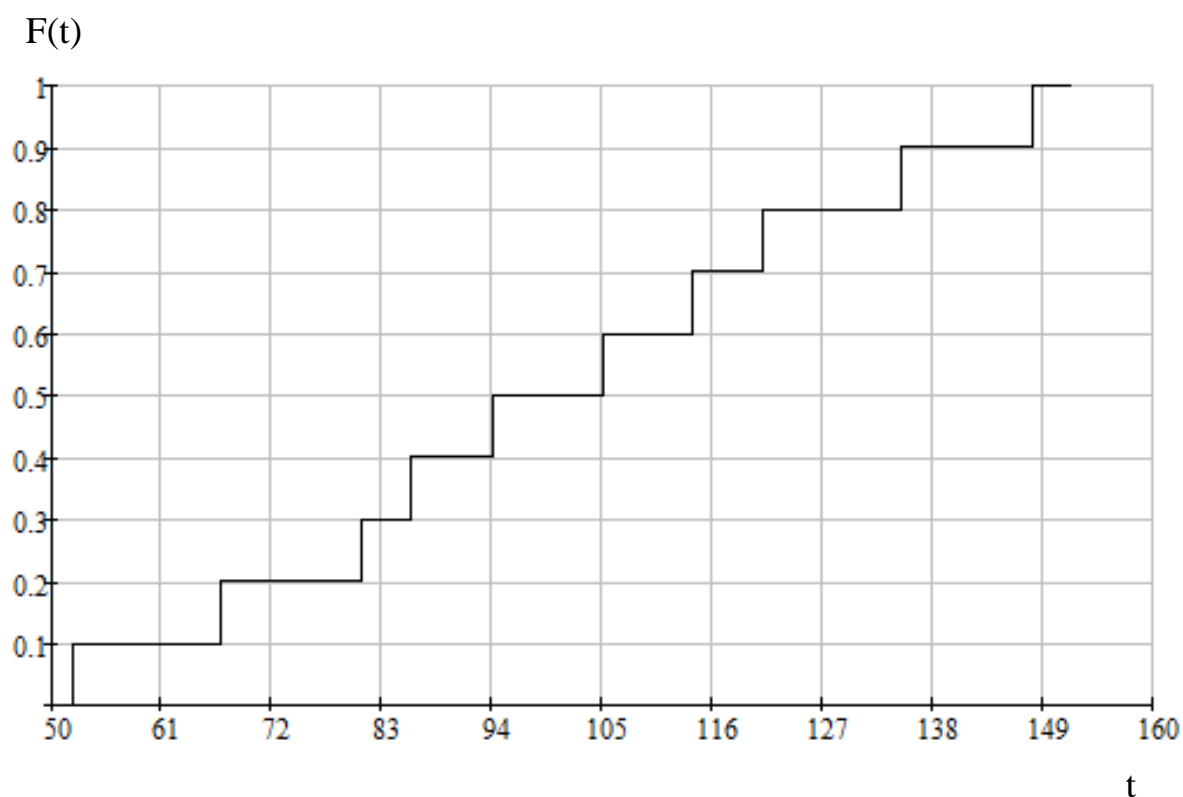
Расчёт дисперсии

$$D_t^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - m_t)^2}{N} = \frac{372,49 + 22,09 + 2332,89 + 428,49 + 2275,29 + 39,69 + 1108,89 + 1204,09 + 204,49 + 187,69}{10} = 908,45$$

Расчёт среднеквадратического отклонения

$$D_t = 30,14 \text{ – среднее квадратичное отклонение.}$$

Построение функции распределения



## Построение функции плотности распределения

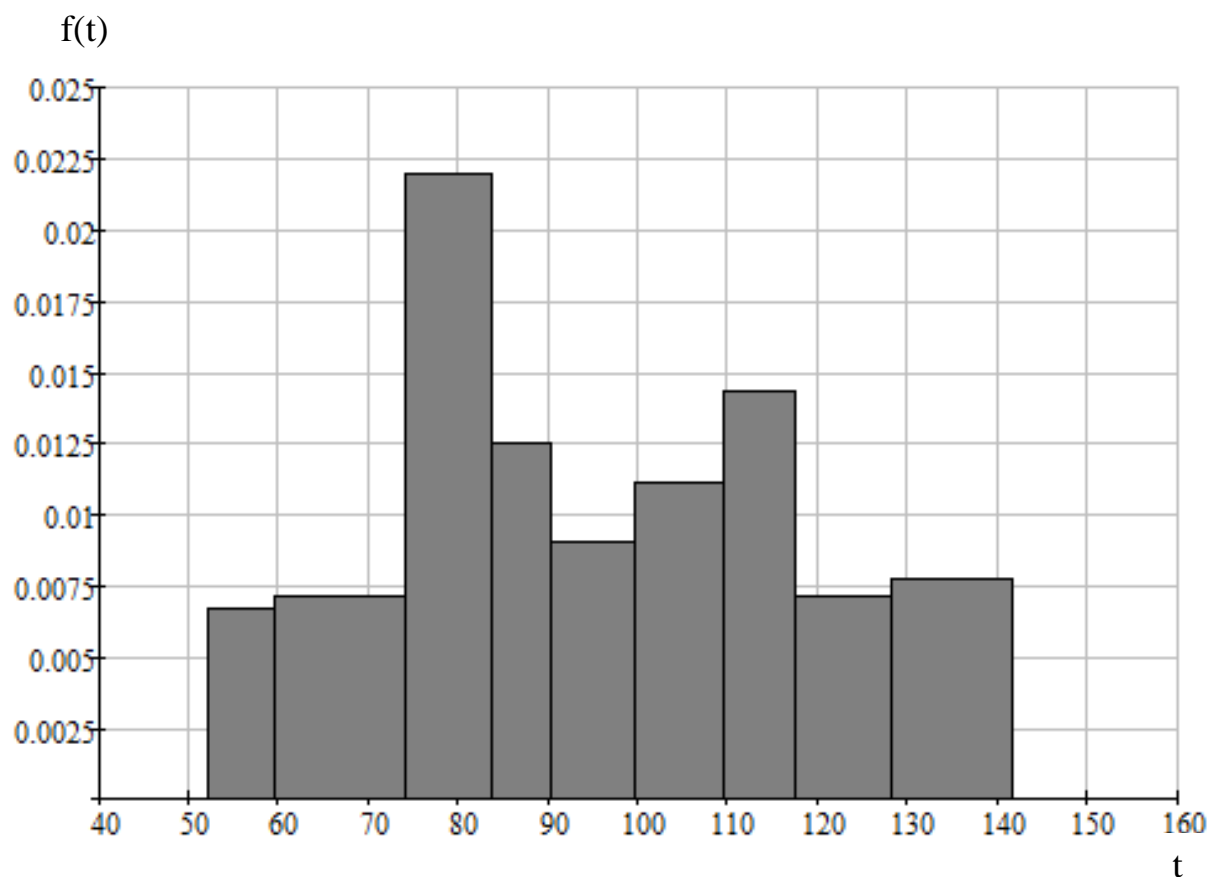


Рисунок 2 - Функция плотности распределения случайной величины

Показатели надёжности для различных вариантов нагрузки и прочности

а) 135 МПа,  $H = 0,9$

б) 148 МПа,  $H = 1,0$

в) 170 МПа,  $H = 1,0$

г) 250 МПа,  $H = 1,0$

**Лабораторная работа № 2**  
**Оценка надёжности элементов ракетно-космической техники при нормальном законе распределения случайных величин**

Цель работы: закрепление навыков студентов в оценке надёжности элементов изделий ракетно-космической техники (РКТ) при нормальном законе распределения случайных величин.

Задание №1: Проверить графическим методом соответствует ли закон распределения случайных величин в задачах лабораторной работы «Построение функции надёжности по экспериментальным данным» (лабораторная работа №1) по нормальному закону.

Задание №2: Даны результаты замеров случайных величин прочности  $R$  и напряжения  $N$ . Провести проверку нормальности законов распределения случайных величин  $R$  и  $N$  графическим методом и при условии нормальности законов распределения оценить надёжность элемента (системы) с использованием таблиц нормального закона распределения.

Данные для варианта №8:

$N$ : 228, 259, 321, 270, 330, 289, 371, 291, 412, 302;

$R$ : 372, 407, 378, 408, 389, 410, 395, 420, 396, 423, 396, 440, 405, 462.

Расчёт показателей надёжности с помощью нормального закона распределения (по исходным данным в лабораторной работе №1):

$$R = 135 \text{ МПа}, H = \Phi\left(\frac{135 - 100,3}{30,14}\right) = \Phi(1,15) = 0,8749$$

$$R = 148 \text{ МПа}, H = \Phi\left(\frac{148 - 100,3}{30,14}\right) = \Phi(1,58) = 0,9430$$

$$R = 170 \text{ МПа}, H = \Phi\left(\frac{170 - 100,3}{30,14}\right) = \Phi(2,31) = 0,9896$$

$$R = 250 \text{ МПа}, H = \Phi\left(\frac{250 - 100,3}{30,14}\right) = \Phi(4,96) = 0,9999996475$$

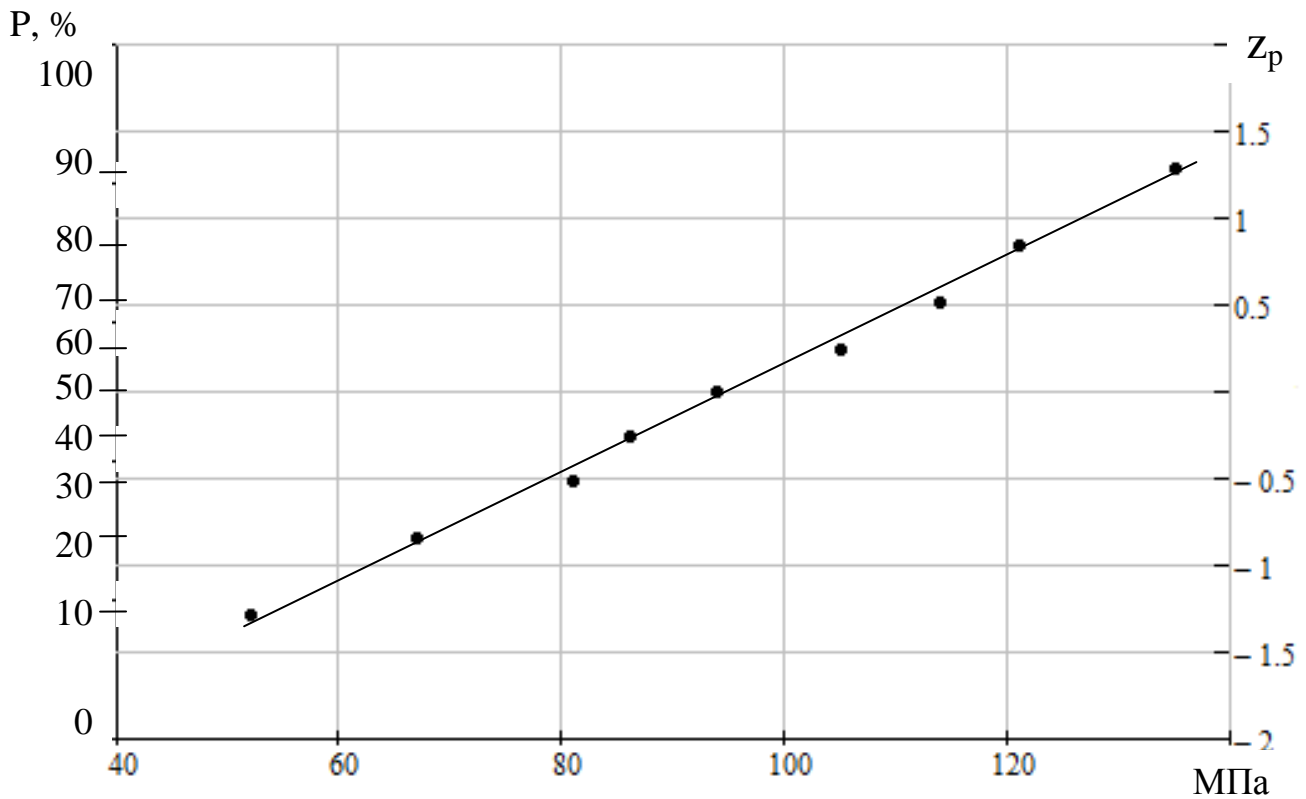


Рисунок 1 - Функция распределения случайной величины в специальной шкале ординат для данных из лабораторной работы 1

Расчёт функций распределения для данных из лабораторной работы 2

№	Вариационный ряд, $t(N)$	$F(t) = i/N$
1	228	0,1
2	259	0,2
3	270	0,3
4	289	0,4
5	291	0,5
6	302	0,6
7	321	0,7
8	330	0,8
9	371	0,9
10	412	1,0

№	Вариационный ряд, $t(R)$	$F(t) = i/N$
1	372	0,07
2	378	0,14
3	389	0,21
4	395	0,29
5	396	0,36
6	396	0,43
7	405	0,5
8	407	0,57
9	408	0,64
10	410	0,71
11	420	0,79
12	423	0,86
13	440	0,93
14	462	1,0



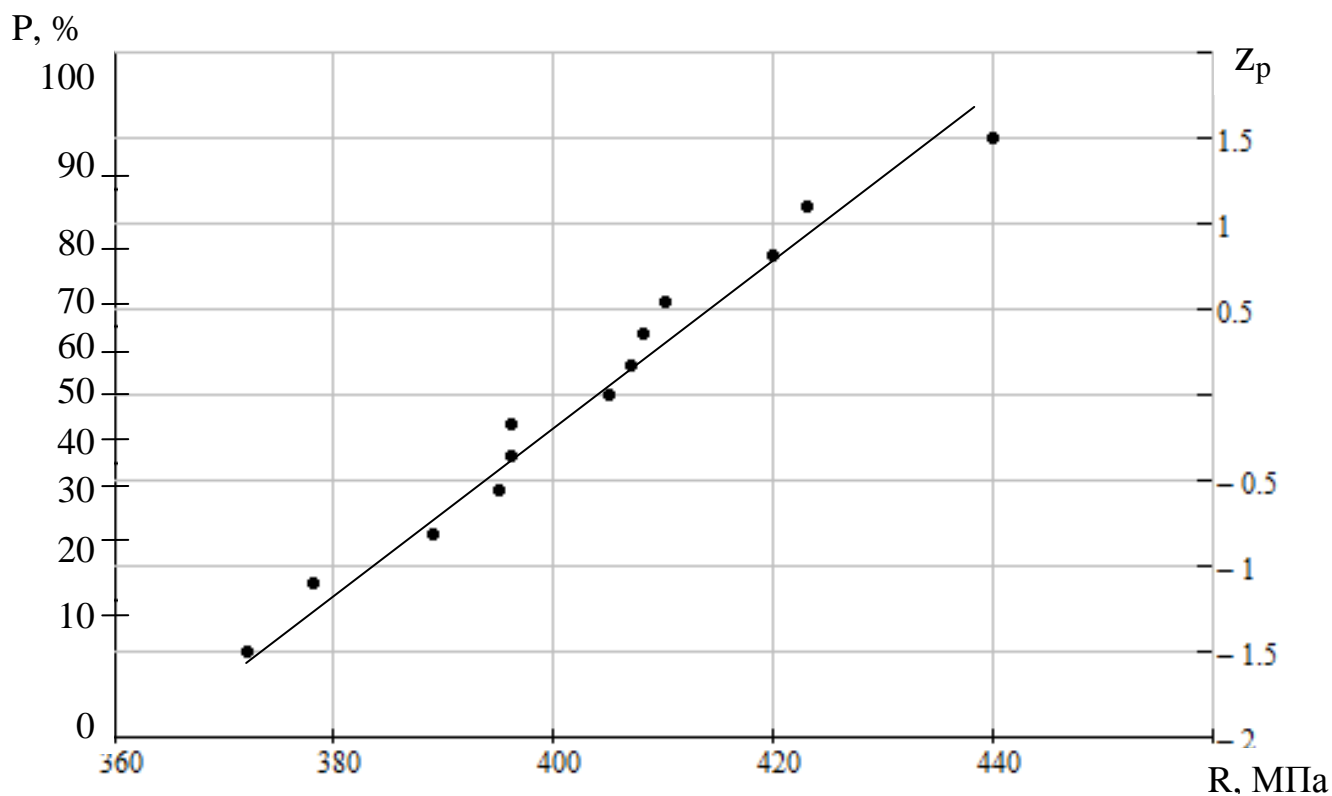


Рисунок 2 - Функция распределения случайной величины в специальной шкале ординат для данных по  $R$

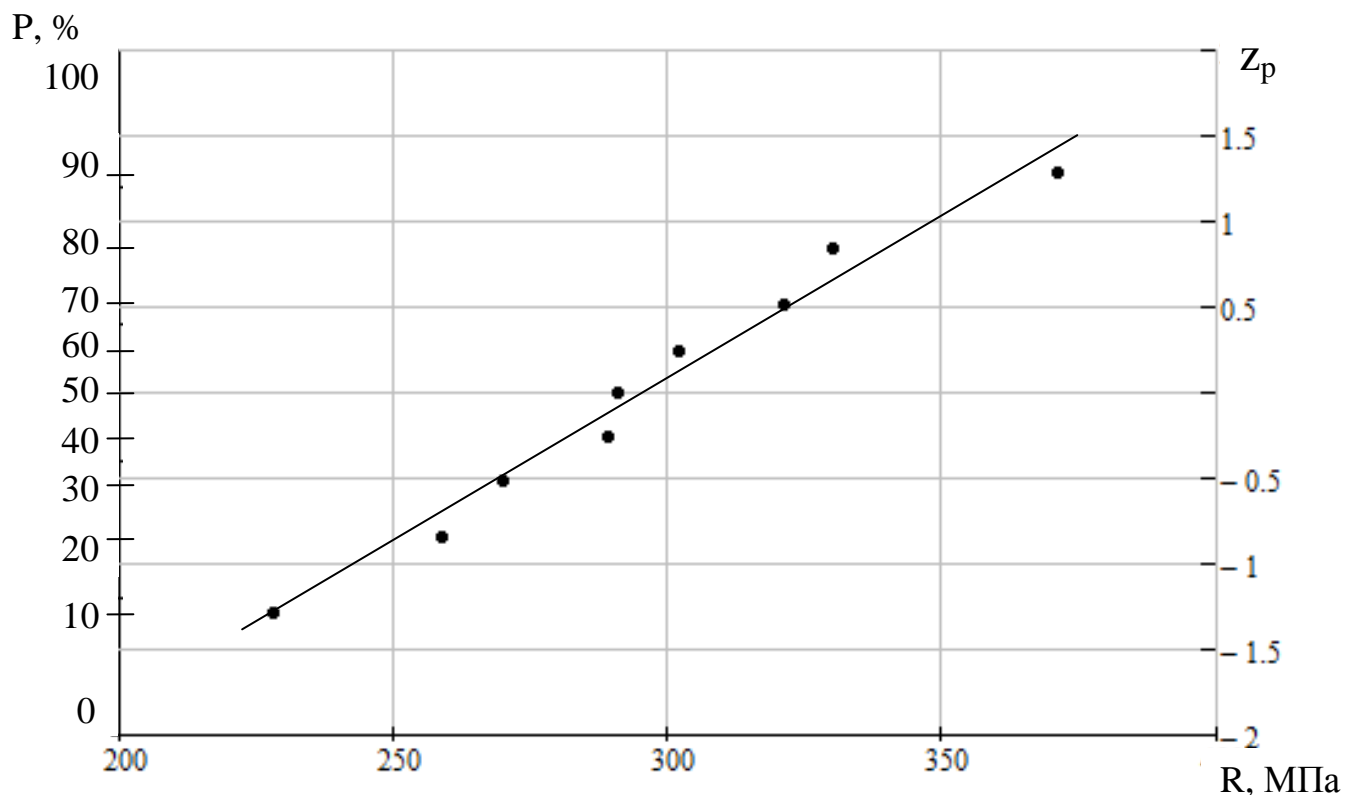


Рисунок 3 - Функция распределения случайной величины в специальной шкале ординат для данных по  $N$

Расчёт математических ожиданий и дисперсий

$$m_N = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_i}{N} = \frac{228 + 259 + 270 + 289 + 291 + 302 + 321 + 330 + 371 + 412}{10} = 307,3$$

$$m_R = \frac{\sum_{i=1}^{14} t_i}{N} = \frac{372 + 378 + 389 + 395 + 396 + 405 + 407 + 408 + 410 + 420 + 423 + 440 + 462}{14} = 407,2$$

$$D_N^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} (t_i - m_N)^2}{N - 1} = \frac{6287,49 + 2332,89 + 1391,29 + 334,89 + 265,69 + 28,09 + 187,69 + 515,29 + 4057,69 + 10962,09}{9} = 2929,34$$

$$D_N = 54,12$$

$$D_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{14} (t_i - m_R)^2}{N - 1} = \frac{1239,04 + 852,64 + 331,24 + 148,84 + 125,44 + 125,44 + 4,84 + 0,04 + 0,64 + 7,84 + 163,84 + 249,64 + 1075,84 + 3003,04}{9} = 563,72$$

$$D_R = 23,74$$

Вычисление аргумента функции  $\Phi$ :

$$\frac{m_R - m_N}{\sqrt{D_R^2 + D_N^2}} = \frac{407,2 - 307,3}{\sqrt{563,72 + 2929,34}} = \frac{99,9}{\sqrt{3493,06}} = 1,69$$

По таблице нормального распределения находим показатель надежности:

$$H = \Phi(1,69) = 0,95449$$

### Лабораторная работа №3 Доверительные интервалы

Цель работы: Знакомство с понятиями доверительный интервал и доверительная вероятность, закрепление навыков в оценке доверительных интервалов для математического ожидания и дисперсии случайной величины, представленной в виде выборки экспериментальных данных.

Задание: Определить доверительные интервалы для случайной величины, ее математического ожидания и дисперсии в заданиях лабораторной работы №1 (Построение функции надёжности по экспериментальным данным) и в заданиях второй части лабораторной работы №2 (Оценка надёжности элементов ракетно-космической техники при нормальном законе распределения случайных величин) при нормальном законе распределения случайных величин. Доверительные вероятности взять равными 0,9; 0,95; 0,99.

$$1) \quad I_{\gamma} = (m_x - U_{\frac{\gamma+1}{2}} \cdot D_x; m_x + U_{\frac{\gamma+1}{2}} \cdot D_x)$$

$$m_x = 100,3 \quad \gamma = 0,9 \rightarrow U = \pm 1,3$$

$$D_x^2 = 908,45 \quad \gamma = 0,95 \rightarrow U = \pm 1,643$$

$$m_x = 30,14 \quad \gamma = 0,99 \rightarrow U = \pm 2,33$$

Доверительный интервал (доля реализаций) для случайной величины:

$$I_{0,9} = (100,3 - 1,3 \cdot 30,14; 100,3 + 1,3 \cdot 30,14) \\ = (100,3 - 39,182; 100,3 + 39,182) = (61,118; 139,482)$$

$$I_{0,95} = (100,3 - 1,643 \cdot 30,14; 100,3 + 1,643 \cdot 30,14) \\ = (100,3 - 49,52; 100,3 + 49,52) = (50,78; 149,82)$$

$$I_{0,99} = (100,3 - 2,33 \cdot 30,14; 100,3 + 2,33 \cdot 30,14) \\ = (100,3 - 70,23; 100,3 + 70,23) = (30,07; 170,53)$$

Доверительный интервал для математического ожидания:

$$I_{m_x} = \left( m_x - t \cdot \frac{D_x}{\sqrt{n}}; m_x + t \cdot \frac{D_x}{\sqrt{n}} \right)$$

$n$  – число измерений;  $n = 10$ .

Для  $\nu = n - 1 = 9$  и  $\gamma = 0,9$ ;  $t = 1,833$ .

$$I_{mx} = \left( 100,3 - 1,833 \cdot \frac{30,14}{3,16}; 100,3 + 1,833 \cdot \frac{30,14}{3,16} \right) \\ = (100,3 - 17,48; 100,3 + 17,48) = (82,82; 117,78).$$

Для  $\nu = n - 1 = 9$  и  $\gamma = 0,95$ ;  $t = 2,262$ .

$$I_{mx} = \left( 100,3 - 2,262 \cdot \frac{30,14}{3,16}; 100,3 + 2,262 \cdot \frac{30,14}{3,16} \right) \\ = (100,3 - 10,25; 100,3 + 10,25) = (78,73; 121,85).$$

Для  $\nu = n - 1 = 9$  и  $\gamma = 0,99$ ;  $t = 3,250$ .

$$I_{mx} = \left( 100,3 - 3,250 \cdot \frac{30,14}{3,16}; 100,3 + 3,250 \cdot \frac{30,14}{3,16} \right) \\ = (100,3 - 10,25; 100,3 + 10,25) = (69,3; 131,3).$$

Доверительный интервал для дисперсии:

$$\alpha_1 = \frac{1 - \gamma}{2}; \quad \alpha_2 = \frac{1 + \gamma}{2};$$

$$\gamma = 0,9 \rightarrow \alpha_1 = 0,05; \alpha_2 = 0,95;$$

$$\gamma = 0,95 \rightarrow \alpha_1 = 0,025; \alpha_2 = 0,975;$$

$$\gamma = 0,99 \rightarrow \alpha_1 = 0,005; \alpha_2 = 0,995;$$

$$\gamma = 0,9 \rightarrow \chi_1^2 = 22,762; \chi_2^2 = 5,892;$$

$$\gamma = 0,95 \rightarrow \chi_1^2 = 24,736; \chi_2^2 = 5,009;$$

$$\gamma = 0,99 \rightarrow \chi_1^2 = 29,819; \chi_2^2 = 3,565;$$

$$I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{\widehat{D}_x^2(n-1)}{\chi_1^2}; \frac{\widehat{D}_x^2(n-1)}{\chi_2^2} \right)$$

$$\gamma = 0,9 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{563,72 \cdot 13}{22,362}; \frac{563,72 \cdot 13}{5,892} \right) = (327,71; 1243,78)$$

$$\gamma = 0,95 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{563,72 \cdot 13}{24,736}; \frac{563,72 \cdot 13}{5,009} \right) = (296,26; 1464,79)$$

$$\gamma = 0,99 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{563,72 \cdot 13}{29,819}; \frac{563,72 \cdot 13}{3,565} \right) = (245,76; 2055,64)$$

$$\gamma = 0,9 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{308,45 \cdot 9}{16,919}; \frac{308,45 \cdot 9}{3,325} \right) = (483,25; 2458,96)$$

$$\gamma = 0,95 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{308,45 \cdot 9}{19,023}; \frac{308,45 \cdot 9}{2,700} \right) = (429,79; 3028,16)$$

$$\gamma = 0,99 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{308,45 \cdot 9}{23,589}; \frac{308,45 \cdot 9}{1,735} \right) = (346,6; 4712,42)$$

$$2) \quad I_{\gamma} = \left( m_x - \frac{U_{\gamma+1}}{2} \cdot D_x; m_x + \frac{U_{\gamma+1}}{2} \cdot D_x \right)$$

1.  $m_x = 307,3; D_x^2 = 2929,34; D_x = 54,12; n = 10.$   
 2.  $m_x = 407,2; D_x^2 = 563,72; D_x = 23,74; n = 14.$

1. Доверительные интервалы для случайной величины:

$$I_{0,9} = (307,3 - 1,3 \cdot 54,12; 307,3 + 1,3 \cdot 54,12)$$

$$= (307,3 - 70,36; 307,3 + 70,36) = (236,94; 377,66)$$

$$I_{0,95} = (307,3 - 1,643 \cdot 54,12; 307,3 + 1,643 \cdot 54,12)$$

$$= (307,3 - 88,92; 307,3 + 88,92) = (218,38; 396,22)$$

$$I_{0,99} = (307,3 - 2,33 \cdot 54,12; 307,3 + 2,33 \cdot 54,12)$$

$$= (307,3 - 126,1; 307,3 + 126,1) = (181,2; 433,4)$$

Доверительные интервалы для математического ожидания:

$$I_{mx} = \left( m_x - t \cdot \frac{D_x}{\sqrt{n}}; m_x + t \cdot \frac{D_x}{\sqrt{n}} \right)$$

$$I_{mx_{0,9}} = \left( 307,3 - 1,833 \cdot \frac{54,12}{3,16}; 307,3 + 1,833 \cdot \frac{54,12}{3,16} \right)$$

$$= (307,3 - 31,39; 307,3 + 31,39) = (275,91; 338,69).$$

$$I_{mx_{0,95}} = \left( 307,3 - 2,262 \cdot \frac{54,12}{3,16}; 307,3 + 2,262 \cdot \frac{54,12}{3,16} \right)$$

$$= (307,3 - 38,74; 307,3 + 38,74) = (268,56; 346,04).$$

$$I_{mx_{0,99}} = \left( 307,3 - 3,25 \cdot \frac{54,12}{3,16}; 307,3 + 3,25 \cdot \frac{54,12}{3,16} \right)$$

$$= (307,3 - 55,66; 307,3 + 55,66) = (251,64; 362,96).$$

Доверительный интервал для дисперсии:

$$\alpha_1 = \frac{1 - \gamma}{2}; \quad \alpha_2 = \frac{1 + \gamma}{2};$$

$$\gamma = 0,9 \rightarrow \alpha_1 = 0,05; \alpha_2 = 0,95; \chi_1^2 = 16,919; \chi_2^2 = 3,325;$$

$$\gamma = 0,95 \rightarrow \alpha_1 = 0,025; \alpha_2 = 0,975; \chi_1^2 = 19,023; \chi_2^2 = 2,700;$$

$$\gamma = 0,99 \rightarrow \alpha_1 = 0,005; \alpha_2 = 0,995; \chi_1^2 = 23,589; \chi_2^2 = 1,735;$$

$$I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{\widehat{D}_x^2(n-1)}{\chi_1^2}; \frac{\widehat{D}_x^2(n-1)}{\chi_2^2} \right)$$

$$\gamma = 0,9 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{2929,34 \cdot 9}{16,919}; \frac{2929,34 \cdot 9}{3,325} \right) = (1558,25; 7929,04)$$

$$\gamma = 0,95 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{2929,34 \cdot 9}{19,023}; \frac{2929,34 \cdot 9}{2,700} \right) = (1385,9; 9764,46)$$

$$\gamma = 0,99 : I_{D_{xy}^2} = \left( \frac{2929,34 \cdot 9}{23,589}; \frac{2929,34 \cdot 9}{1,725} \right) = (1117,64; 15283,51)$$

2. Доверительные интервалы для случайной величины:

$$I_\gamma = \left( m_x - \frac{U_{\gamma+1}}{2} \cdot D_x; m_x + \frac{U_{\gamma+1}}{2} \cdot D_x \right)$$

$$\begin{aligned} I_{0,9} &= (407,2 - 1,3 \cdot 23,74; 407,2 + 1,3 \cdot 23,74) \\ &= (407,2 - 30,86; 407,2 + 30,86) = (376,34; 438,06) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{0,95} &= (407,2 - 1,643 \cdot 23,74; 407,2 + 1,643 \cdot 23,74) \\ &= (407,2 - 39; 407,2 + 39) = (368,2; 446,2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{0,99} &= (407,2 - 2,33 \cdot 23,74; 407,2 + 2,33 \cdot 23,74) \\ &= (407,2 - 55,31; 407,2 + 55,31) = (351,89; 462,51) \end{aligned}$$

## Лабораторная работа №4

### Проверка статистических гипотез в задачах надежности изделий и систем ракетно-космической техники

Цель занятия: Уяснение сути методов проверки статистических гипотез, используемых в теории надежности изделий и систем ракетно-технической техники. Закрепление навыков студентов в проверке некоторых часто используемых статистических гипотез.

Задание: По выборкам, представленным в методических указаниях к лабораторной работе №1, убедиться, что крайние члены упорядоченных выборок принадлежат генеральной совокупности. Провести проверку гипотезы о нормальном распределении выборки. Проверку гипотезы о резко выделяющихся членах выборки проводить только для вариантов заданий, в которых результаты экспериментов представлены в виде отдельных экспериментальных точек. По выборкам, представленным в методических указаниях к лабораторной работе №2, проверить гипотезу о равенстве дисперсии и средних значений. Проверку всех указанных значений гипотез рекомендуется проводить при уровне значимости 0,05.

1) Убедиться, что крайние члены выборки (упорядоченной) из лабораторной работы №1 принадлежат генеральной совокупности.

Для проверки используем метод  $r$ -критерия.

1.  $H_0: x_1 = 52$  принадлежит данной выборке.  $\alpha$  принимаем равной 0,05.

$$r_{min} = \frac{\hat{m}_x - x_1}{\hat{D}_x \sqrt{\frac{(n-1)}{n}}} = \frac{100,3 - 52}{30,14 \sqrt{\frac{(10-1)}{10}}} = \frac{48,3}{30,14 \cdot 0,95} = 1,68; \quad r_\alpha = 2,294$$

Видим, что  $|r_{min}| < r_\alpha$  ( $1,68 < 2,294$ )  $\rightarrow$  гипотеза  $H_0$  принимаемая.

2.  $H_0: x_{10} = 148$  принадлежит данной выборке.  $\alpha$  принимаем равной 0,05.

$$r_{max} = \frac{x_{10} - \hat{m}_x}{\hat{D}_x \sqrt{\frac{(n-1)}{n}}} = \frac{148 - 100,3}{30,14 \sqrt{\frac{(10-1)}{10}}} = \frac{47,7}{30,14 \cdot 0,95} = 1,66; \quad r_\alpha = 2,294$$

Видим, что  $|r_{min}| < r_\alpha$  ( $1,66 < 2,294$ )  $\rightarrow$  гипотеза  $H_0$  принимаемая.

2) Провести проверку гипотезы о нормальном распределении выборки.

1. Произведем проверку по методу Смирнова.

Выдвинем гипотезу, что распределение случайной величины из лабораторной работы №1 подчиняется нормальному закону.

$\alpha = 0,05$  – уровень значимости.

Вычислим наблюдаемое значение критической статистики (показатель согласования):

$$\hat{u} = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[ F_{\hat{x}}(x_i) - \frac{2i-1}{2n} \right]^2$$

$F_{\hat{x}}(x_i)$  – теоретическое значение исследуемой функции распределения при параметрах распределения  $m_{\hat{x}}$  и  $D_{\hat{x}}$ .

Проверяется нормальный закон распределения:

$$F_{\hat{x}}(x_i) = \Phi \left( \frac{x_i - m_{\hat{x}}}{D_{\hat{x}}} \right)$$

$$\Phi_1 = \left( \frac{52 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(-1,6) = 0,0548$$

$$\Phi_2 = \left( \frac{67 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(-1,1) = 0,1357$$

$$\Phi_3 = \left( \frac{81 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(-0,64) = 0,2611$$

$$\Phi_4 = \left( \frac{86 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(-0,47) = 0,3192$$

$$\Phi_5 = \left( \frac{94 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(-1,6) = 0,0548$$

$$\Phi_6 = \left( \frac{105 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(0,15) = 0,5596$$

$$\Phi_7 = \left( \frac{114 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(0,45) = 0,6736$$

$$\Phi_8 = \left( \frac{121 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(0,68) = 0,7517$$

$$\Phi_9 = \left( \frac{135 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(1,15) = 0,8749$$

$$\Phi_{10} = \left( \frac{148 - 100,3}{30,14} \right) = \Phi(1,58) = 0,94295$$



$$\begin{aligned}
\hat{u} &= \frac{1}{12 \cdot 10} + \left[0,0548 - \frac{2 \cdot 1 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 + \left[0,1357 - \frac{2 \cdot 2 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 \\
&+ \left[0,2611 - \frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 + \left[0,3192 - \frac{2 \cdot 4 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 \\
&+ \left[0,4168 - \frac{2 \cdot 5 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 + \left[0,5596 - \frac{2 \cdot 6 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 \\
&+ \left[0,6736 - \frac{2 \cdot 7 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 + \left[0,7517 - \frac{2 \cdot 8 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 \\
&+ \left[0,8749 - \frac{2 \cdot 9 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 + \left[0,94295 - \frac{2 \cdot 10 - 1}{2 \cdot 10}\right]^2 \\
&= 0,083 + 0,000023 + 0,0002 + 0,0001 \\
&+ 0,0171 + 0,0011 + 0,000092 + 0,00055 + 0,0000028 + 0,0062 \\
&+ 0,00000025 = 0,02809
\end{aligned}$$

Из таблицы  $U_{\alpha=0,05} = 0,461$ .

Так как  $\hat{u} < U_{\alpha}$ , то принимается, что выборка не противоречит нормальному закону распределения с вероятностью 95%.

2) По выборкам из лабораторной работы №2 проверить гипотезу о равенстве дисперсий и средних значений.

1. Проверка гипотезы о равенстве дисперсий (по критерию Фишера):

$$H_0: \hat{D}_{x_1}^2 = \hat{D}_{x_2}^2; \alpha = 0,05$$

Критической статистикой служит функция  $F = \frac{\hat{D}_{x_1}^2}{\hat{D}_{x_2}^2}$ , если  $\hat{D}_{x_1}^2 > \hat{D}_{x_2}^2$

$$F = \frac{2929,34}{563,72} = 5,196; \nu_1 = n_1 - 1 = 9; \nu_2 = n_2 - 1 = 13$$

Для этого  $F_{0,05} = 2,71$ .

Т.к.  $F = 5,196 > F_{0,05} = 2,71$ , гипотеза  $H_0$  отвергается, т.е. значения, полученные по выборке, противоречат утверждению о равенстве дисперсий, следовательно,  $\hat{D}_{x_1}^2 \neq \hat{D}_{x_2}^2$  (в статистическом смысле).

2. Проверка гипотезы о равенстве двух средних:

Выдвигается гипотеза  $H_0: \hat{m}_{x_1} = \hat{m}_{x_2}; \alpha = 0,05$ .

Критической статистикой служит следующая функция выборочных данных:

$$\begin{aligned}
t &= \frac{\hat{m}_{x_1} - \hat{m}_{x_2}}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)\hat{D}_{x_1}^2 + (n_2 - 1)\hat{D}_{x_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \\
&= \frac{307,3 + 407,2}{\sqrt{\frac{9 \cdot 2929,34 + 13 \cdot 563,72}{10 + 14 - 2}}} \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 14}{10 + 14}} \\
&= \frac{714,5}{\sqrt{\frac{26364,06 + 7328,36}{22}}} \cdot \sqrt{\frac{140}{124}} = 17,408 \cdot 2,415 = 42,0443.
\end{aligned}$$

$$t = 0,05; 20 = 2,086$$

$t = 42,0443 > t_{0,05;20} = 2,086 \rightarrow$  гипотеза о равенстве двух средних не верна.

## Лабораторная работа №5

### Расчет надежности электромеханического толкателя

Цель занятия: закрепление навыков студентов в расчете надежности конкретных систем ракетно-космической техники.

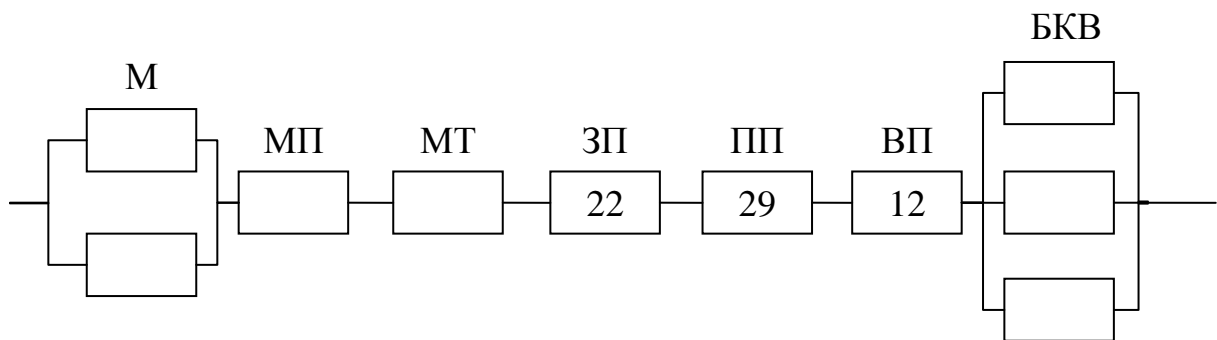
Задание: оценить надежность и среднее время наработки до отказа толкателя при количестве циклов штатной работы толкателя, данном ниже.

Номер задания: 8.

Количество циклов: 700.

$$t_{1ц} = 0,11 \text{ часов} \rightarrow t_p = t_{1ц} \cdot 700 = 77 \text{ ч}$$

$$t_3 = 120 \text{ суток} \rightarrow t_x = 2880 - t_p = 2803 \text{ ч}$$



$$H_{\text{послед}} = 1 - (\lambda_p \cdot t_p + \lambda_x \cdot t_x)$$

(p,x)

$$\lambda_p = \lambda_n \cdot K_p; \lambda_x = \lambda_n \cdot K_x$$

Каждый элемент рассмотрим в виде:

$$H_M = 1 - (\lambda_{нМ} \cdot K_{рМ} \cdot t_p + \lambda_{нМ} \cdot K_{хМ} \cdot t_x) =$$

$$= 1 - (5,36 \cdot 10^{-6} \cdot 0,3 \cdot 77 + 5,36 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 2803) =$$

$$= 1 - (123,816 \cdot 10^{-6} + 90,145 \cdot 10^{-6}) = 1 - 213,96 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0,999785$$

$$H_{МП} = 1 - (0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 77 + 0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot 2803) =$$

$$= 1 - (48,51 \cdot 10^{-6} + 1,765 \cdot 10^{-6}) = 1 - 50,275 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0,999949$$

$$H_{МТ} = 1 - (0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 77 + 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot 2803) =$$

$$= 1 - (30,8 \cdot 10^{-6} + 1,121 \cdot 10^{-6}) = 1 - 31,921 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 0,999968$$

$$H_{ЗП} = 1 - (0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 77 + 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot 2803) =$$

$$= 1 - (15,4 \cdot 10^{-6} + 0,56 \cdot 10^{-6}) = 1 - 15,96 \cdot 10^{-6} = 0,999984$$

$$H_{ПП} = 0,999984$$

$$H_{ВП} = 1 - (0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 77 + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot 2803) =$$

$$= 1 - (38,5 \cdot 10^{-6} + 1,4 \cdot 10^{-6}) = 1 - 39,9 \cdot 10^{-6} = 0,99996$$

$$H_{ПК} = 0,999984$$

$$\begin{aligned}
 H_{\text{КП}} &= 1 - (0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 77 + 0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot 2803) = \\
 &= 1 - (48,51 \cdot 10^{-6} + 1,765 \cdot 10^{-6}) = 1 - 50,275 \cdot 10^{-6} \\
 &= 0,99996
 \end{aligned}$$

$$H_{\text{система М}} = 1 - (1 - H_{\text{М}})^2 = 1 - (1 - 0,999786)^2 = 0,99999954 \approx 1$$

$$\begin{aligned}
 H_{\text{система КП}} &= 3H_{\text{КП}}^2 - 2H_{\text{КП}}^3 = 3 \cdot 0,99898 - 2 \cdot 0,999847 \\
 &= 2,999694 - 1,999694 = 1
 \end{aligned}$$

$$H_{\text{система МП}} = 0,999949$$

$$H_{\text{система МТ}} = 0,999968$$

$$H_{\text{система ЗП}} = 1 - 22 \cdot 15,96 \cdot 10^{-6} = 1 - 351,12 \cdot 10^{-6} = 0,99964$$

$$H_{\text{система ВП}} = 1 - 12 \cdot 39,9 \cdot 10^{-6} = 1 - 478,8 \cdot 10^{-6} = 0,99952$$

$$H_{\text{система ПП}} = 1 - 29 \cdot 15,96 \cdot 10^{-6} = 1 - 462,84 \cdot 10^{-6} = 0,99953$$

Надежность всей системы:

$$\begin{aligned}
 H_{\Sigma} &= \prod_{i=1}^n H_i = H_{\text{система М}} \cdot H_{\text{система КП}} \cdot H_{\text{система МП}} \cdot H_{\text{система МТ}} \cdot H_{\text{система ЗП}} \\
 &\quad \cdot H_{\text{система ВП}} \cdot H_{\text{система ПП}} \\
 &= 1 \cdot 1 \cdot 0,999949 \cdot 0,999968 \cdot 0,99964 \cdot 0,99952 \cdot 0,99953 \\
 &= 0,99832
 \end{aligned}$$

Среднее время выработки до отказа:

$$t_{\text{ср М}} = \frac{1}{\lambda_{\text{М}}} \left( 1 + \frac{1}{2} \right) = \frac{1,5}{1,608 \cdot 10^{-6}} = 932836 \text{ часов}$$

$$t_{\text{ср КП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{КП}}} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = \frac{1,83}{0,63 \cdot 10^{-6}} = 2904762 \text{ часа}$$

$$t_{\text{ср}} \text{ для последующих: } t_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda}$$

$$t_{\text{ср МП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{МП}}} = \frac{1}{0,63 \cdot 10^{-6}} = 1587302 \text{ часа}$$

$$t_{\text{ср МТ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{МТ}}} = \frac{1}{0,4 \cdot 10^{-6}} = 2500000 \text{ часов}$$

$$t_{\text{ср ЗП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ЗП}}} = \frac{1}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 5000000 \text{ часа} \rightarrow t_{\text{ср ЗП}_N} = \frac{t_{\text{ср ЗП}}}{22} = 227273 \text{ часа}$$

$$t_{\text{ср ПП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ПП}}} = \frac{1}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 5000000 \text{ часа} \rightarrow t_{\text{ср ПП}_N} = \frac{t_{\text{ср ПП}}}{29} = 172414 \text{ часа}$$

$$t_{\text{ср ВП}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ВП}}} = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 2000000 \text{ часа} \rightarrow t_{\text{ср ВП}_N} = \frac{t_{\text{ср ВП}}}{12} = 166667 \text{ часов}$$

$$t_{\text{ср системы}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{932836} + \frac{1}{2904762} + \frac{1}{1587302} + \frac{1}{2500000} + \frac{1}{227273} + \frac{1}{172414} + \frac{1}{166667} \right)} = 53630 \text{ часов.}$$

**Лабораторная работа №6**  
**Оценка надежности систем безударного разделения методом**  
**линеаризации и методом статистических испытаний**

Цель работы: Уяснение сущности метода статистических испытаний и закрепление навыков в применении этого метода для оценки надежности простейших систем безударного разделения элементов ЛА

Задание: Рассчитать надежность системы безударного отделения головной части ЛА при разделении по данной в методическом пособии схеме двумя методами

$$D_J = 4000 \text{ Нс}$$

$$D_Q = 6000 \text{ Нс}$$

$$m_M = 1000 \text{ кг}$$

$$D_M = 50 \text{ кг}$$

$$m_J = 30000 \text{ Нс}$$

$$m_Q = 20000 \text{ Нс}$$

$$m_V = \frac{m_J - m_Q}{m_M} = \frac{30000 - 20000}{1000} = 10 \text{ М/с}$$

$$D_V = \sqrt{\frac{D_J^2 + D_Q^2 + m_V^2 D_M^2}{m_M^2}} = \sqrt{\frac{4000^2 + 6000^2 + 10^2 50^2}{1000^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{16000000 + 36000000 + 250000}{1000000}} = \sqrt{52,25} = 7,2284$$

$$H = \Phi\left(\frac{m_V}{D_V}\right) = \Phi\left(\frac{10}{7,2284}\right) = \Phi(1,3834) = 0,91621$$

$$N = 100 \rightarrow \lg(100) = 2$$

$$M_V = 10,57427$$

$$D_V = 7,69048$$

$$a = M_V/D_V = 1,375046$$

$$H = 9,1544 \cdot 10^{-1}$$

$$H = m/n = 9,1 \cdot 10^{-1}$$

$$N = 300 \rightarrow \lg(300) = 2,477$$

$$M_V = 9,981252$$

$$D_V = 7,414058$$

$$a = M_V/D_V = 1,344609$$

$$H = 9,111079 \cdot 10^{-1}$$

$$H = m/n = 9,033333 \cdot 10^{-1}$$

$$N = 1000 \rightarrow \lg(1000) = 3$$

$$M_V = 10,57774$$

$$D_V = 7,269337$$

$$a = M_V/D_V = 1,455118$$

$$H = 9,271317 \cdot 10^{-1}$$

$$H = m/n = 9,29 \cdot 10^{-1}$$

$$N = 10000 \rightarrow \lg(10000) = 4$$

$$M_V = 10,04927$$

$$D_V = 7,234806$$

$$a = M_V/D_V = 1,389017$$

$$H = 9,175861 \cdot 10^{-1}$$

$$H = m/n = 9,185 \cdot 10^{-1}$$

$$N = 3000 \rightarrow \lg(3000) = 3,48$$

$$M_V = 9,969071$$

$$D_V = 7,336335$$

$$a = M_V/D_V = 1,358863$$

$$H = 9,12904 \cdot 10^{-1}$$

$$H = m/n = 9,166666 \cdot 10^{-1}$$

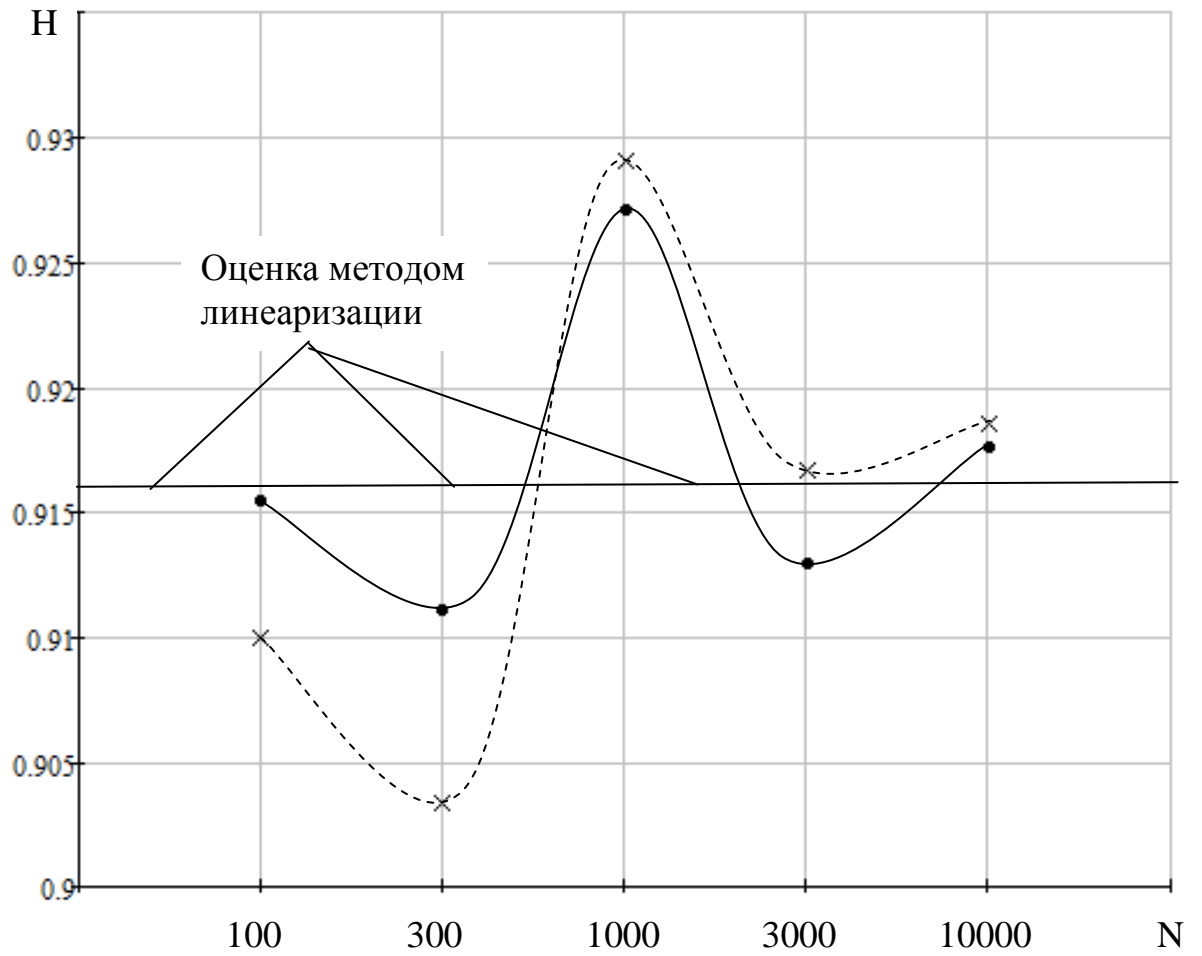


Рисунок 1 – График влияния числа статистических испытаний на точность оценок показателей надёжности

# ВОПРОСЫ ДЛЯ ЭКЗАМЕНА

по дисциплине

«Надёжность изделий и систем ракетно-космической техники»  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению 160400.68 «Ракетные комплексы и космонавтика»  
магистерская программа «Проектирование и конструирование  
космических мониторинговых и транспортных систем».

## 1.МЕТОДИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Классификация стандартов по надежности.

Качество, эффективность и надежность - важнейшие свойства сложных технических систем. Определение надежности и ее свойств.

Термины и определения надежности космических комплексов и аппаратов..

Изменение надежности КА в процессе жизненного цикла.

Нормирование надежности.

Критерии отказов, повреждений и предельных состояний.

Основные технические состояния объектов.

Дефекты, повреждения, отказы.

Временные понятия.

Техническое обслуживание и ремонт.

Выбор номенклатуры нормируемых показателей надежности.

Показатели надежности (общетехнических систем).

Обобщенные показатели надежности космических аппаратов.

Основные и дополнительные показатели надежности КА.

Технико-экономическое обоснование значений показателей надежности космического комплекса и его составных частей.

Нормирование показателей надежности космического комплекса.

Нормирование показателей надежности составных частей космического комплекса.

Нормирование показателей надежности КА по изделиям аналогам.

Нормирование надежности бортовых систем КА (системный подход).

Нормирование надежности бортовых систем КА с помощью весовых коэффициентов.

Нормирование показателей надежности составных частей бортовых систем КА.

Задание требований по надежности проектируемых КА (сравнительные характеристики отечественных и зарубежных РН и КА.

Обеспечение надежности на различных этапах жизненного цикла КА.

Программа обеспечения надежности.

- анализ возможных отказов КА;

- обоснование различных видов резервирования;

Комплексная программа экспериментальной отработки.

## Программа повышения надежности

### 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Элементы теории множеств. Мощность и мера множеств.

Элементы теории вероятностей. Вероятность случайного события. Свойства случайных событий. Независимость и зависимость случайных событий. Условная вероятность. Примеры на условную вероятность.

Дискретные случайные величины. Биномиальный закон распределения. Закон распределения Пуассона. Примеры.

Непрерывные случайные величины. Функции распределения и плотности распределения. Равномерный, нормальный, экспоненциальный законы распределения. Распределение Вейбулла.

Математическое ожидание и дисперсия функции случайных величин.

Элементы математической статистики.

Задачи математической статистики.

Построение функции надежности по экспериментальным данным.

Оценка надежности элементов ЛА при нормальных законах распределения случайных величин.

Доверительные интервалы в задачах оценки надежности элементов ЛА.

Проверка статистических гипотез в задачах надежности КА.

Методы расчета показателей надежности элементов.

Надежность как вероятность случайного события.

- доверительные границы надежности;
- доверительные границы для высоконадежных элементов.

Надежность как качество, развернутое во времени.

- функция надежности;
- средняя наработка до отказа;
- интенсивность отказов;
- вывод экспоненциального закона надежности;
- планы испытания на надежность.

Надежность как вероятностная прочность.

- вычисление показателя надежности элемента при произвольных законах распределения нагрузки и прочности;
- вычисление показателя надежности элемента при нормальных законах распределения нагрузки и прочности;
- связь между показателем надежности и коэффициентом безопасности;
- форсированные испытания.

Надежность как вероятность невыброса случайного процесса за заданный уровень.

- некоторые сведения о случайной функции;
- основные понятия теории надежности В.В. Болотина;
- выбросы случайного процесса за заданный уровень.



Основные методы, используемые в теории надежности систем.

Метод структурных схем надежности:

- расчет надежности систем при последовательном соединении элементов;

- расчет надежности систем при параллельном соединении элементов;

- смешанное соединение элементов.

Вероятность безотказной работы системы по схеме "не менее  $m$  из  $n$ ".

Расчет надежности электромеханического толкателя.

Задачи и методы статистической динамики.

Основные понятия и постановка задач статистической динамики.

Методы решения задач статистической динамики. Метод статистической линеаризации.

Методы решения задач статистической динамики. Метод статистических испытаний:

- моделирование случайных величин на ЭВМ (моделирование экспоненциального, нормального, произвольного закона и моделирование дискретных законов распределения).

Оценка надежности систем безударного разделения элементов КА методом линеаризации (показать на примере).

Оценка надежности систем безударного разделения элементов КА методом статистических испытаний (блок-схемы алгоритмов на примере отделения ГЧ).

Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно сложных систем.

Некоторые сведения из математической логики.

Основные определения функций алгебры логики.

Деревья отказов (показать на примере).

Методы перехода от логических функций к вероятностным:

- на основе формулы вероятности суммы совместных событий;

- на основе приведения к СДНФ.

Метод статистического моделирования при оценке вероятности состояния логической функции.

Метод структурно-логических схем.

Анализ чувствительности ("значимости") элементов по надежности в структуре сложной системы. Расчет надежности группы резервированных элементов с переключателем на основе логико-вероятностных методов.