

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

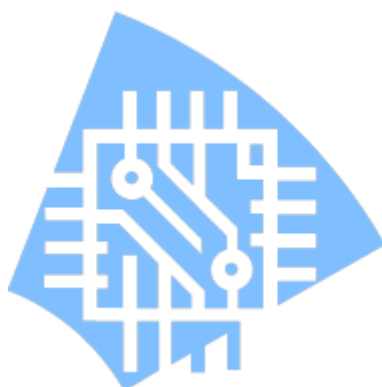
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭС,  
РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Теория точности в разработке конструкций и технологий»  
для студентов направления 11.03.03 «Конструирования и технология электронных  
средств»  
(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм  
обучения



УДК 681.3

**Составители:**

доктор. техн. наук А. В. Башкиров,  
канд. техн. наук И.С. Бобылкин.

Определение показателя надежности эс, расчет надежности сложной системы: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория точности в разработке конструкций и технологий» для студентов направления 11.03.03 «Конструирования и технология электронных средств» (профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех форм обучения/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. В. Башкиров, И.С. Бобылкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 24 с.

Методические указания содержат краткие теоретические и практические сведения о проведении испытаний на воздействие тепла, холода и механической нагрузки.

Предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Теория точности в разработке конструкций и технологий» для студентов 4 курса.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS Word 2003 и содержатся в файле LRTTI1-4.doc.  
Таб. 7 Ил. 4. Библиогр.: 10 назв.

**УДК 681.3**  
**ББК 38.54**

**Рецензент** - О. Ю. Макаров, д-р техн. наук, проф.  
кафедры конструирования и производства  
радиоаппаратуры ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## Лабораторная работа №1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА И ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭС

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** целью работы является ознакомление с методикой подбора закона распределения ресурса, приобретение практических навыков в определении параметров закона распределения и расчете показателей надежности элементов.

#### 1. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Для выполнения работы необходимо изучить теоретический материал, лекционные и приведенные ниже материалы.

Существующее рассеивание основных параметров надежности элементов определяет необходимость рассматривать их численные значения в вероятностном аспекте. Характеристикой надежности элемента является закон распределения их ресурсов. Если известен вид закона и его параметры, то легко можно определить интересующую нас характеристику надежности.

Наиболее распространенными законами распределения ресурсов элементов являются экспоненциальный и нормальный. Поэтому при определении закона распределения рекомендуется аппроксимировать экспериментальные характеристики ресурсов в первую очередь этими законами.

Экспоненциальное распределение характерно для внезапных отказов элементов. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением некоторых обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность во времени  $t$ :

$$\lambda t \quad \lambda = \frac{1}{T_p} \text{ const}, \quad (1.1)$$

где  $T_p$  - средний ресурс.

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (1.2)$$

где  $T_{p_i}$  - ресурс  $i$  однотипного элемента;  $n$  - количество однотипных элементов.

Функция плотности вероятности при экспоненциальном законе распределения задается уравнением:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (1.3)$$

а вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \exp \int_0^t -\lambda dt = e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

Установленный ресурс  $T_{пу}$  элемента при экспоненциальном законе распределения и доверительной вероятности  $=0,95$ :

$$T_{пу} = \frac{0,05}{\lambda} = 0,05 T_p \quad (1.5)$$

Нормальный закон распределения достаточно хорошо описывает распределение ресурсов элементов при постепенных (износных) отказах. Плотность вероятности нормального распределения описывается уравнением:

$$f(t) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t - T_p}{S}^2} \quad (1.6)$$

где средний ресурс  $T_p$  определяется по выражению (2), а среднее квадратическое отклонение  $S$  по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n T_{pi}^2 - n T_p^2}{n - 1}} \quad (1.7)$$

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  для нормального закона распределения определяется из выражения:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{t - T_p}{S}\right) \quad (1.8)$$

где  $\Phi$  - функция Лапласа;

$U_p$  - квантиль нормального распределения.

Установленный ресурс элемента  $T_{py}$  при, нормальном законе распределения и доверительной вероятности  $=0,95$ :

$$T_{py} = T_p + 1,645 S \quad (1.9)$$

Проверка допустимости принятого закона распределения ресурсов элемента осуществляется по критерию согласия. Наиболее употребительным критерием является критерий  $\chi^2$  Пирсона.

Расчетное значение критерия Пирсона определяется по формуле:

$$\chi_p^2 = \sum_{j=1}^k \frac{m_j - n p_j}{n p_j}^2 \quad (1.10)$$

где  $m_j$  - количество значений ресурса, попавших в  $j$  интервал;

$p_j$  - вероятность попадания значений ресурса в  $j$  интервал;

$n$  - общее число значений ресурса.

Полученное расчетное значение  $\chi_p^2$  сопоставляют с табличным  $\chi_{\tau}^2$  (приложение Б), определяемом по числу степеней свободы  $K$ , и уровням значимости  $E$ .

Если  $\chi_p^2 < \chi_{\tau}^2$ , то гипотеза о принятом законе распределения ресурсов верна. В противном случае следует принимать гипотезу о другом законе распределения и выполнить необходимые расчеты.

Определение закона распределения ресурса и расчет показателей надежности элемента может быть выполнен на ЭВМ по программе, блок-схема которой представлена на рис.1. В блок 1 с клавиатуры вводятся численные значения ресурса однотипного элемента и число интервалов, на которые разбивается гистограмма в блоке 2. По виду гис-

тограммы можно предварительно оценить вид закона распределения. По исходным данным в блоках 3, 4 рассчитываются такие показатели, как средние и установленные ресурсы, критерий  $\chi^2_p$  Пирсона для каждого закона распределения соответственно. Кроме того, в блоке 3 рассчитывается интенсивность отказов для экспоненциального закона, в блоке 4 - среднеквадратическое отклонение ресурса для нормального закона.

Вывод данных расчета по каждому закону обеспечивается блоками 5, 6, после чего в блоке 7 выбирается теоретически закон распределения по критерию  $\chi^2_p$  и на дисплей выводится название рекомендуемого закона (блок 8).

## 2. ПОРЯДОК И ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В соответствии с вариантом индивидуального задания (таблица1) выбирает исходные данные в виде ряда численных значений ресурсов однотипных элементов в порядке возрастания ресурса:  $T_p = 80, 140, 180, 220, 260, 290, 320, 380, 460, 520, 700, 900$ .

Задаёт число интервалов ( $K=5$ ) и величину интервала ( $W=200$  час)

Определяет границы интервалов, средние значения ресурса на интервале и количество значений ресурсов, попавшие в каждый интервал. Результаты представляют в табличной форме. Для нашего случая составлена табл. 2.

Таблица 1

Исходные данные для определения закона распределения ресурсов и показателей надежности элемента машин

Вариант	Значения ресурсов однотипных элементов											
1	120	180	200	260	290	340	410	490	530	610	650	690
2	50	100	140	190	280	370	450	510	630	770	860	900
3	800	880	960	1050	1090	1130	1280	1390	1520	1740	1840	2000
4	400	570	690	850	970	1140	1250	1380	1410	1520	1530	1600
5	1030	1080	1170	1240	1270	1420	1610	1720	1810	1900	1980	2000
6	250	380	490	560	680	800	880	930	1000	1250	1500	1600
7	500	510	580	600	650	700	740	780	820	840	860	900
8	200	240	300	320	380	400	480	590	710	880	920	980
9	600	680	750	810	900	980	1100	1180	1250	1340	1410	1500
10	100	170	280	430	600	700	820	900	950	1100	1200	1350
11	20	40	80	150	190	210	280	360	480	550	600	700
12	300	380	410	500	570	620	700	750	810	880	920	1000
13	300	380	410	500	570	620	700	750	810	880	920	1000
14	200	220	280	300	380	450	500	600	750	800	880	950
15	500	570	630	710	760	840	910	1000	1080	1150	1200	1300

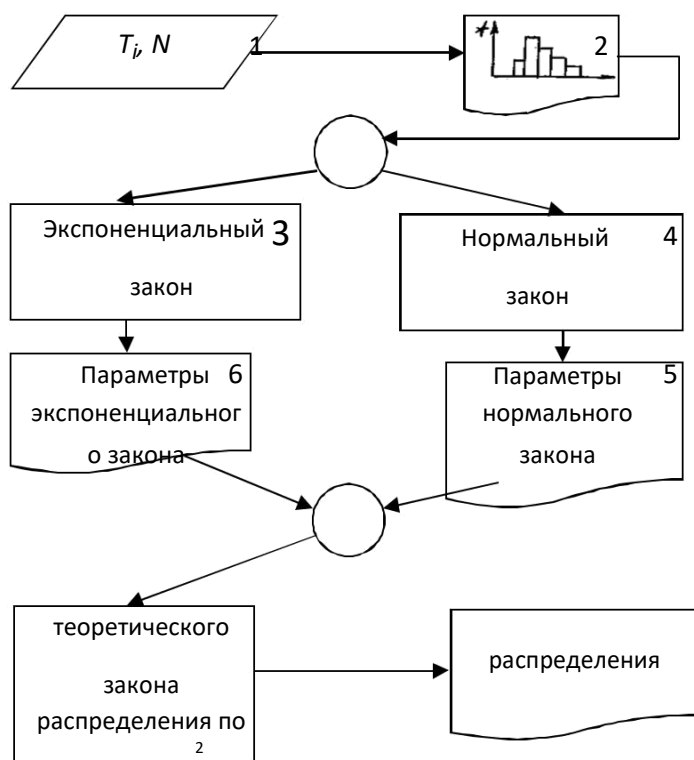


Рис.1. Алгоритм выбора теоретического закона распределения

Таблица 2

Результаты

№ интервала	Границы интервала	средние значения на интервале	Количество значений $m_j$
1	0 - 200	100	3
2	200 - 400	300	5
3	400 - 600	500	2
4	600 - 800	700	1
5	800 - 1000	900	1

По числу значений ресурсов, попавших в каждый  $j$  интервал, можно предварительно оценить вид закона распределения и выполнить проверку в первую очередь именно по этому закону.

Например, проверка гипотезу о экспоненциальное законе распределения ресурсов выполняется в следующей последовательности.

Средний ресурс (18):

$$T_p = (80 + 140 + \dots + 900)/12 = 370,83 \quad (1.11)$$

Интенсивность отказов (17):

$$= 1/T_p = 1/370,83 = 2,696 \cdot 10^{-3}.$$

Теоретическая вероятность  $p_j$  (20) попадания в каждый из 5 интервалов:

$$1) P_1 = \exp(0) - \exp(-200) = 1 - 0,583 = 0,417 \quad 2) P_2 = \exp(-200) - \exp(-400) = 0,583 - 0,340 = 0,243 \quad (1.12)$$

$$3) P_3 = \exp(-400) - \exp(-600) = 0,340 - 0,198 = 0,142$$

$$4) P_2 = \exp(-600) - \exp(-800) = 0,198 - 0,116 = 0,082$$

$$5) P_2 = \exp(-800) - \exp(-1000) = 0,116 - 0,067 = 0,049$$

Для рассматриваемого в примере случая расчетное значение критерия Пирсона:

$$\chi_p^2 = \frac{3 \cdot 12 \cdot 0,417^2}{12 \cdot 0,417} + \frac{5 \cdot 12 \cdot 0,243^2}{12 \cdot 0,243} + \frac{2 \cdot 12 \cdot 0,142^2}{12 \cdot 0,142} + \frac{1 \cdot 12 \cdot 0,082^2}{12 \cdot 0,082} + \frac{1 \cdot 12 \cdot 0,049^2}{12 \cdot 0,049} = 2,63 \quad (1.13)$$

Поскольку  $\chi_p^2 = 2,63$  меньше  $\chi_{\tau}^2 = 26,2$ , определенном при числе степеней свободы  $K = 12$  и уровне значимости  $E = 0,01$ , гипотеза о экспоненциальном законе распределения получает подтверждение. В ином случае принимаем гипотезы о нормальном распределении.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  в зависимости от закона распределения определяется из соотношений (20), (24). При этом значения наработок  $t$  задаются произвольно с некоторым шагом.

Результаты расчетов представляет в виде графиков зависимостей  $P(t)$  (рисунок 2 а, б).

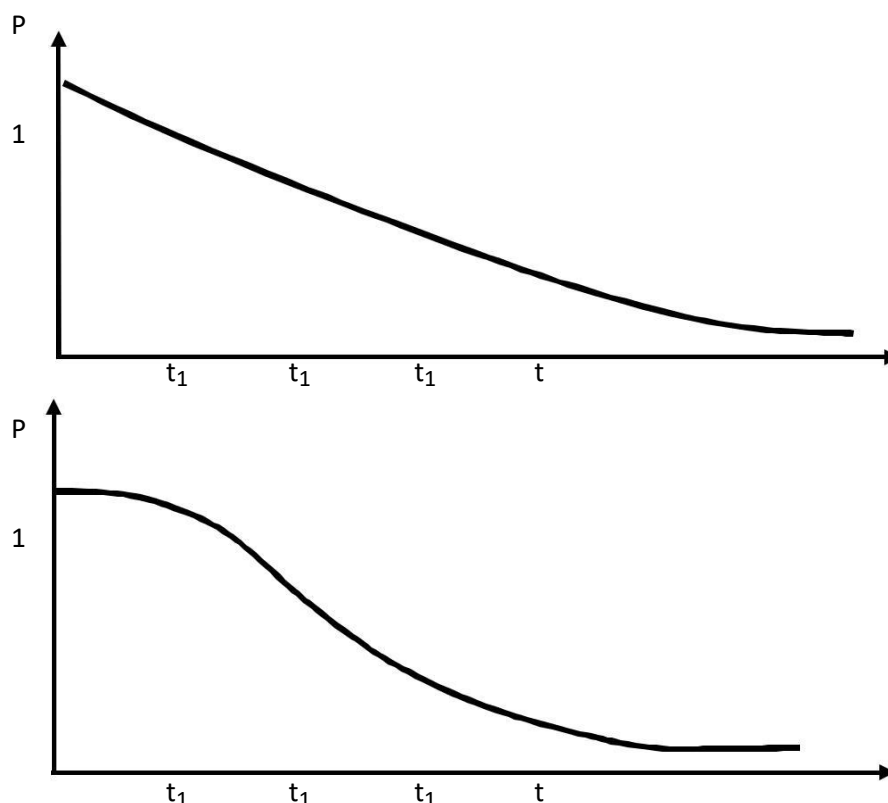


Рис.2. Изменение вероятности безотказной работы  $P$  от наработки  $t$ : а - экспоненциальное распределение; б - нормальное распределение

### **3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

- 1) Название и цель работы.
- 2) Порядок определения закона распределения ресурса и расчета показателей надежности элемента.
- 3) Установленный по индивидуальному заданию закон распределения ресурса и расчет показателей надежности элемента. График зависимости  $P = f(t)$ .
- 4) Определение закона распределения ресурса на ЭВМ сравнение получение результатов.

#### **Контрольные вопросы**

- 1) Что понимается под элементом сложной системы?
- 2) Какие законы распределения ресурса Вы знаете?
- 3) Сформулируйте понятие среднего ресурса, установленного ресурса, вероятности безотказной работы.



## Лабораторная работа №2

### РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: Освоение методики и приобретение практических навыков в расчетах схемной надёжности сложной системы с последовательно-параллельным соединением элементов по данным о законах и параметрах распределения ресурса отдельных элементов.

#### 1. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Для выполнения работы необходимо изучить теоретический материал [1], лекционный и приведенный ниже материалы;

- методы повышения надёжности, резервирование [1, 3, 4].

Задача расчёта надёжности сложной системы решается, исходя из следующих предпосылок: система состоит из элементов, различно соединённых, последовательно или параллельно. Известны законы распределения ресурса и его параметры для каждого элемента (табл. 3). Структурные схемы сложной системы заданы в виде структурной формулы (табл. 4).

Вероятность безотказной работы группы элементов с последовательным соединением элементов:

$$P_{\text{сист}}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) \quad (2.1)$$

Вероятность безотказной работы группы элементов с параллельным соединением

$$P_i^{\Gamma}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \quad (2.2)$$

Выполнять расчёт надёжности сложной системы необходимо в следующей последовательности:

- 1) В соответствии с вариантом индивидуального задания по структурной формуле построить структурную схему системы;
- 2) По заданным параметрам законов распределения определить вероятность безотказной работы  $P_i(t)$  для каждого  $i$  элемента системы;
- 3) Определить вероятность безотказной работы  $P_i^{\Gamma}(t)$  группы элементов;
- 4) Рассчитать вероятность безотказной работы  $P_{\text{сист}}(t)$  системы элементов как произведение вероятностей безотказной работы последовательно соединённых элементов и групп элементов;
- 5) Определить метод повышения надёжности системы.

Таблица 3

Исходные данные для расчёта надёжности

№ элемента	Закон распределения	Tr	S	a	b
1	Э	800	-	-	-
2	Н	1200	400	-	-
3	В	-	-	700	2,5
4	Э	400	-	-	-
5	В	-	-	500	1,5
6	Н	1000	350	-	-
7	Н	2000	400	-	-

Продолжение табл. 3

8	Э	1100	-	-	-
9	В	-	-	680	2,0
10	Э	700	-	-	-
11	Н	1200	300	-	-
12	В	-	-	300	1,5
13	Э	440	-	-	-
14	Э	500	-	-	-
15	Н	600	200	-	-
16	В	-	-	550	1,5
17	Э	750	-	-	-
18	Н	1400	350	-	-
19	В	-	-	1000	3,0
20	Н	1500	440	-	-
21	В	-	-	800	2,0
22	Э	600	-	-	-
23	Э	850	-	-	-
24	Н	1800	200	-	-
25	В	-	-	780	1,8
26	В	-	-	640	2,0
27	Н	1700	400	-	-
28	Э	900	-	-	-
29	Э	650	-	-	-
30	Н	900	200	-	-
31	Н	1100	2500	-	-
32	В	-	-	550	2,0
33	Э	950	-	-	-
34	Н	800	240	-	-
35	В	-	-	750	1,7
36	Э	1000	-	-	-
37	Н	2200	350	-	-
38	Н	2000	300	-	-
39	В	-	-	400	1,6
40	Э	540	-	-	-
Примечание: Тр - средний ресурс, S - среднее квадратическое отклонение, а - параметр масштаба, b - параметр формы, Э - экспоненциальный закон распределения, Н - нормальный закон распределения, В - закон Вейбулла.					

Таблица 4

Структурные формулы соединения элементов

Варианты задания	Структурные формулы соединения элементов
1	1-(6-16)/(6-16)-23-30/30-9-10
2	2-12/12/12-15-(29-40)-(29-40)-14-37
3	3-13/13-37/37-11-(22-10)/(22-10)-5
4	4-(9-15)/(9-15)-20-36/36/36-13-2
5	5-7/7/7-17-38/38-33-12-23/23-1
6	8-(14-24)/(14-24)-26-31/31-9-5
7	10-18/18-19-33/33/33-27-29-3
8	13-(21-28)/(21-28)-34-38/38/38-4

9	25-13/13-7-(15-29)/(15-29)7-40
10	12-11/11/11-33-(15-28)/(15-28)-14-5
11	17-(26-30)/(26-30)-14-38/38/38-9
12	15-29/29-3-6/6-14-(17-7)/(17-7)
13	29-26/26/26-2-16/16-33-10/10/10
14	14-(20-12)/(20-12)-33-37/37-8-40
15	40-21/21-38-29/29/29-6-(14-2)/(14-2)
16	9-(18-15)/(18-15)-17-10/10/10-15
17	31-(9-23)/(9-23)-31-8/8/8-12-5
18	36-26/26/26-11-21/21-2-13/13-1
19	7-(24-12)/(24-12)-25-17/17/17-10-39
20	26-1/1/1-14-5/5-37-6-17/17
21	20-40/40-8-(16-27)/(16-27)-10-2
22	30-(13-26)/(13-26)-15-7/7/7-8-10
23	24-12/12/12-4-(33-18)/(33-18)-3
24	11-29/29-12-33/33/33-15-26
25	9-(7-35)/(7-35)-20-33/33-8

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) Название и цель работы.
- 2) Структурная схема системы в соответствии с индивидуальным заданием.
- 3) Расчет вероятности безотказной работы каждого элемента, группы элементов и всей системы.
- 4) Выводы по работе.

#### Контрольные вопросы

- 1) Сформулируйте понятие модели безотказности сложной системы.
- 2) Дайте определение вероятности безотказной работы.
- 3) Какие показатели безотказности Вы знаете?
- 4) Сформулируйте предложения по повышению надежности рассмотренной в работе системе.

## Лабораторная работа №3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Цель работы: целью работы является освоение методики и приобретение практических навыков в расчете схемной надежности сложного изделия с параллельно-последовательным соединением элементов, повышении надежности изделия путем резервирования элементов с оценкой эффективности резервирования.

#### 1. Указания по выполнению работы

Для выполнения работы необходимо изучить теоретический материал [1, стр.93-100; 5, стр. 63-71] и приведенные выше материалы.

Определение надежности сложной системы выполняется в следующей последовательности.

1) В соответствии с вариантом индивидуального задания по таблицам 8 и 9 определить исходные данные для расчета - структурную формулу системы, среднюю наработку на отказ  $T_i$  и математическое ожидание времени ремонта  $M_i$  ( $\mu_{рем}$ ) для каждого  $i$  элемента системы, закон распределения вероятности безотказной работы принять экспоненциальным  $P t e^{-\lambda t}$ , заданный период времени эксплуатации принять постоянным  $t = 8$  час.

2) По структурной формуле построить структурную схему системы с параллельно-последовательным соединением элементов.

3) По известным из условия значениям наработки на отказ  $T_i$  и периоду эксплуатации  $t$  рассчитать интенсивность отказов  $\lambda = T_i^{-1}$  и вероятность безотказной работы  $P_i(t)$  для каждого  $i$  элемента системы.

4) Определить вероятность безотказной работы  $P_i^{\Gamma}(t)$  групп элементов с постоянным резервированием.

5) Рассчитать вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы элементов как произведение вероятностей безотказной работы последовательно соединенных элементов и групп элементов.

6) Выявить элемент, лимитирующий надежность системы.

7) Рассчитать вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы элементов при постоянном (нагруженном) резервировании ненадежного элемента.

8) Рассчитать вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы элементов при ненагруженном резервировании ненадежного элемента.

9) Сопоставить полученные результаты расчета и сформулировать выводы по работе.

Расчет может быть выполнен по программе, блок-схема которой представлена на рис. 3. В блок 1 с клавиатуры вводится формула структурной схемы  $S_i$  (исходные данные по варианту табл.1) и период времени эксплуатации  $t$ . В этом же блоке находится массив данных, дублирующих табл. 2, из которого извлекаются данные о средней наработке на отказ  $T_i$  и математическое ожидание времени ремонта  $M_i$  для каждого элемента структурной формулы.

В блоке 2 по средней наработке на отказ рассчитывается интенсивность отказов для каждого элемента системы, блок 3 вычисляет вероятность безотказной работы за время эксплуатации  $t = 8$  час. После этого рассчитывается вероятность безотказной работы групп элементов с постоянным резервированием (блок 4) и всей системы (блок 5). Процесс вычисления итеративный, при этом число итераций равно числу элементов  $i$  системы (блок 6); условием окончания является перебор всех элементов (блок 7).

В блоке 8 запрашивается номер резервируемого элемента с наименьшей вероятностью безотказной работы и далее вычисляются вероятности безотказной работы системы при постоянном (ненагруженном) резервировании (блок 9) и дублировании с восстановлением (блок 10). Вывод результатов расчета осуществляется блоком 11.

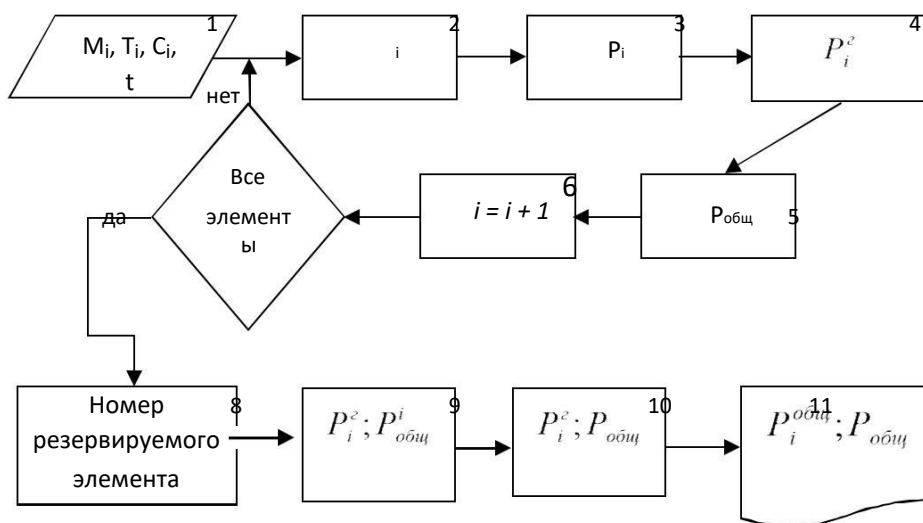


Рис.3. Схема алгоритма расчета надежности сложных систем

## 2. Пример определения надежности сложной системы

Варианты индивидуальных заданий включают структурные формулы сложных систем (табл. 5) и данные по средней наработке на отказ  $T_i$  и среднему времени восстановления работоспособности  $M_i$  ( $\tau_{рем}$ ) элементов систем при ремонте (табл. 6).

Предположим, формула структурной схемы системы:

$$19/19/19-14-38/38-59-44-60. \quad (3.1)$$

Средняя наработка элементов на отказ  $T_i$ , час:

$$T_{19} = 16; T_{14} = 21; T_{38} = 72; T_{59} = 220; T_{44} = 450; T_{60} = 860. \quad (3.2)$$

Заданный период времени эксплуатации  $t = 8$  час (во всех вариантах).

Закон распределения вероятности безотказной работы - экспоненциальный -  $P_t = e^{-\lambda t}$ .

Таблица 5

Формулы структурных схем для расчета надежности сложных систем

Вариант задания	Формулы структурных схем сложных систем
1	1/1/1-25-36/36-51-58-34/34
2	48-57-7/7/7-28-31/31/44
3	30/30-10/10/10-50-23/23-45-6
4	24/24-2/2/2-4-54-56-49
5	3/3-26-32/32-35/35-60-49
6	59-37/37-38/38-14/14/14-12-48

7	57-38/38-9/9/9-6-47-43
8	46-48-29/29-8-51-3/3/3
9	35/35-15/15-45-5-30-45
10	21/21-15/15/15-55-17-56-60
11	59-58-35/35-29/29-5/5/5-11
12	46-13/13/13-42-6-41/41-43
13	47-43/43-11-15/15/15-39/39-56
14	18/18-16-29/29-49-19/19/19-60
15	19/19/19-8-20/20-54-43-23/23
16	41-42-31/31-10/10/10-4-52
17	55-48-33/33-2-9/9/9-58
18	47-26/26-6/6/6-14-33/33-57
19	1-5/5/5-27/27-54-41-38/38
20	48-50/50-31/31-12/12/12-10-55

Таблица 6

## Исходные данные для расчета надежности по элементам систем

Номер элемента	$T_i$ , час	$M_i$ , (рем), час	Номер элемента	$T_i$ , час	$M_i$ , (рем), час
1	18	0,2	31	65	1,0
2	24	0,3	32	75	1,1
3	23	0,4	33	85	1,2
4	17	0,5	34	62	1,3
5	19	0,6	35	54	1,4
6	22	0,7	36	58	1,5
7	26	0,8	37	96	1,6
8	30	0,9	38	72	1,7
9	28	0,8	39	78	1,8
10	29	0,7	40	110	1,9
11	34	0,6	41	300	2,0
12	32	0,4	42	600	3,1
13	19	0,5	43	400	2,2
14	21	0,3	44	450	2,3
15	27	0,2	45	550	2,4
16	36	0,3	46	500	2,5
17	33	0,4	47	850	2,6
18	19	0,5	48	620	2,7
19	16	0,6	49	580	2,8
20	18	0,7	50	540	2,9
21	40	2,0	51	330	2,0
22	45	2,1	52	280	2,1
23	48	1,2	53	580	2,2
24	52	1,3	54	470	2,3
25	50	1,4	55	420	2,4
26	100	1,5	56	670	2,5
27	90	1,6	57	720	2,6
28	80	1,7	58	760	2,7
29	70	1,8	59	220	2,8
30	60	1,9	60	860	2,9

1) По приведенной формуле строим структурную схему системы элементов (рис. 4 а).

2) По средней наработке на отказ  $T_i$  рассчитываем интенсивность отказов  $\lambda_i$  для каждого элемента системы:

$$\begin{aligned} \lambda_{19} &= (T_{19})^{-1} = 0.0625; & \lambda_{59} &= (T_{59})^{-1} = 0.0045; & \lambda_{14} &= (T_{14})^{-1} = 0.0476; \\ \lambda_{44} &= (T_{44})^{-1} = 0.0022; & \lambda_{38} &= (T_{38})^{-1} = 0.0139; & \lambda_{60} &= (T_{60})^{-1} = 0.0012. \end{aligned} \quad (3.3)$$

3) Рассчитываем вероятность безотказной работы  $P_i(t)$  для каждого элемента системы при наработке  $t = 8$  час:

$$\begin{aligned} P_{19} &= e^{-\lambda_{19} t} = e^{-0.0625 \cdot 8} = 0.6065; \\ P_{59}(8) &= 0.9646; \\ P_{14}(8) &= 0.6833; \\ P_{44}(8) &= 0.9826; \\ P_{38}(8) &= 0.8948; \\ P_{60}(8) &= 0.9904. \end{aligned} \quad (3.4)$$

4) Определяем вероятность безотказной работы  $P^2(t)$  групп элементов с постоянным резервированием:

$$\begin{aligned} P_{19}^1 &= 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_{19}) = 1 - 0.0609 = 0.9391; \\ P_{38}^1 &= 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_{38}) = 1 - 0.0111 = 0.9889. \end{aligned} \quad (3.5)$$

5) Рассчитываем вероятность безотказной работы  $P(t)$  системы как произведение вероятностей безотказной работы последовательно соединенных элементов и групп элементов (рис. 4 б):

$$\begin{aligned} P(8) &= P_{19}^1 \cdot P_{14} \cdot P_{38}^1 \cdot P_{59} \cdot P_{44} \cdot P_{60} = 0.9391 \cdot 0.6833 \cdot 0.9889 \cdot 0.9646 \cdot 0.9826 \cdot 0.9904 \\ &= 0.5957 \quad (3.6) \end{aligned}$$

Очевидно, что надежность системы невысока и повысить ее можно за счет дублирования элемента 14.

6) При постоянном (нагруженном) резервировании элемента 14 вторым однотипным элементом, присоединенным параллельно (рис. 4 в), вероятность безотказной работы  $P_{14}^2$  группы элементов 14 составит:

$$P_{14}^2 = 1 - (1 - P_{14})^2 = 1 - (1 - 0.6833)^2 = 0.8997 \quad (3.7)$$

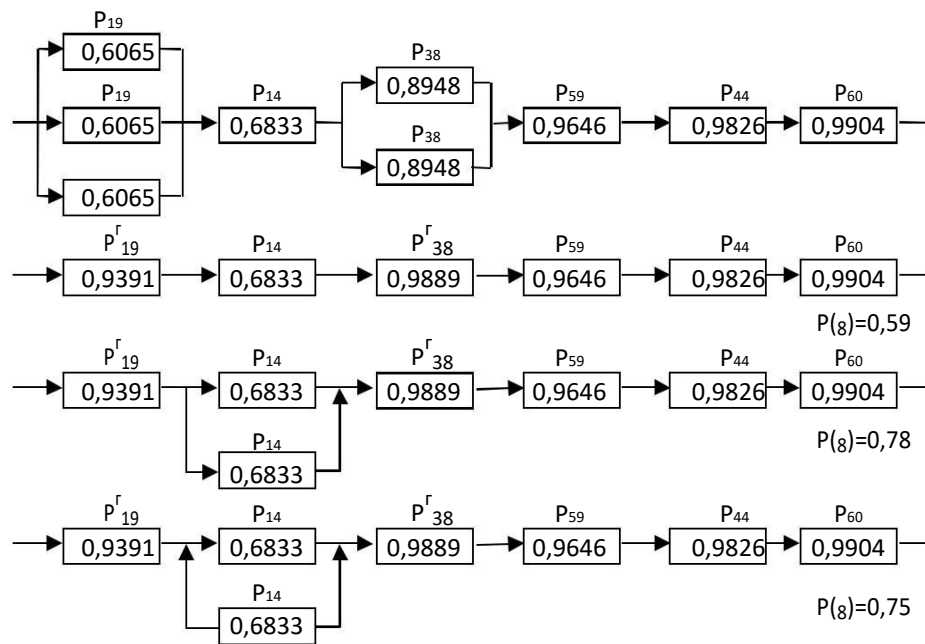


Рис.4. Пример расчета сложной системы с резервированием

7) При использовании ненагруженного резервного элемента 14 (дублирование с восстановлением) (рис.4г) вероятность безотказной работы группы элементов 14 определяется из соотношений:

$$\begin{aligned}
 & \alpha \lambda_{14} M_{14} \quad 0,04760,3 \quad 0,0143 \\
 T_0 & \frac{1}{\kappa} \frac{0,5}{14} \frac{1}{\lambda_{14} \alpha} \frac{0,5}{0,0476 \quad 0,0476 \quad 0,0143} 56 \quad (3.8) \\
 P_{14}^r (8) & e^{-T_0} e^{-\frac{8}{56}} \quad 0,8669
 \end{aligned}$$

$P(t)$  системы в этом случае составит 0,7556.

### 3. Содержание отчета

- 1) Название и цель работы.
- 2) Структурная схема системы элементов в соответствии с индивидуальным заданием.
- 3) Расчет вероятностей безотказной работы системы элементов при нагруженном и ненагруженном резервировании.
- 4) Выводы по работе.



## Контрольные вопросы

1) Дать определение надежности и ее свойств: безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

2) Какие показатели характеризуют надежность изделия и его элементов.

3) Что понимается под сложной системой элементов и элементом системы?

Привести примеры.

4) Как построить структурную схему сложной системы с учетом особенностей отказов ее элементов?

5) Что понимается под вероятностью безотказной работы системы и элемента?

6) В чем заключается сущность постоянного и ненагруженного резервирования?

Преимущества и недостатки.

7) В каких случаях ненагруженное резервирование становится эффективным?

## Лабораторная работа №4

### РАСЧЕТ МОДЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Цель работы: Освоение методики и приобретение практических навыков в расчете Модели безотказности сложной системы с последовательным соединением элементов и составлении дифференцированного плана ремонтно-профилактических мероприятий, уточнение комплекта запасных частей.

#### 1. Указания по выполнению работы

Перед выполнением работы по расчету модели безотказности сложной системы необходимо изучить по материалам лекций курса «Основы теории надежности», учебной и научно-технической литературе следующие темы: безотказность как свойство надежности; показатели безотказности; модель безотказности [1, стр.13-17, 103-108].

Задача расчета модели безотказности сложной системы решается исходя из следующих предпосылок:

модель безотказности показывает характер изменения вероятности безотказной работы сложной системы машины;

система состоит из последовательно соединенных  $n$  элементов, ресурс каждого описывает один из трех законов распределения - экспоненциальный, нормальный, Вейбулла;

вероятность безотказной работы системы определяется по произведению вероятностей безотказной работы элементов (16);

в начале эксплуатации вероятность безотказной работы системы близка к 1 [ $P_c(t) = 1, t = 0$ ], затем ее значение снижается до предельного. Отказы деревообрабатывающего оборудования обычно не приводят к ситуациям, опасным для жизни людей, поэтому нет смысла назначать высокий уровень безотказности. Обычно для механических систем технологического оборудования принимают величину  $P_{c_{\min}}(t) = 0,5 \dots 0,8$ .

Рассмотрим последовательность расчета модели безотказности сложной системы на ЭВМ.

Принято допущение о том, что вероятность безотказной работы элементов системы определяется одним из трех законов распределения: экспоненциальным, нормальным или законом Вейбулла, параметры которых вводятся с клавиатуры при расчете модели безотказности системы для каждого элемента (блок 1, рис. 5).

При экспоненциальном законе распределения необходимо знать средний ресурс  $T_r$ , при нормальном - средний ресурс  $T_r$  и его среднеквадратическое отклонение  $S$ , при законе Вейбулла - параметры формы  $A$  и масштаба  $B$ .

Кроме того, необходимо ввести с клавиатуры число элементов в системе  $n$  ( $n = 5$ ) и продолжительность эксплуатации в часах  $T$  ( $T = 4500$  часов).

Далее рассчитывается вероятность безотказной работы каждого элемента (блок 3) при начале эксплуатации  $t = 0$  (блок 2); при этом учитывается закон распределения каждого из элементов.

Так как система последовательная, но расчет ее вероятности безотказной работы  $P_c(t)$  в текущее время расчета выполняется в блоке 4 по соотношению (16).

Если выполняется логическое условие (блок 5) на печать выводятся значение вероятностей безотказной работы системы и всех ее элементов (блок 7). При выполнении логического условия в блоке 6 отыскивается элемент системы с наименьшим уровнем вероятности безотказной работы и «восстанавливается», т.е. его вероятность безотказной работы повышается до 1 и вновь производится расчет надежности системы в блоке 4.

После того, как текущее время программы превысит заданную продолжительность эксплуатации (блок 8) расчет оканчивается и выводится график, на котором представлена

зависимость вероятности безотказной работы системы от времени эксплуатации с шагом квантования = 50 часов.

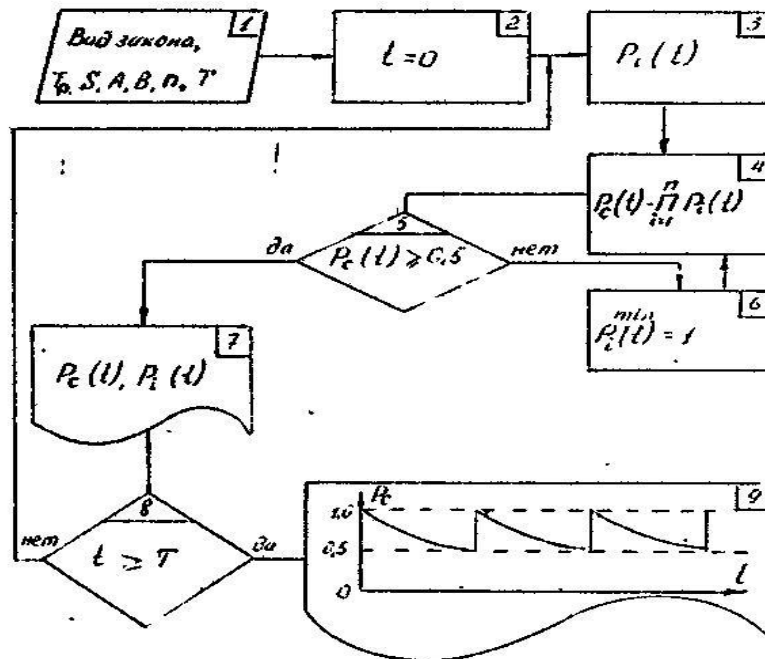


Рис.5. Алгоритм расчета модели безотказности

Порядок и пример расчета надежности сложной системы:

Исходные данные по варианту (табл. 5, 6). Формула структурной схемы системы: 3 - 17 - 22 - 28 - 40.

1) Задаемся периодом времени, на котором рассматривается надежность сложной системы;

$$0 < T < 5000 \text{ (ч.)}$$

2) Принимаем временной интервал  $T = 50$  ч.

Таблица 7

Законы и параметры законов распределения вероятности безотказной работы элементов

№ элемента	Законы распределения			Параметры законов распределения			
	Экспон.	Норм.	Вейбула	$T_p$	S	A	B
3	Э	-	-	3000	-	-	-
17	-	Н	-	4000	1250	-	-
22	-	-	В	-	-	5000	3
28	Э	-	-	2600	-	-	-
40	-	Н	-	3500	560	-	-

3) Рассчитываем вероятность безотказной работы для элементов в порядке возрастания номера:

$$\text{№3} \quad P_3 t e^{-t/3000}; \tag{4.1}$$

$$\text{№17} \quad P_{17} t \Phi \left( \frac{4000 t}{1250} \right); \tag{4.2}$$

$$\text{№22} \quad P_{22} t e^{-t/5000} ; \quad (4.3)$$

$$\text{№28} \quad P_{28} t e^{-t/2600} ; \quad (4.4)$$

$$\text{№40} \quad P_{40} t \Phi \frac{3500 t}{560} ; \quad (4.5)$$

при  $t = 0, 150, 300, \dots, 4500$

4) Результаты расчетов распечатываются в колонки 1-5 табл. 8. Рассчитываем вероятность безотказной работы сложной системы с последовательными соединениями элементов как произведение вероятностей безотказной работы отдельных элементов. Результаты расчета распечатываются в колонке «ОБЩ.ВЕР.»

5) По данным табл. 8 строим графики-функции для каждого  $i$ -го элемента и для системы  $P_c(t)$ .

б) Определяем элемент (элементы) лимитирующие надежность машины

Элемент №3 – ремонт при 2100 ч, 4200 ч., необходимо два запасных элемента №3 на весь срок службы;

Элемент № 17 – ремонт при 4050 ч, необходим один запасной элемент №17 на весь срок службы;

Элемент и 22 – ремонт не требуется;

Элемент № 28 – ремонт при 1950 ч, 3750 ч, необходимо два запасных элемента № 28 на весь срок службы;

Элемент № 40 – ремонт при 3600 ч, необходим один запасной элемент № 40.

Таблица 8

Пример распечатки результатов расчета модели безотказности сложной системы

1-ый элемент, закон - экспонента	$t = 3000$					
2-ый элемент, закон - нормальный	$t = 4000 \quad S = 1250$					
3-ый элемент, закон - Вейбулла	$A = 5000 \quad B = 3$					
4-ый элемент, закон - экспонента	$t = 2600$					
5-ый элемент, закон - Нормальный	$t = 3500 \quad B = 560$					
$T_0 = 0$	ОБЩ.ВЕР. = 0,9986	1,0000	0,9986	1,0000	1,0000	1,0000
$T_0 = 150$	ОБЩ.ВЕР. = 0,8966	0,9512	0,9986	1,0000	0,9239	1,0000
$T_0 = 300$	ОБЩ.ВЕР. = 0,8012	0,9048	0,9938	1,0000	0,8718	1,0000
$T_0 = 450$	ОБЩ.ВЕР. = 0,7194	0,3507	0,9938	1,0000	0,8411	1,0000
$T_0 = 600$	ОБЩ.ВЕР. = 0,6460	0,8187	0,9938	1,0000	0,6919	1,0000
$T_0 = 750$	ОБЩ.ВЕР. = 0,5800	0,7788	0,9938	1,0000	0,7494	1,0000
$T_0 = 900$	ОБЩ.ВЕР. = 0,5185	0,7408	0,9893	1,0000	0,7074	1,0000
$T_0 = 1050$	ОБЩ.ВЕР. = 0,4655	0,7047	0,9895	1,0000	0,6677	1,0000
$T_0 = 1200$	ОБЩ.ВЕР. = 0,4149	0,6703	0,9821	1,0000	0,6303	1,0000
$T_0 = 1350$	ОБЩ.ВЕР. = 0,3725	0,6376	0,9821	1,0000	0,5950	0,9999
$T_0 = 1500$	ОБЩ.ВЕР. = 0,5504	0,6065	0,9700	1,0000	0,5616	0,9999
$T_0 = 1650$	ОБЩ.ВЕР. = 0,2945	0,5770	0,9641	1,0000	0,5301	0,9986
$T_0 = 1800$	ОБЩ.ВЕР. = 0,2620	0,5488	0,9554	0,9999	0,5004	0,9986
$T_0 = 1950$	ОБЩ.ВЕР. = 0,4631	0,5220	0,9452	0,9998	0,9446	0,9938

T0 = 2100 ОБЩ.ВЕР. = 0,8171	0,9930	0,9332	0,9996	0,8916	0,9893
T0 = 2250 ОБЩ.ВЕР. = 0,7047	0,9446	0,9032	0,9992	0,8417	0,9821
T0 = 2400 ОБЩ.ВЕР. = 0,6119	0,8983	0,8849	0,9386	0,7445	0,9700
T0 = 2550 ОБЩ.ВЕР. = 0,5224	0,8547	0,8643	0,9977	0,7499	0,9452
T0 = 2700 ОБЩ.ВЕР. = 0,4433	0,8130	0,6413	0,9961	0,7479	0,9192
T0 = 2850 ОБЩ.ВЕР. = 0,3621	0,7734	0,8159	0,9937	0,6632	0,8643
T0 = 3000 ОБЩ.ВЕР. = 0,2853	0,7357	0,7881	0,9900	0,6308	0,7881
T0 = 3150 ОБЩ.ВЕР. = 0,2160	0,6998	0,7257	0,9845	0,5954	0,7257
T0 = 5300 ОБЩ.ВЕР. = 0,1561	0,6656	0,6915	0,9765	0,6620	0,6179
T0 = 3450 ОБЩ.ВЕР. = 0,1062	0,6332	0,6554	0,9652	0,5305	0,5000
T0 = 3600 ОБЩ.ВЕР. = 0,1769	0,6023	0,6179	0,9493	0,5008	1,0000
T0 = 3750 ОБЩ.ВЕР. = 0,2910	0,5729	0,5793	0,9277	0,9452	1,0000
T0 = 3900 ОБЩ.ВЕР. = 0,2185	0,5450	0,5000	0,8986	0,8925	1,0000

## 2. Содержание отчета

- 1) Название и цель работы.
- 2) Структурная схема системы в соответствии с индивидуальным заданием.
- 3) Расчет вероятности безотказной работы элементов при различных значениях времени.
- 4) Распечатка таблицы значений  $P(t)$
- 5) Графики  $P(t)$  для каждого элемента и всей системы.
- 6) Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

- 1) Сформулируйте понятие модели безотказности сложной системы.
- 2) Дайте определение вероятности безотказной работы.
- 3) Какие показатели безотказности Вы знаете?
- 4) Сформулируйте предложения по графику ремонта.
- 5) Сформулируйте предложения по повышению надежности рассмотренной в работе системе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глудкин О.П. Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС [Текст]/ О.П. Глудкин – М.: Высш. школа., 2001 – 335 с
2. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование[Текст]/ под ред. А.И.Коробова. Радио и связь, 2002 – 272 с.
3. Испытание аппаратуры и средства измерений на воздействие внешних факторов [Текст]: В.Д. Млицкий , В.Х. Беглария , Л.Г. Дубицкий М.: Машиностроение, 2003 – 567 с
4. Малинский В. Д. Контроль и испытания радиоаппаратуры [Текст]: В.Д. Малинский М.: Энергия, 1970. 336 с.
5. Заездный. А.М. Основы расчетов по статической радиотехнике [Текст]: А.М. Заездный. – М.: Связь, 1969. – 447 с.
6. Испытательная техника [Текст]/ под ред. В. В. Клюева.- М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1.- 528 с.
7. Кейзман В. Б. Оценка и обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: учеб. пособие/ В.Б. Кейзман – Воронеж: ВПИ, 1987 – 82 с.
8. Ефремов Г.С. Испытание РЭА на надежность. Планирование и оценка показателей [Текст]: Г.С. Ефремов , Б.Д. Забегалов - Горький, 1974,- 44с.
9. Бродский М.А. Аудио-и видеоманитофоны [Текст] / М.А. Бродский .-Мн., 1995,-476с.
10. Надежность технических систем: Справочник [Текст]/ под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Лабораторная работа №1 .....	3
2. Лабораторная работа №2 .....	9
3. Лабораторная работа №3 .....	12
4. Лабораторная работа №4 .....	18
5. Библиографический список .....	22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭС,  
РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Теория точности в разработке конструкций и технологий»  
для студентов направления 11.03.03 «Конструирования и  
технология электронных средств»  
(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств») всех  
форм обучения

Составители:

доктор. техн. наук А. В. Башкиров,  
канд. техн. наук И.С. Бобылкин.

Компьютерный набор И.С. Бобылкин.

Подписано к изданию \_\_\_\_\_.

Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14