

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Методические указания



Составитель – С. Ф. Скорина

Рецензент – кандидат технических наук, доцент *Ю. С. Бадаев*

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ и могут быть использованы для проведения практических занятий по дисциплинам «Основы теории надежности» и «Надежность приборных систем» для студентов направлений подготовки: 24.03.02 «Системы управления движением и навигации», 24.05.06 «Системы управления летательных аппаратов», 25.03.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей», 25.03.02 «Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов».

Рассмотрены и одобрены кафедрой Эксплуатации и управления в аэрокосмических системах 19.06.16 протоколом № 8.

Публикуется в авторской редакции.  
Компьютерная верстка *М. И. Дударева*

---

Подписано к печати 26.12.2016. Формат 60 × 84 1/16.  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,03. Тираж 50 экз. Заказ №512.

---

Редакционно-издательский центр ГУАП  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67

© Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического  
приборостроения, 2016

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### Определение показателей надежности по результатам испытаний и эксплуатации изделий

#### 1. Цели работы

Целями работы являются: изучение методов определения основных показателей надежности изделий на основе экспериментальных данных; разработка программного обеспечения обработки статистических данных по отказам изделий в процессе испытаний на надежность или в процессе их эксплуатации.

#### 2. Методика определения показателей надежности

Полагаем, что в процессе испытаний или эксплуатации находилось  $N$  ( $N=100$ ) однотипных изделий, работающих до первого отказа. Моменты времени выхода из строя вследствие наступления отказов всех рассматриваемых изделий обозначим через  $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_{N-1}, t_N$ . Разделим весь диапазон времени безотказной работы всех  $N$  изделий на  $n$  интервалов времени:

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i, i = \overline{(0, n-1)}. \quad (1.1)$$

При этом  $t_0=0$ ,  $t_n = \max_{1 \leq k \leq N} t_k$ .

Определим количество отказов  $\Delta r_i$  изделий, приходящихся на каждый  $i$ -ый интервал времени. Статистическая оценка интенсивности отказов, соответствующая каждому  $i$ -му интервалу времени, вычисляется по формуле:

$$\lambda_i^* = \frac{\Delta r_i}{(N - r_{i-1})\Delta t_i}, \quad i = \overline{(0, n-1)}. \quad (1.2)$$

Общее числа отказов наблюдаемых изделий в интервале времени  $(0, t_{i-1})$  вычисляется с помощью соотношения вида:

$$r_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta r_j. \quad (1.3)$$

Статистическая оценка плотности распределения отказов (частота отказов) определяется как

$$\alpha_i^* = \frac{\Delta r_i}{N \Delta t_i}, \quad i = \overline{(0, n-1)}. \quad (1.4)$$

Статистическая оценка функции надежности изделия (вероятности безотказной работы) вычисляется как

$$p_i^* = 1 - (r_i / N), \quad i = \overline{(0, n-1)}, \quad (1.5)$$

где  $r_i = \sum_{j=1}^i \Delta r_j$  – число объектов, отказавших в интервале времени  $(0, t_i)$ .

Для проверки правильности определения оценок показателей надежности используется связь между показателями  $\lambda(t)$ ,  $p(t)$  и  $\alpha(t)$  вида:

$$\lambda_i^* = \frac{\alpha_i^*}{p_i^*}, \quad i = \overline{(0, n-1)}. \quad (1.6)$$

На практике для удобства анализа экспериментальные значения показателей надежности, как функции от времени вероятности безотказной работы, вероятности наступления отказа, плотности распределения времени наступления отказа и интенсивности отказов, представляются в форме гистограмм.

Наряду с вышеприведенными показателями безотказности изделий надежность характеризует средняя наработка на отказ. Статистическая оценка этого показателя имеет вид:

$$m_t^* = T = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N t_k. \quad (1.7)$$

Исходными данными для выполнения расчетов являются экспериментальные данные о наработке (в часах) на отказ деталей, узлов и блоков реальных приборов и систем ориентации, навигации и стабилизации, полученные в ходе проведения испытаний на надежность партии из ста соответствующих изделий. Варианты исходных данных приведены в таблице 1.1, а также могут быть получены студентами в электронном виде у преподавателя. Номер варианта индивидуального задания соответствует порядковому номеру студента в журнале учета посещаемости.

Таблица 1.1

Таблица исходных данных

Вариант 1									
318,59	337,11	791,01	1999,79	660,82	333,81	199,30	826,83	386,60	383,62
361,16	791,71	213,32	823,86	3222,62	1689,37	361,16	35,80	152,12	619,51
1237,03	779,53	833,56	359,65	656,88	307,03	21,53	1398,38	253,33	1685,93
100,77	99,76	202,02	322,53	63,33	121,79	652,98	339,16	270,99	205,16
175,13	209,68	1206,50	126,05	951,70	2113,06	90,69	1585,01	1335,21	1877,31
558,31	239,19	3110,53	1329,71	77,30	937,26	630,23	1338,77	197,62	1290,27
685,36	52,33	830,20	2373,89	2336,58	35,93	132,53	329,87	539,82	55,09
533,52	1360,13	631,80	633,58	663,35	1328,51	521,50	2635,90	296,62	2679,55
1590,28	92,98	333,96	1736,03	119,19	25,50	233,28	862,76	333,57	932,25
502,52	1935,06	1699,53	1573,28	793,66	1589,20	932,15	1668,62	12,78	306,30
Вариант 2									
565,62	526,93	1136,41	653,90	1089,15	539,69	335,68	698,09	955,91	560,01
429,84	513,53	293,63	445,01	535,51	846,10	584,21	549,15	553,29	613,95
686,80	15,04	361,38	1065,15	350,90	1143,80	255,55	882,25	966,53	665,93
852,18	25,68	464,84	421,30	909,19	361,56	156,18	449,80	386,05	260,98
333,33	122,00	251,02	519,54	254,53	699,45	125,40	594,19	824,23	611,54
586,61	823,39	891,55	859,23	839,24	498,15	939,25	325,14	243,05	565,45
382,43	255,55	438,55	953,95	228,85	456,08	450,38	356,99	188,52	220,38
328,65	498,29	305,56	655,88	251,52	520,12	590,55	590,35	549,69	828,33
623,63	514,83	622,41	605,53	505,93	929,01	255,99	951,50	465,13	839,66
251,96	585,32	1003,18	425,54	345,69	804,00	459,41	860,60	565,04	262,59
Вариант 3									
1523,74	877,25	1230,87	78,51	398,43	1005,59	1001,15	1559,50	743,99	1125,89
1817,13	503,33	1171,17	795,33	2174,88	2091,54	1153,93	1113,08	1124,94	1937,81
1240,01	772,88	971,48	415,77	737,02	2083,43	833,50	373,39	1224,82	189,09
1529,32	355,33	882,15	713,83	1509,38	493,87	2179,42	1535,93	1833,98	1332,73
719,97	1089,82	818,31	1304,82	1744,33	1478,42	923,85	930,23	1238,37	377,05
989,24	1342,18	1089,42	1205,71	1258,34	502,91	987,07	880,34	1128,04	1185,34
294,47	817,17	1017,04	385,18	745,38	494,14	912,33	1154,24	840,70	983,05
578,27	1182,42	1035,55	1003,37	591,59	478,88	328,18	453,28	891,22	1287,79
314,21	984,33	1451,39	319,09	1039,90	154,40	832,98	374,03	592,85	1820,50
1121,93	1513,11	973,85	458,80	1230,33	1428,01	1947,18	909,25	2094,14	1271,21
Вариант 4									
1603,88	1344,74	468,83	22,53	339,53	1267,18	1132,66	1295,70	14,08	568,11
613,72	254,77	1031,36	654,89	804,24	249,60	850,93	451,66	627,67	303,04

Продолжение табл. 1.1

1175,03	933,87	246,90	607,96	1112,76	1305,83	207,91	1062,64	601,65	1399,95
1647,97	120,67	395,02	256,95	761,24	1649,05	362,10	1292,80	1176,50	1184,83
1604,18	1493,42	1553,96	177,03	1615,34	914,16	1250,65	409,55	509,46	744,89
556,23	1320,53	31,02	346,61	793,56	1652,62	852,92	744,36	1649,89	609,34
743,04	780,42	198,33	786,57	1606,11	923,41	1493,97	543,20	442,45	102,79
972,67	613,16	1439,56	1399,09	1113,96	104,44	35,97	1109,75	63,23	845,41
375,55	1223,40	486,94	1066,02	1134,98	627,56	558,22	1546,88	293,46	909,69
1159,37	1051,06	1397,02	1271,52	378,43	1667,96	949,27	890,76	206,35	49,51

Вариант 5

368,90	356,73	370,78	387,87	806,00	305,96	157,36	132,87	1137,26	292,97
60,57	688,26	695,73	79,33	926,18	597,30	663,20	637,82	138,03	935,62
393,62	1020,81	333,52	780,93	301,39	953,36	879,19	656,05	530,30	382,03
928,83	738,01	127,39	82,75	352,08	551,92	32,23	790,52	889,25	322,13
513,30	715,51	227,30	930,87	801,00	396,73	972,08	292,37	789,36	520,50
88,06	733,12	169,58	771,55	615,50	971,32	730,29	369,23	865,96	600,72
778,38	585,77	713,83	693,80	381,73	530,65	770,26	591,20	562,30	693,90
592,26	991,08	565,20	236,19	132,77	631,52	377,31	836,30	390,86	207,73
699,89	500,41	443,85	998,45	668,61	502,33	367,75	206,84	478,40	751,55
159,92	577,17	552,36	817,62	540,64	710,69	979,64	182,60	982,75	764,33

Вариант 6

377,21	780,72	162,70	857,14	765,73	1044,47	744,08	41,78	1176,63	553,37
644,87	734,67	1176,05	1211,17	77,74	655,80	757,03	1043,23	367,57	374,12
827,00	338,12	677,62	757,78	1156,88	464,47	1063,27	447,54	112,13	717,10
740,47	1147,66	531,17	1103,88	737,73	276,13	377,32	765,26	787,42	238,08
745,45	784,05	717,56	264,75	577,86	73,77	485,87	847,34	666,11	644,16
735,76	437,15	345,37	1084,77	64,10	681,78	237,86	208,76	834,25	177,17
1077,67	506,87	1070,71	1127,55	426,67	450,06	1075,00	551,73	213,82	750,88
747,73	73,28	513,30	225,13	758,37	361,41	274,41	1027,27	611,88	763,17
661,05	707,32	276,32	1157,75	274,28	1226,21	162,05	737,16	780,42	768,76
201,67	1103,47	562,35	373,80	142,40	716,65	786,47	326,40	866,72	1172,57

Вариант 7

2324,42	2426,55	977,73	2347,92	2729,56	2342,35	886,82	222,42	3984,34	656,45
705,78	2267,57	4093,73	87,07	329,56	2882,02	2292,72	288,67	2408,73	666,55
3598,82	2578,49	487,35	5002,48	655,32	2788,22	90,23	835,95	2948,00	367,52
3280,22	5424,04	2725,54	2724,46	535,27	222,23	244,72	3972,03	4597,50	4567,82
503,52	2280,52	2603,27	350,33	2392,82	582,34	2893,25	4253,64	408,82	5077,25

*Продолжение табл. 1.1*

622,42	2728,67	2920,30	270,37	3493,82	2523,92	3867,52	2393,80	545,85	2092,92
788,52	6882,98	2249,27	309,04	3599,66	260,02	3723,64	739,32	2522,89	227,22
697,45	2875,89	607,62	2440,46	4822,48	233,79	2938,49	2878,46	2286,39	7378,62
2638,25	2524,82	2209,93	4227,85	860,22	340,42	2002,02	2722,22	3622,35	4009,97
3574,45	556,02	935,23	2049,42	2248,86	76,28	283,35	2340,00	3000,75	5085,92

Вариант 8

780,51	992,76	518,56	502,04	949,27	926,64	624,80	1102,96	1292,60	895,72
696,47	925,15	505,79	962,04	554,58	272,61	621,08	566,59	925,90	992,22
725,75	560,41	627,27	1024,27	674,41	574,27	75,59	294,78	224,82	412,24
528,87	1128,26	784,27	288,24	720,56	844,64	212,27	872,02	459,52	688,28
675,67	286,12	747,99	1000,42	728,70	286,07	647,02	246,88	725,08	748,60
885,04	182,05	400,21	722,22	618,17	1291,78	271,92	247,20	174,98	787,25
654,50	502,07	612,45	1122,49	582,66	688,57	904,01	824,27	929,52	946,17
455,52	1042,59	1002,71	825,71	427,22	484,19	1060,22	716,42	280,11	824,65
682,54	219,02	1282,11	264,88	696,55	69,66	422,90	686,22	955,59	511,88
1028,56	879,51	487,42	852,70	479,58	652,92	602,29	202,56	1219,89	1072,14

Вариант 9

780,83	1187,25	645,68	1073,87	530,45	1287,11	148,04	225,20	652,53	744,82
443,01	652,85	40,08	172,46	730,36	660,64	138,86	1286,55	836,05	653,40
157,83	1058,32	135,37	1231,01	841,78	517,86	182,30	584,75	838,87	182,63
170,66	581,83	130,57	864,28	543,76	638,87	828,77	165,65	845,53	878,25
305,05	512,85	226,78	681,45	600,83	344,76	488,02	783,65	284,57	314,28
83,68	658,07	1301,84	577,27	783,11	40,60	506,81	1258,80	1088,71	830,07
65,82	660,21	1221,28	174,78	425,08	111,48	425,86	338,88	336,62	467,24
1158,48	363,88	427,77	1064,38	1188,86	581,50	818,04	802,88	211,86	882,80
183,03	54,60	384,82	508,88	128,87	1148,75	1026,63	371,63	1265,70	401,45
761,37	720,83	565,82	677,06	318,18	673,84	1247,74	1108,10	783,38	560,38

Вариант 10

4632,79	52,49	616,10	1762,45	3375,40	1759,62	355,49	624,69	1914,73	1007,90
443,96	729,39	1505,79	1511,42	1699,24	11,39	2913,90	132,97	437,22	30,09
1993,54	92,04	4055,73	2041,56	3353,71	1290,90	44,67	11,44	597,41	2527,31
530,90	304,99	1372,93	414,99	174,94	279,74	2769,99	694,14	710,99	109,92
140,63	1140,32	294,97	4653,00	60,92	1351,69	49,99	1091,19	949,02	3292,94
529,00	4444,54	2329,22	1777,19	792,39	1011,13	563,67	156,92	679,69	2212,09
1101,90	2474,24	435,76	1053,27	647,07	1492,97	969,09	511,92	7413,10	992,61

*Продолжение табл. 1.1*

5176,44	2046,63	9405,92	2379,50	949,47	51,76	1990,59	2265,96	5034,44	924,10
399,62	1155,25	932,29	45,20	241,57	1617,53	25,37	1665,33	509,67	447,00
1009,04	4294,52	97,46	1192,56	1371,03	344,76	1441,06	496,94	314,19	996,42

**Вариант 11**

1169,51	734,32	67,76	797,01	1063,41	379,67	1061,63	731,32	629,14	944,95
52,53	597,44	627,34	1333,70	334,34	1275,70	932,77	766,92	153,63	770,04
727,74	349,57	1417,51	1377,76	1017,06	717,03	603,75	1369,13	955,59	905,97
1327,77	579,17	1902,77	370,16	1392,67	662,07	1433,44	721,79	1472,05	1309,20
1266,71	233,37	720,27	543,52	1267,29	770,44	731,26	271,46	1191,97	471,71
414,66	1117,14	773,25	407,72	773,59	972,74	422,67	1007,77	513,99	700,69
419,51	700,41	772,24	1190,11	1331,13	714,56	460,16	1374,46	717,66	402,55
720,29	1403,66	1461,91	770,77	1323,62	1133,47	1243,16	626,05	272,50	970,77
779,27	769,17	1654,22	2207,17	663,60	644,30	1302,06	1709,20	1559,54	1127,47
716,17	1397,79	955,07	717,23	1123,59	164,52	1551,44	700,19	1037,44	1651,95

**Вариант 12**

1525,56	608,26	307,39	1283,26	216,22	558,59	70,13	58,08	1005,60	917,55
1096,55	957,78	1335,17	350,61	590,09	1169,86	1355,23	875,59	525,39	1075,80
851,13	1015,86	598,38	999,91	1380,72	565,27	1355,59	78,51	1255,15	521,35
1066,06	1095,58	1155,68	1211,27	101,22	551,75	306,53	919,55	1281,12	208,37
91,17	533,89	165,11	198,28	131,53	830,57	331,19	235,38	155,78	195,35
922,26	765,82	717,25	1558,59	1257,96	552,35	639,90	837,15	1526,53	122,19
1178,00	202,39	195,65	699,75	777,06	305,89	813,91	827,50	1590,59	708,60
286,05	218,18	1331,75	153,58	1502,52	529,90	268,73	270,80	273,21	1013,19
766,70	1205,05	1191,28	1151,18	369,39	167,91	590,50	987,81	709,12	1398,06
825,27	535,80	217,39	617,32	1215,83	535,75	86,16	377,87	1538,33	905,80

**Вариант 13**

868,51	558,55	1487,70	12,50	504,75	560,84	981,10	5592,65	610,54	575,15
206,50	289,81	1207,44	468,70	704,15	167,40	79,18	2040,97	661,48	2125,47
99,12	1865,52	155,85	98,21	825,44	222,68	1545,77	501,17	51,47	747,71
154,88	557,55	21,01	5089,25	628,95	1598,05	575,97	507,51	212,58	909,48
972,79	78,68	881,65	961,47	656,85	21,47	1559,62	525,68	115,69	441,71
285,25	209,44	855,62	919,52	428,57	265,15	2621,99	57,16	881,09	510,84
56,48	896,49	1128,27	975,44	751,05	604,55	45,89	265,16	601,58	5555,26
5915,15	955,55	428,10	1556,85	1675,82	4225,22	25,55	15,42	60,61	80,92
655,18	504,57	994,46	400,20	5452,85	5,75	46,10	576,58	165,15	74,88
546,11	151,22	107,50	541,51	719,69	475,67	551,09	1041,59	1054,54	2561,79



*Продолжение табл. 1.1*

**Вариант 14**

885,94	1158,75	1970,39	1578,06	606,81	905,01	975,73	1614,98	469,01	1348,99
713,97	755,88	955,48	1055,46	5034,05	849,04	1036,09	1043,65	636,56	5061,50
854,15	886,33	1365,50	1159,35	578,17	545,06	1051,65	670,44	763,87	1404,58
185,08	1113,10	595,81	1540,19	895,95	904,33	887,07	1690,58	1113,17	854,15
850,86	510,07	1508,87	504,70	1167,59	1397,53	754,79	975,05	1181,60	1940,53
541,53	719,99	463,15	746,97	595,65	1015,45	850,51	958,87	1509,10	1059,90
1357,79	6,14	544,16	1105,84	709,17	1505,94	583,05	1855,48	1579,56	1451,34
999,74	654,44	766,74	810,88	1507,14	1136,50	784,95	165,84	1515,33	1979,03
1575,85	744,76	850,97	1415,55	1544,80	519,55	511,58	701,75	1594,61	1005,73
1043,73	5,10	849,01	1506,55	464,47	1851,90	1198,61	645,96	658,77	875,56

**Вариант 15**

1689,98	1589,19	1496,19	1605,86	664,15	593,73	1318,10	1687,75	680,59	765,89
594,67	1448,65	1437,05	1495,90	710,70	1480,94	547,64	166,80	780,55	819,36
60,13	1088,61	913,73	894,59	996,47	597,41	1458,35	359,39	1059,35	513,93
963,00	968,73	895,98	1198,59	1330,79	900,98	1647,85	1410,05	767,04	1464,93
783,38	959,38	757,73	138,36	584,13	374,36	386,11	601,31	531,79	968,60
460,93	1433,84	870,38	707,99	509,43	1575,09	793,03	646,98	1585,96	480,67
1979,91	118,34	566,64	813,49	1604,50	1309,05	439,47	904,04	95,94	1085,16
1378,64	1386,48	1661,96	545,63	1988,87	715,73	1053,50	435,01	1513,09	1467,19
57,13	591,04	449,99	1989,85	1413,74	1583,58	1679,35	1971,03	1957,43	639,86
130,83	1408,39	616,90	984,81	457,59	77,90	141,63	889,47	945,41	1434,91

**Вариант 16**

1001,91	649,73	566,31	1048,97	307,49	986,09	456,10	633,14	1307,91	536,61
499,34	793,13	813,95	578,45	1387,49	753,84	547,93	780,75	114,54	1663,33
668,00	170,00	1310,56	1439,38	1133,66	1957,37	1360,10	1084,98	981,35	601,34
1180,56	1114,66	1706,07	538,17	908,83	878,19	1175,60	937,03	1139,05	347,90
834,76	1349,95	1198,66	1074,01	1304,38	733,58	13,86	971,36	639,70	854,34
936,75	1463,14	779,93	134,56	1135,56	733,87	713,48	505,43	1778,38	833,57
917,85	553,83	1374,58	193,91	433,30	1116,51	503,00	777,33	75,33	848,85
1381,73	496,56	415,73	1043,13	600,44	1166,36	1103,39	415,07	354,08	966,94
1101,95	1484,88	684,67	814,95	1300,86	946,80	1467,13	1108,11	316,71	673,09
634,03	1193,53	1444,64	539,56	74,30	1136,04	574,56	1786,45	480,86	889,11

**Вариант 17**

1054,04	446,59	538,15	401,74	785,90	691,13	840,61	109,74	54,40	1140,34
1089,05	90,81	1104,44	1067,00	7,81	118,44	741,87	718,70	955,14	737,98

*Продолжение табл. 1.1*

964,36	1084,41	548,67	1057,06	838,69	804,84	759,60	483,65	1000,46	747,31
340,85	345,18	1011,49	614,74	166,04	318,94	445,48	188,56	637,68	40,41
807,95	160,05	1044,76	840,55	1044,53	1101,83	64,69	719,98	850,94	574,45
311,93	78,68	1074,93	978,84	355,56	649,04	770,61	630,30	551,91	676,63
149,43	315,01	950,33	948,66	878,55	611,44	179,96	1044,65	565,04	344,48
1144,40	494,57	843,35	83,09	465,36	444,56	349,70	484,68	791,03	174,66
844,70	784,18	1047,47	789,14	1143,63	817,17	3,67	110,47	1140,94	46,68
68,73	164,38	615,09	366,84	449,17	577,05	374,63	564,61	56,41	315,57

**Вариант 18**

1260,03	15,12	580,09	292,13	485,35	352,24	421,11	2546,56	81,43	610,60
240,42	1015,49	338,89	684,14	289,44	1328,03	232,86	193,94	352,06	81,84
804,39	1094,49	531,41	418,43	1243,10	53,85	326,22	661,29	141,92	531,51
394,23	316,28	11,13	564,95	485,06	481,05	288,62	464,46	31,44	226,66
1152,66	1325,61	10,58	292,23	413,41	546,40	1233,88	444,34	888,42	843,92
149,29	242,29	182,58	201,61	1148,68	1110,54	1092,20	420,34	952,46	61,33
21,14	622,90	454,90	550,19	342,11	514,08	34,20	426,69	580,14	2450,10
1848,84	144,82	444,11	36,18	428,10	224,53	308,05	2032,80	3,03	2340,46
604,08	35,62	1544,48	411,34	434,05	834,38	466,33	48,40	13,58	630,24
152,32	380,18	44,99	300,05	446,35	2485,55	3,84	945,82	954,55	22,49

**Вариант 19**

518,63	265,05	584,06	688,48	508,93	269,53	96,95	904,35	998,56	952,23
1055,55	424,90	185,65	513,64	931,58	630,15	553,41	559,52	552,41	565,66
1625,92	509,55	518,99	629,68	505,55	545,06	663,25	360,90	680,13	936,45
215,51	945,80	1062,93	30,55	312,64	56,35	459,95	509,01	603,94	845,13
569,26	294,00	580,49	893,31	438,84	925,46	901,56	595,82	513,55	865,85
2,54	388,89	353,89	535,54	532,06	865,64	1211,25	901,13	450,00	595,60
505,55	661,32	514,51	352,05	622,35	538,09	539,83	431,53	1468,56	465,38
693,63	592,10	663,09	918,65	564,55	401,11	550,93	112,68	919,56	464,46
505,26	638,50	692,36	233,26	383,54	151,58	1458,88	511,41	316,24	1058,54
653,24	1032,35	1026,10	1012,63	480,89	669,00	406,29	955,86	1021,82	815,68

**Вариант 20**

215,60	224,87	645,80	1651,06	674,15	301,72	1514,36	185,21	781,71	227,23
1626,48	1621,84	1430,55	1617,52	1018,55	1686,47	33,47	1865,15	1825,24	1057,06
311,66	254,57	1621,10	866,10	1176,42	1761,80	602,27	1315,01	1546,71	383,11
210,41	460,00	1862,82	650,41	1175,04	1078,86	1556,82	1541,64	1031,40	1768,11
632,36	385,18	1121,83	1140,43	1131,31	687,38	507,32	1783,10	81,17	245,20

*Продолжение табл. 1.1*

1053,85	363,81	280,04	1245,71	1001,15	1312,02	876,10	103,72	111,37	1356,21
1681,31	1665,77	756,66	1147,07	171,78	838,56	165,81	864,68	1388,52	782,48
1004,78	1146,28	664,75	1102,02	1232,73	1654,35	1381,00	358,41	1087,88	1611,12
401,15	1161,76	1777,16	1837,87	152,50	871,11	145,54	216,45	1051,81	644,72
1434,78	1187,47	645,16	414,53	1318,05	112,62	1025,56	1384,83	351,51	1683,11

**Вариант 21**

377,25	2422,24	1225,22	861,22	2522,82	1514,11	250,46	1563,24	1226,66	1581,44
776,00	3104,15	4027,20	2147,22	3062,72	641,62	2003,23	1122,13	138,41	52,11
4061,63	27,30	1702,45	1042,16	408,65	1742,76	1447,50	1142,58	150,34	220,23
226,57	502,56	3216,73	262,45	528,28	1011,54	562,84	1482,72	422,22	355,73
2076,45	564,00	1178,87	2558,53	5353,55	151,43	222,16	848,62	203,11	244,83
3380,56	4584,14	457,18	222,26	2152,06	580,10	2644,73	1652,22	4647,82	2524,71
353,84	2155,33	1741,20	638,21	1080,12	1081,08	273,06	235,74	212,75	3104,63
3266,72	542,12	1278,72	1731,30	1044,33	128,43	2076,18	48,21	2854,05	2673,85
1203,73	7,24	1067,86	172,37	2433,07	823,17	254,25	401,02	1213,80	430,31
1756,17	551,88	457,27	122,04	3173,21	1516,05	772,87	3006,44	433,42	3183,67

**Вариант 22**

559,84	2462,29	7968,54	4342,08	4048,54	4002,24	4054,45	4984,70	4523,73	2927,59
43,65	502,43	405,43	447,65	4864,02	862,43	3449,43	4034,64	2999,30	989,39
2387,30	4377,27	489,59	4524,97	673,39	950,68	587,95	446,80	394,76	4884,42
4255,70	220,43	260,80	4499,73	4306,92	54,40	4842,45	4352,48	2360,27	4483,44
547,44	546,54	3556,25	4244,42	655,34	4463,75	4449,00	268,34	4388,74	696,05
433,70	348,44	4386,84	4037,47	350,50	4853,98	224,06	437,43	25,40	4045,24
486,45	2440,50	34,79	437,02	80,52	4496,76	2209,59	428,45	385,72	547,05
822,80	22,28	285,58	405,85	307,72	2575,42	89,43	3442,42	448,93	454,55
424,79	529,90	2577,34	906,35	90,70	544,24	3287,79	854,70	4746,40	4449,74
334,37	608,94	370,54	4303,46	989,44	34,44	4083,53	692,24	2065,34	4366,80

**Вариант 23**

710,54	1644,34	1061,50	1469,67	1858,84	1596,57	1163,94	1461,30	601,61	669,30
1487,70	737,31	1460,30	774,55	1844,43	947,41	445,35	43,85	1055,41	1670,49
1344,58	1446,64	1851,85	1061,13	1357,84	335,77	871,55	1104,83	746,47	930,48
590,31	913,84	565,98	461,56	934,17	1585,40	1391,94	1174,74	444,79	934,33
1149,50	597,57	958,47	1485,34	773,46	664,36	414,74	1319,80	500,35	1095,68
1408,48	496,16	63,64	974,69	455,63	1454,91	1430,39	1463,87	135,41	1186,84
1754,47	1107,45	459,65	454,96	1044,47	1146,74	631,01	1979,84	1060,50	1373,54
1036,10	1507,50	444,94	544,91	661,06	1053,84	770,89	1841,94	1408,73	1304,36

*Продолжение табл. 1.1*

1374,43	576,48	1068,80	446,40	1080,49	1557,19	537,94	1168,71	759,71	553,66
894,63	1150,44	1944,43	880,95	1444,86	640,74	779,54	1107,04	488,16	434,80

**Вариант 24**

197,14	409,14	651,25	440,79	686,22	554,44	821,92	476,16	205,48	705,84
824,79	614,64	1201,20	505,98	744,02	408,99	1245,42	449,86	665,08	1002,80
844,97	284,42	957,14	1069,54	551,09	970,41	146,54	1251,87	412,74	599,60
44,40	244,80	507,54	424,41	1157,54	402,46	620,61	492,48	951,64	1240,41
660,70	1185,77	164,22	424,01	656,91	928,99	141,46	1009,41	181,24	1088,52
752,64	521,16	156,44	556,55	261,16	1025,49	720,76	400,26	786,01	576,66
552,75	221,74	118,09	594,44	858,82	469,41	704,68	149,45	1194,47	894,95
558,01	487,50	1002,58	200,86	266,94	264,17	977,98	448,82	200,42	975,47
1144,74	142,45	98,90	1044,90	489,56	1258,99	946,89	194,14	211,74	1244,49
474,68	601,02	146,04	1047,28	640,18	642,56	984,95	1146,49	1127,40	409,06

**Вариант 25**

628,38	586,01	1036,66	78,20	160,02	861,53	587,65	576,12	767,30	621,22
781,62	72,32	577,79	606,33	732,57	1986,26	1103,81	601,16	56,69	108,21
1966,52	1518,38	1585,39	215,62	767,52	133,31	169,76	56,01	61,58	1663,29
1853,80	1623,06	1657,06	21,60	1018,19	771,85	393,56	166,50	166,03	381,67
56,37	1196,62	260,10	96,68	566,23	698,93	682,59	3576,72	186,80	2657,52
1216,79	671,17	358,82	563,79	196,67	768,65	2076,93	886,93	2295,66	523,37
2819,22	1153,06	60,65	1360,58	127,98	163,20	1136,98	852,82	615,38	507,97
1690,09	1390,69	371,70	57,36	125,68	2636,68	330,36	762,99	1660,35	1578,67
556,86	675,60	625,32	172,30	26,13	1050,68	1663,76	1532,15	197,71	359,06
923,17	667,61	696,52	562,70	286,88	622,96	2278,66	360,75	331,05	663,95

**Вариант 26**

66,29	939,06	347,63	1196,76	1129,86	480,09	1377,68	976,42	998,31	1069,60
1161,26	680,40	618,89	410,13	638,44	1221,16	1786,96	1163,67	987,22	289,46
1388,21	297,66	631,38	800,19	616,70	946,84	881,64	1669,92	269,44	1704,67
719,76	1216,67	839,19	731,46	848,14	1631,88	1164,90	1326,76	1668,18	643,66
166,88	664,48	960,32	896,41	241,12	1286,76	1646,90	1469,47	217,97	620,16
369,24	667,78	832,46	829,29	1148,49	436,08	826,36	790,79	772,80	676,71
613,38	137,40	1228,86	222,60	929,63	221,89	690,66	876,88	1483,60	1226,26
642,78	666,19	378,77	1678,26	676,02	1749,16	474,79	467,81	988,69	683,90
326,69	1114,38	1818,24	464,70	1318,16	1710,77	1310,63	872,27	1684,90	1013,10
344,67	860,29	1334,66	76,96	411,26	640,62	497,03	902,77	1491,72	383,28

Вариант 27									
68,63	823,26	353,06	217,66	216,60	821,00	160,98	863,55	509,23	378,66
360,73	158,75	972,65	880,97	678,66	665,12	502,98	697,36	369,11	86,56
896,68	880,63	198,57	392,96	999,92	693,17	592,69	208,61	159,68	198,16
803,65	166,05	900,65	236,58	703,73	193,31	171,29	725,58	51,16	736,68
762,61	129,03	681,15	666,78	332,53	561,02	506,38	370,17	953,08	727,69
791,82	669,15	1007,71	876,75	657,56	238,68	108,67	900,38	291,09	1010,00
909,72	885,67	159,00	331,66	759,68	676,63	858,18	1007,07	673,35	828,99
990,06	262,09	563,13	516,11	68,65	856,18	855,25	875,26	560,16	999,99
500,60	169,28	261,31	210,52	239,98	680,73	238,07	108,20	660,56	1018,06
766,97	822,96	332,20	268,73	59,71	361,09	131,51	138,15	697,11	650,05

Вариант 28									
666,56	1937,74	59,63	495,41	635,10	770,96	676,67	431,42	361,23	1579,53
162,94	11,49	1463,70	1022,22	217,92	2340,99	4469,96	63,35	376,35	351,55
2229,37	231,27	331,79	1169,75	491,90	4625,41	201,71	1543,24	161,44	570,49
225,72	1770,37	906,66	733,73	1465,65	1200,75	637,41	154,39	160,67	317,67
243,11	1932,05	1570,11	1717,14	396,71	406,67	257,57	663,63	241,79	965,15
100,41	1112,76	917,16	1209,75	1115,10	31,07	472,90	26,43	155,06	23,75
56,59	1900,06	146,34	3312,40	316,67	1306,76	941,27	1022,92	1667,97	450,70
6454,61	769,46	1543,94	969,22	3,94	677,99	97,20	1192,70	1561,39	1491,34
292,02	405,67	336,73	100,14	327,27	2092,44	1166,16	1546,94	105,65	761,25
1265,43	314,66	1149,43	4263,35	6,36	760,99	97,60	246,61	925,59	272,96

### 3. Порядок выполнения работы

Выполнение данной лабораторной работы включает в себя следующие этапы:

Изучение методики определения показателей надежности по экспериментальным данным.

1. \* Разработка и программирование алгоритма определения значений  $\Delta r_i$  и  $r_i$ ,  $i = (\overline{0, n-1})$ .

2. \* Разработка и программирование алгоритма вычисления показателей надежности по формулам (2), (4), (5), (7).

3. \* Программирование процедуры контроля правильности вычислений с использованием выражения (6).

4. Выбор величины  $n$  и интервалов  $\Delta t_i$ ,  $i = (\overline{0, n-1})$ .

5. Ввод в программу выборки  $t_k$ ,  $k = (\overline{1, N})$  и ее сортировка по возрастанию. Исходная выборка в индивидуальном варианте читается слева направо и сверху вниз.

6. Вывод результатов расчета осуществлять в виде таблицы:

Интервалы	Кол-во отказов	Интенсивность отказов	Плотность распределения	Функция надежности	Контроль
$(t_i, t_{i+1})$	$\Delta r_i$	$\lambda_i^*$	$\alpha_i^*$	$p_i^*$	$\lambda_i^* p_i^* - \alpha_i^* = 0$

Средняя наработка на отказ  $T = \dots$  час.

7. Привести расчеты показателей надежности для трех вариантов значений  $n$ , заданных преподавателем, и  $\Delta t_i, i = (0, n - 1)$ .

Для аппроксимации полученных расчетных характеристик безотказности на практике могут использоваться различные теоретические законы распределения случайных величин. При изучении надежности технических устройств наиболее часто применяются следующие законы распределения времени безотказной работы: экспоненциальный, нормальный, Релея, Гамма, Вейбулла-Гнеденко.

В табл. 1.2 приведены аналитические выражения для оценки количественных характеристик надежности изделий при различных законах распределения времени безотказной работы.

Таблица 2

**Основные соотношения количественных характеристик надежности при различных законах распределения времени безотказной работы**

Закон распределения	Частота отказов $\alpha(t)$	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Интенсивность отказа $\lambda(t)$
Экспоненциальный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$
Вейбулла	$\lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}$	$e^{-\lambda_0 t^k}$	$\lambda_0 k t^{k-1},$
Нормальный	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$1 - \frac{1}{\sqrt{2\delta\sigma}} \int_0^t e^{-\frac{(t-T)^2}{2\delta^2}} dt$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_0^t e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}} dt$ $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$

Закон распределения	Частота отказов $\alpha(t)$	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Интенсивность отказа $\lambda(t)$
Гамма	$\lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$	$\frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}$

Из выражений для оценки количественных характеристик надежности видно, что все характеристики, за исключением интенсивности отказов при экспоненциальном законе распределения, являются функциями времени.

#### 4. Содержание отчета

- 1) Постановка задачи.
- 2) Краткие сведения из теории и расчетные формулы.
- 3) Блок-схема алгоритма определения показателей надежности.
- 4) Результаты расчетов показателей безотказности по формулам (1.1)...(1.8) в виде таблиц.

5. Результаты расчетов показателей безотказности в виде графиков четырех функций  $\Delta r_1(t_1)$ ,  $\lambda_1^*(t_1)$ ,  $\alpha_1^*(t_1)$ ,  $p_1^*(t_1)$ . На каждом графике должно быть по 3 кривых – для трех вариантов значения величины  $n$ .

#### 6. Сделать следующие выводы:

- о соответствии построенных зависимостей показателей безотказности от времени теоретическим положениям;
- оценить влияние величины  $n$  на полученные расчетные результаты показателей надежности;
- дать мотивированное заключение о предполагаемом законе распределения времени безотказной работы.

Разработка индивидуального программного обеспечения не обязательна, поскольку все расчеты в работе могут быть выполнены с использованием известных пакетов прикладных программ Excel, Mathcad, Matlab и др. Но создание и использование оригинального программного обеспечения всячески приветствуется и поощряется (учитывается при сдаче зачета). Кроме того, разработка соответствующего программного обеспечения обеспечивает существенную экономию времени на выполнение работы, а сам программный продукт может найти применение при выполнении учебного плана по другим дисциплинам и в ходе подготовки выпускной квалификационной работы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Исследование надежности системы с последовательно и параллельно соединенными невосстанавливаемыми элементами, отказы которых являются независимыми

#### 1. Цели работы

Целями работы являются: изучение методов расчета показателей надежности системы с учетом разнообразных связей ее элементов; анализ влияния на показатели надежности систем показателей надежности элементов; анализ влияния на показатели надежности систем уровня ее сложности (количества элементов).

#### 2. Методика расчета надежности

Основной задачей теории надежности является определение надежности системы по надежности составляющих ее элементов.

При расчете надежности системы строится структура ее надежности. При этом предполагается, что различные группы элементов системы могут быть соединены либо последовательно, либо параллельно. При смешанном соединении элементов полагают, что такое соединение может быть сведено: к последовательному соединению либо к параллельному, либо использованы специальные приемы, позволяющие перейти от «нестандартного» соединения, например, мостовые схемы, схемы соединения тапа «звезда» или «треугольник», к последовательному или параллельному соединению ряда элементов.

Необходимо отметить, что структурная схема расчета надежности не всегда соответствует электрической или структурной схеме системы. В ряде случаев она может отличаться и от функциональной схемы системы. Примером такого случая можно считать параллельное соединение двух конденсаторов, включаемых параллельно полезной нагрузке с целью шунтирования высокочастотных помех. В случае электрического пробоя одного из конденсаторов произойдет отказ схемы при отказе любого элемента. При таком отказе схема для расчета надежности должна представлять собой основное, последовательное соединение двух элементов.

Пусть система состоит из  $n$  элементов, для которых заданными являются функции надежности  $p_i(t)$  и отказа  $q_i(t)$ ,  $i = \overline{1, n}$  (вероятности безотказной работы и возникновения отказа соответственно). Требуется определить вид функции надежности  $p_C(t)$  исследуемой системы и вычислить ее значения при  $t \in [0, \tau]$  и определить среднее время безотказной работы.

При последовательном соединении элементов, приведенном на рис.2.1, отказ одного элемента приводит к отказу всей системы.





Рис.1. Последовательное соединение элементов

Функция надежности такой системы вычисляется как:

$$p_C(t) = p_1(t)p_2(t) \dots p_n(t), \quad (2.1)$$

а функция отказа

$$q_C(t) = 1 - [(1 - q_1(t))(1 - q_2(t)) \dots (1 - q_n(t))]. \quad (2.2)$$

В случае показательного закона надежности элементов имеем, что

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $\lambda_i = \text{const}$  - интенсивность отказов  $i$ -го элемента. Из выражения (2.1) следует, что:

$$p_C(t) = e^{-\lambda_C t},$$

где  $\lambda_C$  - интенсивность отказов системы, которая вычисляется как

$$\lambda_C(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Среднее время безотказной работы такой системы будет равно:

$$T_C = 1/\lambda_C. \quad (2.3)$$

Параллельное соединение элементов (см. рис. 2.2) в структурной схеме надежности имеет место в том случае, если отказ системы наступает при отказе всех ее элементов. При этом функция отказов системы определяется как

$$q_C(t) = q_1(t)q_2(t) \dots q_n(t) \quad (2.4)$$

Функция надежности системы с параллельно соединенными элементами будет равна:

$$p_C(t) = 1 - [(1 - p_1(t))(1 - p_2(t)) \dots (1 - p_n(t))]. \quad (2.5)$$

В случае показательного закона надежности имеем, что

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad q_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}, \quad i = \overline{1, n}.$$

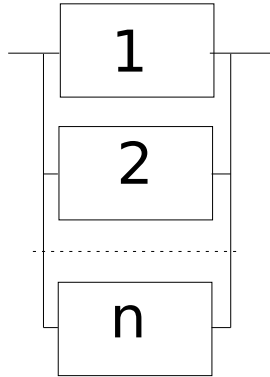


Рис.2. Параллельное соединение элементов

Среднее время безотказной работы системы вычисляется по формуле:

$$T_C = \int_0^{\infty} p_C(t) dt.. \quad (2.6)$$

### 3. Порядок выполнения работы

Выполнение данной лабораторной работы включает в себя два раздела: 1 – анализ последовательного соединения элементов; 2 – анализ параллельного соединения элементов.

Изучение методики расчета надежности систем.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.1.

Разработка процедур расчета показателей надежности (1)–(3) и (4)–(6) для задаваемых в диалоговом режиме значений  $n$  и  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  (см. табл.П1), в приведенной таблице каждый столбец соответствует выбранному варианту (1-4), в графе « $n$ » расположены 3 возможных значения  $n$ . Два варианта значения  $\lambda_i$ , для выбранного количества элементов  $n$  представлены в табл. в столбце, в нижней части которого расположен номер индивидуального варианта.

Таблица 2.1

Исходные данные для расчетов

n	5,7,10	6,8,9	4,7,11	5,8,10
$\lambda, 1/\text{час}$	1/400, 1/250	1/200, 1/400	1/300, 1/400	1/500, 1/250
Вариант	1-5	6-10	11-15	16-20

Примечание: при вычислении среднего времени безотказной работы по выражению (6) одним из численных методов интегрирования (метод прямоугольников, метод трапеций и т.д.) необходимо задать значение верхнего предела интегрирования, равное достаточно большому числу  $G$ , при котором  $p_C(G) \approx 0$ . На практике выбирают такое значение  $G$ , при котором величина  $p_C(G)$  принимает значение в диапазоне 0,03 ... 0,05.

Задаться значением  $\tau$  (например,  $\tau = 3T_c$ , с помощью выражению (3) или (6)) и рассчитать величины  $T_c$ ,  $p_c(t)$ ,  $q_c(t)$  для последовательного и параллельного соединения элементов.

Результаты расчета показателей надежности целесообразно представить в виде следующей таблицы:

$$n = \dots \quad T_{C, \text{посл}} = \dots \quad T_{C, \text{пар}} = \dots$$

Время, час	$p(t)$	$q(t)$	$p(t)$	$q(t)$

и в графической форме с помощью средств Microsoft Office.

#### 4. Содержание отчета

1. Постановка задачи.
2. Исходные данные и основные расчетные формулы
3. Блок-схема алгоритма анализа надежности последовательного и параллельного соединения.
4. Результаты расчетов показателей надежности системы
5. Семейство графиков вероятности безотказной работы  $p(t)$  (2\*3 шт.) для последовательного соединения.
6. Семейство графиков вероятности возникновения отказов  $q(t)$  (2\*3 шт.) для последовательного соединения.
7. Семейство графиков вероятности безотказной работы  $p(t)$  (2\*3 шт.) для параллельного соединения.
8. Семейство графиков вероятности возникновения отказов  $q(t)$  (2\*3 шт.) для параллельного соединения.
9. Выводы
10. Количественно-обоснованное заключение о результатах сравнительного анализа показателей надежности для последовательного и параллельного соединения элементов в системе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Исследование надежности системы с смешанным соединением невосстанавливаемых элементов, отказы которых являются независимыми

1. Цели работы: изучение методов расчета функции надежности системы с учетом разнообразных связей ее элементов; получение навыков декомпозиции произвольных структур анализируемых систем и алгоритмизации задач расчета их надежности; [\*] разработка программного обеспечения расчета надежности сложных систем с независимыми элементами, работающими до первого отказа.

#### 2. Методика расчета надежности

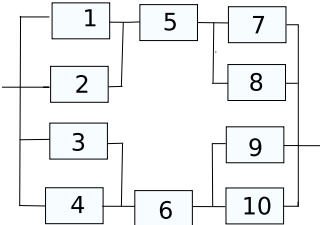
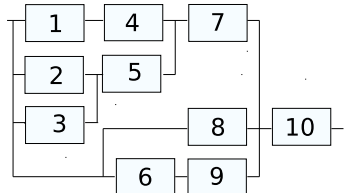
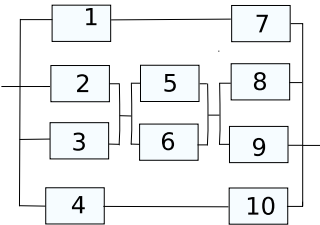
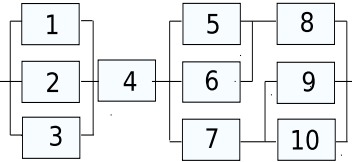
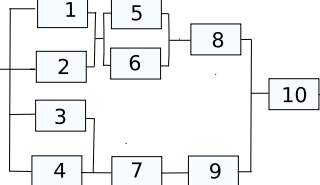
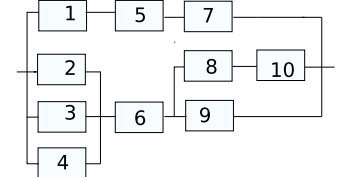
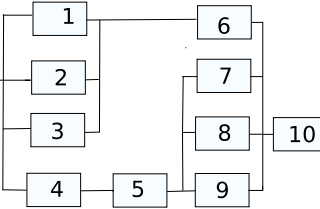
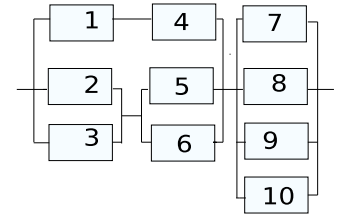
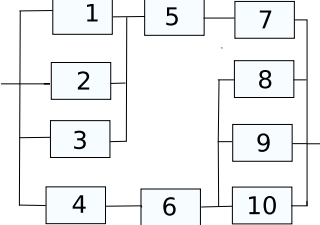
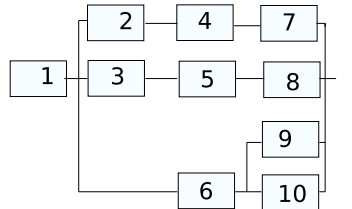
Основной задачей теории надежности является определение надежности системы по надежности составляющих ее элементов. При расчете надежности на предварительном этапе строится структура надежности рассматриваемой системы. Пусть система состоит из  $n$  элементов, для которых заданными являются функции надежности  $p_i(t)$  и отказа  $q_i(t)$ ,  $i=1, \dots, n$ . (вероятности безотказной работы и возникновения отказа соответственно). Требуется определить вид функции надежности  $p_c(t)$  исследуемой системы и вычислить ее значения при  $t \in [0, \tau]$  и определить среднее время безотказной работы.

При смешанном соединении элементов предполагается, что в системе можно выделить участки с последовательным и с параллельным соединением элементов. Такой подход позволяет осуществить декомпозицию сложной системы на блоки, для которых по известным соотношениям (2.1)...(2.6) из предыдущей работы могут быть получены аналитические выражения для показателей надежности блоков. Функция надежности всей сложной системы может быть получена в ходе последующей последовательной свертки результатов расчета надежности блоков, субблоков, подсистем и т.п., полученных на предыдущих этапах с помощью выражений (2.1)...(2.6). Вид функции надежности  $P_c(t)$  строится путем декомпозиции структуры системы на такие участки и использования для них выражений вида (2.1), (2.2) и (2.4), (2.5). Исходными данными для расчетов являются: структурная схема, приведенная в таблице 3.1 и три варианта значений интенсивностей отказов элементов структурной схемы, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.1

Варианты индивидуальных заданий

№ п.п.	Схема системы	№ п.п.	Схема системы
1		11	
2		12	
3		13	
4		14	
5		15	

№ п.п.	Схема системы	№ п.п.	Схема системы
6		16	
7		17	
8		18	
9		19	
10		20	

Интенсивность отказов элементов

$i$	$\lambda_i, \text{ час}^{-1}$			
	1	2	3	4
1	1/100	1/200	1/500	1/200
2	1/200	1/300	1/200	1/100
3	1/300	1/400	1/200	1/200
4	1/400	1/400	1/400	1/300
5	1/500	1/500	1/300	1/500
6	1/300	1/200	1/100	1/100
7	1/300	1/300	1/200	1/400
8	1/100	1/100	1/500	1/300
9	1/200	1/200	1/300	1/500
10	1/100	1/300	1/200	1/400
11	1/400	1/100	1/300	1/400
$\lambda$	1/400	1/200	1/300	1/500
Вариант	1–5	6–10	11–15	16–20

### 3. Порядок выполнения работы

Выполнение данной лабораторной работы включает в себя определение показателей надежности заданного варианта структурной схемы системы и анализ влияния на надежность системы надежности ее элементов. Выполнение работы включает: состоящих из следующих этапов:

Изучение методики расчета надежности систем.

Для заданного индивидуального варианта структуры системы вывести формулы для вычисления функций  $p_c(t)$ ,  $q_c(t)$  и  $T_c$  с диалоговым вводом значений  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . (значения интенсивностей отказов выбираются из таблицы 2 исходных данных согласно графе «Вариант»).

Примечание: при разработке программного обеспечения по расчету надежности заданного варианта системы использовать процедуры по расчету надежности для последовательного и параллельного соединения элементов из работы №2.

Провести расчеты показателей надежности заданной системы для 3 вариантов значений интенсивностей отказов  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , в том числе для варианта  $\lambda_i = \lambda = \text{const}$ , соответствующего случаю равно-

надежных элементов. Так, если номер индивидуального варианта – 7, то в качестве первого набора интенсивностей отказов используйте значения  $\lambda_i$  из столбца №2 таблицы 2, в качестве второго – равнонадежные значения  $\lambda_i = \lambda$ , взятые из пересечения столбца №2 со строкой « $\lambda$ ». В качестве третьего набора используйте значения  $\lambda_i$ , расположенных справа от Вашего столбца (т.е. из столбца №3). Для индивидуального варианта 16 . . . 20 в качестве третьего набора значений  $\lambda_i$  следует использовать столбец №1. Результаты расчетов целесообразно приводить в виде таблиц и соответствующих графиков.

$$T_c = \dots$$

$t$ , час	$p_1(t)$	$q_1(t)$	$p_2(t)$	$q_2(t)$	...	$q_n(t)$	$p_c(t)$	$q_c(t)$

1. Постановка задачи.

2. Исходные данные для трех вариантов интенсивностей отказов элементов системы

3. Индивидуальный вариант схемы соединения элементов, приведенный к виду, удобному для декомпозиции, этапы декомпозиции в виде структурных схем и соответствующих аналитических выражений.

4. Конечная декомпозиция схемы соединения элементов согласно соотношениям (8)-(13).

5. Семейство графиков  $p_c(t)$  (3 шт.).

6. Семейство графиков  $q_c(t)$  (3 шт.).

7. Вычисленное значение наработки на отказ  $T_c$  (3 шт.).

8. Количественно-обоснованное заключение по следующим вопросам:

а) как влияет равнонадежность элементов на общую надежность системы?

б) какие элементы системы являются критическими с точки зрения ее надежности?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Исследование эффективности применения общего и отдельного структурного резервирования для повышения надежности систем

Цель работы: 1. Ознакомиться с различными видами структурного резервирования, применяемыми для обеспечения заданных значений надежности систем. 2. Получить навыки расчета показателей надежности сложных систем с различными видами резервирования. 3. На основе сравнительного анализа оценить эффективность применения общего и отдельного структурного резервирования.

#### 2. Методы расчета показателей надежности

Классификация различных видов структурного резервирования может быть осуществлена по целому ряду признаков:

- по схеме включения резерва (общее, отдельное резервирование и смешанное резервирование);
- по однородности резервирования (однородное и смешанное);
- по состоянию резерва (постоянное (горячее), облегченное (теплое) и холодное (не нагруженный резерв));
- по способу включения резерва (резервирование замещением, скользящее и фиксированное);
- по характеру восстановления резерва (с восстановлением и без восстановления).

Среди многочисленных видов структурного резервирования наиболее широкое практическое применение нашли общее и отдельное резервирование с постоянно включенным (горячим) резервом. Структурные схемы систем с общим и отдельным резервированием приведены на рис. 4.1 и рис. 4.2 соответственно. Приведем основные соотношения для показателей надежности резервированных систем.

Структурное резервирование (с применением резервных элементов) осуществляется путем введения в структуру объекта дополнительных элементов, выполняющих функции основных в случае их отказа.

Основной характеристикой структурного резервирования является кратность - отношение числа резервных элементов к числу основных, выраженное несокращенной дробью. Резервирование одного основного элемента одним резервным (с кратностью 1:1) называется дублированием. Практически любой вид структурного резервирования сводится к замене одного или группы последовательно соединенных элементов группой с параллельным соединением. Даже при высокой надежности элементов надежность системы с

последовательным соединением оказывается низкой и не превышает надежности самого ненадежного элемента. Это не позволяет создать высоконадежную систему с основным соединением из высоконадежных элементов. Структурное резервирование позволяет преодолеть это ограничение - увеличивая число резервных элементов, можно создать систему с требуемой надежностью.

Для оценки эффективности того или иного вида резервирования используют понятие выигрыша в надежности, который определяется отношением показателя надежности резервированной системы к соответствующему показателю нерезервированной, основной системы. Различают выигрыш по вероятности безотказной работы

$$G_p(t) = P_{рез}(t)/P_o(t),$$

выигрыш по вероятности возникновения отказа

$$G_q(t) = Q_{рез}(t)/Q_o(t),$$

и выигрыш по вредней наработке на отказ

$$G_T = T_{рез}/T_o.$$

В общем случае при выборе способа для повышения надежности необходимо исходить из условия обеспечения максимального эффекта. В качестве критерия эффективности той или иной разновидности наряду с показателями надежности могут использоваться конструктивные, технологические, производственные или экономические показатели.

Следует отметить, что все ниже приведенные зависимости для расчета надежности при различных видах структурного резервирования не учитывают надежности коммутирующих устройств, обеспечивающих перераспределение нагрузки между основными и резервными элементами. Предполагается, что случайное время до отказа элементов распределено по экспоненциальному закону. При выполнении окончательных расчетов надежности резервированных систем в необходимо учитывать надежность аппаратуры встроенного контроля. Надежность последней может быть учтена путем включения в структурную схему надежности последовательно с резервированной группой элемента, соответствующего аппаратуре встроенного контроля.

Расчет систем с нагруженным резервированием без восстановления осуществляется по формулам для последовательного и параллельного соединений элементов, приведенных в работе №2. При этом считается, что надежность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного в основное состояние.

В случае общего резервирования с постоянно включенным резервом, приведенного на рис. 4.1, основная система состоит из  $n$  –

элементов  $O_1, O_2, \dots, O_n$ . Каждая из  $m$  резервных систем включает в себя также  $n$  элементов  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . Основная и резервные системы имеют одинаковую надежность. Кратность такой схемы резервирования  $1:m$ , ее отказ наступает при отказе всех  $m+1$  систем: основной и  $m$  резервных. В этом случае вероятность безотказной работы резервированной системы будет определяться выражением:

$$P_{рез}(t) = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i(t)\right)^{m+1}, \quad (4.1)$$

где  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента в течение времени  $t$ ;  $n$  – число элементов основной или любой резервной системе;  $m$  – число резервных систем.

Если время до отказа основной и резервных систем распределено по экспоненциальному закону, то в этом случае вероятность безотказной работы:

$$P_{рез}(t) = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_o t}\right)^{m+1}, \quad (4.2)$$

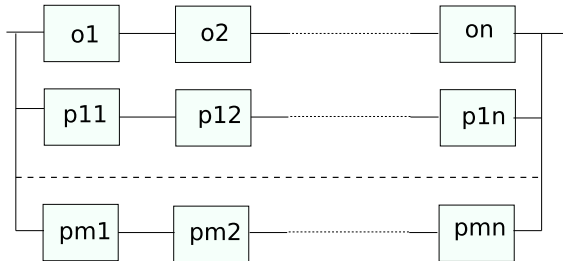


Рис.4.1 Общее резервирование с постоянно включенным (горячим) резервом

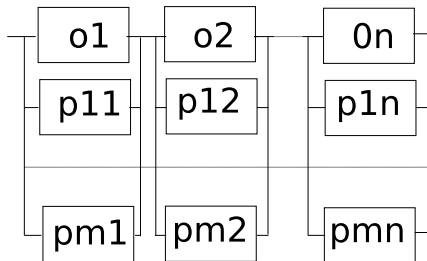


Рис. 4.2 Раздельное резервирование с постоянно включенным (горячим) резервом

Последнее выражение позволяет решить задачу о необходимом числе резервных систем  $m$ , которое обеспечит заданную вероятность безотказной работы резервированной системы  $P_{\text{рез зад}}$  при определенной интенсивности отказов ее элементов ( $\lambda_{\text{зад}}$ ). Также может быть решена обратная задача – задача о потребной надежности элементов ( $\lambda_{\text{зад}}$ ) при фиксированном числе резервных систем  $m$  для обеспечения заданной надежности резервированной системы  $P_{\text{рез зад}}$ .

Средняя наработка на отказ при экспоненциальном распределении будет равна:

$$T_{\text{рез}} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_0 \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}, \quad (4.3)$$

где  $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  – интенсивность отказов основной системы или любой из резервных систем;  $T_0$  – средняя наработка до отказа основной системы или любой из резервных.

Структурная схема для расчета надежности отдельного резервирования с постоянно включенным резервом представлена на рис. 4.2. При отдельном резервировании каждый элемент основной цепи  $O_i$  имеет свои резервные элементы  $P_i$  и в общем случае свою кратность резервирования. В частном случае кратность резервирования может быть и одинаковой для всех основных элементов. При расчете надежности таких резервированных систем в случае нагруженного резерва можно использовать формулы (2.5) и (2.6) из лабораторной работы №2 для элементов основной цепи, а затем, определять показатели надежности всей системы в целом, используя выражение

$$P(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t), \quad \lambda(t) = \sum_{i=1}^k \lambda_i,$$

где  $P_i(t)$ ,  $\lambda_i(t)$  – вероятность безотказной работы и интенсивность отказов  $i$ -го резервированного элемента соответственно;  $k$  – число последовательно соединенных резервированных элементов.

Вероятность безотказной работы системы с отдельным резервированием определяется:

$$P_{\text{рез}}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - p_i(t))^{m_i+1}). \quad (4.4)$$

При экспоненциальном распределении вероятность безотказной работы резервированной системы будет равна:

$$P_{рез}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - e^{-\lambda_o t})^{m_i + 1}). \quad (4.5)$$

При равной надежности основных и резервных элементов, а также одинаковой кратности резервирования вероятность безотказной работы резервированной системы будет равна:

$$P_{рез}(t) = (1 - (1 - e^{-\lambda_o t})^{m_i + 1})^n. \quad (4.6)$$

Средняя наработка на отказ такой резервированной системы определяться:

$$T_{рез} = \int_0^{\infty} P_{рез}(t) dt = \frac{n+1}{\lambda_o(m+1)} \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i(v_i+1) \cdot \dots \cdot (v_i+1)}, \quad (4.7)$$

где  $v_i = \frac{i+1}{m+1}$ .

Структурное резервирование позволяет повысить надежность технической системы практически до любого заданного уровня. Многообразие видов структурного резервирования определяет актуальность решения задачи оптимизации структурного резервирования. При этом на практике часто возможности резервирования ограничиваются имеющимися ресурсами. Поэтому чаще всего ставится задача не максимального увеличения надежности, а обеспечение максимально возможной или достижение заданной надежности системы при минимальных или предельно допустимых затратах. Задачи оптимального резервирования сводятся к задачам двух типов: определению числа резервных элементов или систем, обеспечивающих заданную надежность при минимальном расходовании ресурсов (прямая основная задача оптимизации), или обеспечивающих максимальную надежность системы при ограниченных ресурсах (обратная основная задача оптимизации). При этом в качестве показателей надежности могут использоваться вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, средняя наработка и другие характеристики, а в качестве ресурса - стоимость, масса, энергопотребление, габаритные размеры или число резервных элементов или систем. При отсутствии ограничений решение задачи оптимального структурного резервирования может заключаться в определении элемента или элементов, резервирование которых наиболее целесообразно для максимального эффекта в

виде увеличения надежности или выигрыша надежности. При основном соединении таким элементом является самый ненадежный элемент. В остальных случаях требуются дополнительные расчеты для проведения дополнительного анализа возможных вариантов резервирования.

Варианты исходных данных для выполнения настоящей лабораторной работы приведены в таблице 4.1. Порядковый номер индивидуального задания соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале посещаемости занятий. Индивидуальное задание содержит: номер задания, структурную схему надежности основной системы, значения интенсивностей отказов элементов основной системы, кратность общего и отдельного резервирования.

Таблица 4.1

Индивидуальные задания

№ варианта	Структура основной системы	Интенсивность отказов элементов, $\lambda_i \cdot 10^5, \text{ час}^{-1}$						кратность резервирования	
		Номер элемента схемы							
		1	2	3	4	5	6		7
1		1	2	3	4	9	8	7	2, 4, 5
2		9	8	7	1	3	2	1	1, 2, 3
3		5	6	4	3	2	1	1	1, 3, 4

Продолжение табл. 4.1

№ варианта	Структура основной системы	Интенсивность отказов элементов, $\lambda_i \cdot 10^5, \text{ час}^{-1}$							кратность резервирования
		Номер элемента схемы							
		1	2	3	4	5	6	7	
4		1	2	3	4	2	4	6	3, 4, 5
5		1	3	2	1	3	1	4	1, 2, 4
6		2	2	2	2	2	4	1	2, 4, 5
7		1	1	4	5	1	1	1	1, 2, 3
8		3	2	1	3	2	1	7	1, 3, 4
9		4	3	4	3	2	1	3	3, 4, 5

Продолжение табл. 4.1

№ варианта	Структура основной системы	Интенсивность отказов элементов, $\lambda_i \cdot 10^5, \text{ час}^{-1}$							кратность резервирования
		Номер элемента схемы							
		1	2	3	4	5	6	7	
10		3	1	1	2	1	2	2	1, 2, 4
11		1	2	3	4	9	8	7	2, 4, 5
12		9	8	7	1	3	2	1	1, 2, 3
13		5	6	4	3	2	1	1	1, 3, 4
14		1	2	3	4	2	4	6	3, 4, 5
15		1	3	2	1	3	1	4	1, 2, 4



Окончание табл. 4.1

№ варианта	Структура основной системы	Интенсивность отказов элементов, $\lambda_i \cdot 10^5, \text{ час}^{-1}$							кратность резервирования
		Номер элемента схемы							
		1	2	3	4	5	6	7	
16		2	2	2	2	2	4	1	2, 4, 5
17		1	1	4	5	1	1	1	1, 2, 3
18		3	2	1	3	2	1	7	1, 3, 4
19		4	3	4	3	2	1	3	3, 4, 5
20		3	1	1	2	1	2	2	1, 2, 4

В ходе выполнения исследований следует:

- оценить эффективность общего резервирования по сравнению с отдельным при одинаковой кратности;
- дать количественную оценку влияния кратности резервирования на его эффективность;
- дать количественную оценку влияния времени функционирования системы на эффективность общего и отдельного резервирования;
- выявить закономерности эффективности использования элементарного резервирования к элементам с различной интенсивностью отказов.

Содержание отчета по работе:

1. Индивидуальное задание с приведением схемы расчета надежности системы с указанием интенсивностей отказов элементов системы.
2. Краткие сведения из теории оценки эффективности различных видов резервирования.
3. Структурные схемы для расчета показателей надежности при различных видах резервирования и различной кратности.
4. Результаты расчетов показателей надежности резервированной системы, выигрыша надежности в виде таблиц и графиков зависимости от времени для различных видов резервирования.
5. Мотивированное заключение о эффективности использования различных видов резервирования по результатам расчета выигрышей надежности по вероятности безотказной работы и по средней наработке на отказ.
6. Обоснованные рекомендации по выбору кратности общего и отдельного резервирования для обеспечения заданных показателей безотказности системы.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 .....	3
Лабораторная работа №2 .....	16
Лабораторная работа №3 .....	20
Лабораторная работа №4 .....	25