

# ПРИЛОЖЕНИЕ 7

## Примеры и задачи по расчету надежности многофункциональных систем при непрерывном пополнении запасов в комплекте ЗИП-О

### Пример П7.1

Последовательная система состоит из трех устройств, имеющих среднюю наработку до отказа  $T_{cp1} = 20\ 000$  час,  $T_{cp1} = 15\ 000$  час,  $T_{cp1} = 25\ 000$  час. Для повышения надежности предусмотрен комплект ЗИП с непрерывным пополнением запасов и средним временем доставки  $T_0 = 2$  недели = 336 час. Найти среднюю наработку до отказа и вероятность безотказной работы системы за время  $t = 1$  год (8736 час), 2 года и 3 года при наличии в комплекте ЗИП по одной запасной части каждого типа. Подобрать комплект ЗИП, который обеспечивает ВБР в течение 3 лет не менее 0,95.

### Решение

По условиям задачи  $A_1 = k_1 \lambda_1 T_0 = 0,0168$ ,  $A_2 = k_2 \lambda_2 T_0 = 0,0224$ ,  $A_3 = k_3 \lambda_3 T_0 = 0,01344$ ,  $L_1 = L_2 = L_3 = 1$ ,  $t = 8736$  час, (16732, 25128). Вероятность безотказной работы находим по приближенной формуле (7.1) для модели Н1, среднюю наработку до отказа — по формулам (7.10). Для оценки погрешности формулы (7.1) точное значение ВБР при  $L = 1$  находим по формуле:

$$P(t, L) = \frac{s_1 e^{-s_0 t/T_0} - s_0 e^{-s_1 t/T_0}}{s_1 - s_0}, s_{0,1} = 0,5(1 + 2A \mp \sqrt{1 + 4A}), A = k \lambda T_0.$$

Результаты расчетов приведены в табл. П7.1 и П7.2.

Таблица П7.1. Модель Н1.  $T_0 = 2$  недели

$i$	$T_{cpi}$	$A_i$	$L_i$	$t/T_0$	$k_i \lambda_i \bar{T}_{0i}(L_i)$	$P(t, L_i)$	$P_{np}(t, L_i)$	$\delta Q \%$
1	20000	0,0168	1	26	61,52	0,99319	0,99293	-3,83
2	15000	0,0224	1	26	46,64	0,98804	0,98759	-3,75
3	25000	0,01344	1	26	76,40	0,99561	0,99544	-3,87
$C$	6383	0,05264	3	26		0,97700	0,97613	-3,77

Таблица П7.2. Зависимость от среднего времени доставки и времени работы

$T_0$ , ч	$t$ , лет	$L_1$	$L_i$	$L_i$	$k\lambda\bar{T}_{0c}(L)$	$P(t,L)$	$P_{np}(t,L)$	$\delta Q$ %
336	1	1	1	1	41,39	0,97700	0,97613	-3,77
672	1	1	1	1	10,73	0,91393	0,91099	-3,42
1008	1	1	1	1	4,94	0,82192	0,81660	-2,99
336	2	1	1	1	20,70	0,95367	0,95283	-1,81
672	2	1	1	1	5,36	0,83248	0,82990	-1,54
1008	2	1	1	1	2,47	0,67081	0,66683	-1,21
336	3	1	1	1	13,80	0,93090	0,93009	-1,17
672	3	1	1	1	3,58	0,75829	0,75603	-0,93
1008	3	1	1	1	1,65	0,54748	0,54453	-0,65
336	1	1	2	1	84,97	0,98873	0,98830	-3,80
336	2	1	2	1	42,48	0,97716	0,97674	-1,84
336	3	1	2	1	28,32	0,96572	0,96531	-1,20
336	1	2	2	2	6353	—	0,99984	—
336	2	2	2	2	3177	—	0,99969	—
336	3	2	2	2	2118	—	0,99953	—

Из таблиц следует, что приближенная формула (7.1), использующая только одну экспоненту, дает весьма высокую точность — ошибка не более 4 % по вероятности отказа. По таблицам можно проследить влияние на показатели надежности системы среднего времени доставки, количества ЗЧ, времени функционирования модели Н1.

## Пример П7.2

В однородной последовательной многофункциональной системе (модель МН1) для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа системы равна 800–8000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 800 час. Время функционирования совпадает со средним временем доставки. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $A = k\lambda\bar{T}_0 = 0,1\dots 1$ ,  $B = A-5A$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.9), (7.10), (7.13)–(7.14), (7.17) моделей Н1 и МН1. Приближенное значение средней наработки до отказа находим по формуле (7.16). Результаты расчетов показателей безотказности приведены в табл. П7.3–П7.8 и на рис. П7.1 и П7.2.

Таблица П7.3. Модель Н1.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$T_{cp}(H1)$	$T_{cp,np}(H1)$	$P(t, H1)$	$P_{np}(t, H1)$	$T_{cp}(П1)$	$P(t, П1)$	$\delta Q \%$
0,1	12,00	11,00	0,99170	0,99095	21,34	0,99532	-9,05
0,2	7,00	6,00	0,97183	0,96722	11,34	0,98248	-16,4
0,3	5,33	4,33	0,94530	0,93311	8,02	0,96306	-22,3
0,4	4,50	3,50	0,91495	0,89200	6,36	0,93845	-27,0
0,5	4,00	3,00	0,88250	0,84648	5,36	0,90980	-30,7
0,6	3,67	2,67	0,84905	0,79852	4,70	0,87810	-33,5
0,8	3,25	2,25	0,78180	0,70078	3,88	0,80879	-37,1
1	3,00	2,00	0,71653	0,60653	3,39	0,73576	-38,8

Таблица П7.4. Модель Н1.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$k\lambda T_{cp}(H1)$	$k\lambda T_{cp,np}(H1)$	$P(t, H1)$	$P_{np}(t, H1)$	$k\lambda T_{cp}(П1)$	$P(t, П1)$	$\delta Q \%$
0,1	323,0	121,0	0,99969	0,99917	646,58	0,99985	-166,9
0,2	88,0	36,0	0,99773	0,99446	174,09	0,99885	-144,0
0,3	43,0	18,78	0,99305	0,98415	83,27	0,99640	-128,0
0,4	26,75	12,25	0,98516	0,96787	50,36	0,99207	-116,5
0,5	19,00	9,00	0,97403	0,94596	34,62	0,98561	-108,1
0,6	14,67	7,11	0,95992	0,91909	25,79	0,97688	-101,9
0,8	10,19	5,06	0,92448	0,85383	16,64	0,95258	-93,5
1	8,00	4,00	0,88250	0,77880	12,16	0,91970	-88,2

Таблица П7.5. Модель МН1.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}(MН1)$	$k\lambda T_{cp,np}(MН1)$	$P(t, MН1)$	$P_{np}(t, MН1)$	$k\lambda T_{cp}(MП1)$	$P(t, MП1)$
0,1	0,2	6,50	6,00	0,98473	0,98347	11,01	0,99094
0,1	0,3	4,67	4,33	0,97880	0,97719	7,57	0,98685
0,1	0,4	3,75	3,50	0,97369	0,97183	5,85	0,98301
0,1	0,5	3,20	3,00	0,96923	0,96722	4,82	0,97941
0,1	0,6	2,83	2,67	0,96532	0,96319	4,14	0,97604
0,2	0,4	4,00	3,50	0,95123	0,94446	6,02	0,96714
0,2	0,6	3,00	2,67	0,93551	0,92774	4,25	0,95369
0,2	0,8	2,50	2,25	0,92312	0,91495	3,37	0,94186

Таблица П7.5 (окончание)

$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}(MH1)$	$k\lambda T_{cp,np}(MH1)$	$P(t, MH1)$	$P_{np}(t, MH1)$	$k\lambda T_{cp}(МП1)$	$P(t, МП1)$
0,2	1	2,20	2,00	0,91310	0,90484	2,84	0,93144
0,2	1,2	2,00	1,83	0,90484	0,89665	2,50	0,92224
0,8	4,8	1,375	1,21	0,55888	0,51578	1,357	0,53755
1	5	1,40	1,20	0,48954	0,43460	1,367	0,45816

Таблица П7.6. Модель МН1.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$ 

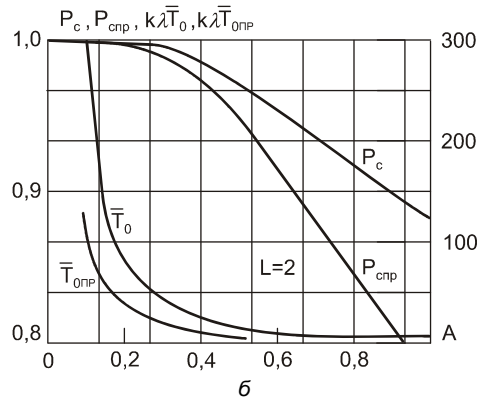
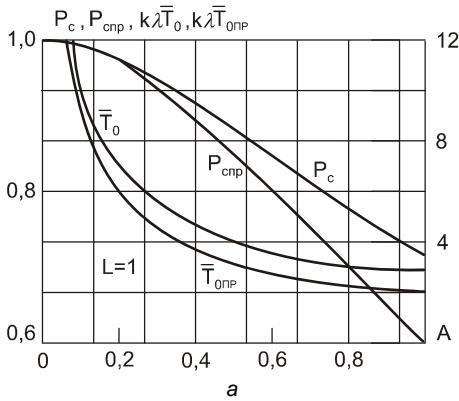
$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}(MH1)$	$k\lambda T_{cp,np}(MH1)$	$P(t, MH1)$	$P_{np}(t, MH1)$	$k\lambda T_{cp}(МП1)$	$P(t, МП1)$
0,1	0,2	87,00	36,00	0,998851	0,99723	169,83	0,999411
0,1	0,3	41,67	18,78	0,997603	0,99469	79,26	0,998739
0,1	0,4	25,25	12,25	0,996047	0,99187	46,79	0,997864
0,1	0,5	17,40	9,00	0,994269	0,98895	31,41	0,996819
0,1	0,6	13,00	7,11	0,992337	0,98604	22,86	0,995631
0,2	0,4	25,75	12,25	0,992263	0,98381	47,96	0,995835
0,2	0,6	13,33	7,11	0,985112	0,97227	23,44	0,991486
0,2	0,8	8,69	5,06	0,977241	0,96126	14,46	0,986222
0,2	1	6,40	4,00	0,969233	0,95123	10,13	0,980365
0,2	1,2	5,08	3,36	0,96142	0,94223	7,68	0,974160
1	5	1,92	1,44	0,594025	0,49935	1,89	0,562599
1	6	1,75	1,36	0,564718	0,47965	1,70	0,525681

Таблица П7.7. Модель Н1.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

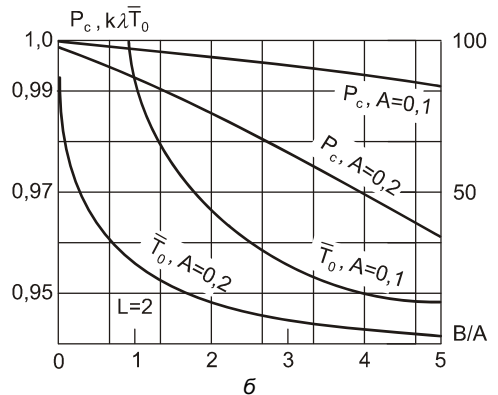
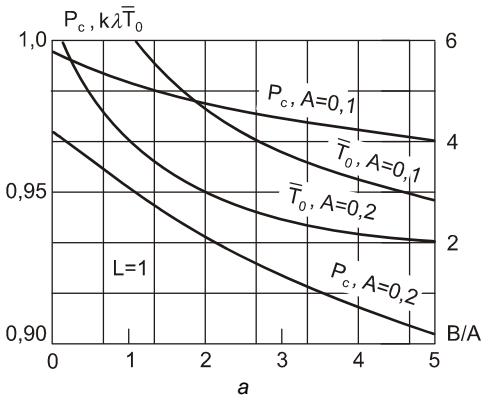
$A$	$k\lambda T_{cp}(H1)$	$k\lambda T_{cp,np}(H1)$	$P(t, H1)$	$P_{np}(t, H1)$	$k\lambda T_{cp}(П1)$	$P(t, П1)$
0,025	42,0	41,0	0,99940	0,99939	81,335	0,99969
0,05	22,0	21,0	0,99773	0,99762	41,336	0,99879
0,075	15,3	14,3	0,99512	0,99478	28,004	0,99732
0,1	12,0	11,0	0,99170	0,99095	21,339	0,99532
0,125	10,0	9,0	0,98758	0,98621	17,340	0,99281
0,15	8,7	7,7	0,98284	0,98062	14,675	0,98981
0,2	7,0	6,0	0,97183	0,96722	11,345	0,98248
0,25	6,0	5,0	0,95919	0,95123	9,347	0,97350

**Таблица П7.8.** Модель МН1.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$

$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}(H1)$	$k\lambda T_{cp,np}(H1)$	$P(t, H1)$	$P_{np}(t, H1)$	$k\lambda T_{cp}(П1)$	$P(t, П1)$
0,025	0,2	6,125	6,000	0,99593	0,99999	10,760	0,99768
0,05	0,3	4,500	4,333	0,98895	0,99989	7,459	0,99331
0,075	0,4	3,688	3,500	0,97987	0,99964	5,810	0,98715
0,1	0,5	3,200	3,000	0,96923	0,99917	4,823	0,97941
0,125	0,6	2,875	2,667	0,95745	0,99846	4,166	0,97031
0,15	0,8	2,438	2,250	0,94032	0,99745	3,328	0,95564
0,2	1	2,200	2,000	0,91310	0,99446	2,844	0,93144
0,25	1,2	2,042	1,833	0,88475	0,99005	2,524	0,90449



**Рис. П7.1.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН1) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$



**Рис. П7.2.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН1) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.3–П7.8 и рис. П7.1 и П7.2 следует:

- если взять в модели МН1 среднее время доставки ЗЧ равным периоду пополнения в модели МП1, то средняя наработка до отказа системы в МН1 будет уступать вдвое или более средней наработке в МП1. Это объясняется тем, что при экспоненциальном распределении времени доставки стандартное отклонение равно среднему времени доставки, тогда как для периодического пополнения оно равно нулю;
- с увеличением размера дополнительной подсистемы (с увеличением  $n-k$ ) различия в значениях средней наработки уменьшаются. Начиная с некоторого значения  $C$ , значение средней наработки в МН1 может даже стать больше, чем в модели МП1 (см. табл. П7.3 и П7.4);
- преимущество непрерывного пополнения начинает проявляться при уменьшении стандартного отклонения или при уменьшении среднего времени доставки по сравнению с периодом пополнения. Так при  $L = 1$  уменьшение среднего времени доставки в четыре раза увеличивает среднюю наработку системы до значения, вдвое большего, чем в модели МП1;
- расчет по формулам приближенной методики (7.16)–(7.17) дает большую погрешность. Средняя наработка до отказа оказывается заниженной в 1,5 раза при  $L = 1$  и в 2–2,5 раза при  $L = 2$ . Вероятность отказа, напротив, завышена. Относительная погрешность достигает 39 % при  $L = 1$  и 167 % при  $L = 2$ ;
- количество аппаратуры в ДПС заметно влияет на показатели безотказности ОПС. Так при  $A = 0,1$  и изменении  $B$  от 0 до  $5A$  средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 12 до 2,83 при  $L = 1$  и от 323 до 13 при  $L = 2$ .

## Пример П7.3

Дублированная система состоит из двух структурных элементов в нагруженном режиме, имеющих среднюю наработку до отказа 10 000 час. Для обеспечения надежности системы создается комплект ЗИП с одной запасной частью и непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки ЗЧ, равном  $T_0 = 6$  недель = 1008 час. Найти вероятность безотказной работы системы для времени функционирования 1, 2 и 3 года (1 год = 8736 час), среднюю наработку на отказ и коэффициент готовности системы. Оценить влияние времени доставки на показатели надежности. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 0,5$  года.

## Решение

По исходным данным определяем:  $2\rho_1 = k\lambda\bar{T}_0 = 2*1008/10\ 000 = 0,2016$  при среднем времени доставки 6 недель,  $2\rho_1 = 0,1344$  и  $0,0672$  при среднем времени доставки 4 и 2 недели. Среднее число отказов за 0,5 года равно  $A = 8736/10\ 000 = 0,8736$ , время функционирования  $t = 8736$ , 17 472 или 26 208 час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 1,7472$ , 3,4944 или 5,2416. Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.20), (7.23). Приближенные значения находят по формулам (7.25)–(7.27). Для модели П2 используют формулы *разд. 5.2*. Результаты расчетов приведены в табл. П7.9.

Таблица П7.9. Модель Н2.  $L = 1$ 

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t, L)$	$K_{zc}$	$k\lambda T_{cp, np}$	$K_{zc, np}$	$P_c(t, 1, \Pi 2)$
0,0672	1,7472	964,2	0,99819	0,99998	949,3	0,999999	0,93583
0,0672	3,4944	964,2	0,99638	0,99998	949,3	0,999999	0,87578
0,0672	5,2416	964,2	0,99458	0,99998	949,3	0,999999	0,81958
0,1344	1,7472	262,6	0,99337	0,99982	255,2	0,999984	0,93583
0,1344	3,4944	262,6	0,98678	0,99982	255,2	0,999984	0,87578
0,1344	5,2416	262,6	0,98024	0,99982	255,2	0,999984	0,81958
0,2016	1,7472	127,2	0,98636	0,99944	122,3	0,999931	0,93583
0,2016	3,4944	127,2	0,97291	0,99944	122,3	0,999931	0,87578
0,2016	5,2416	127,2	0,95964	0,99944	122,3	0,999931	0,81958

Из таблицы следует, что при непрерывном пополнении и среднем времени доставки  $T_0 = 6$  недель вероятность безотказной работы системы существенно выше, чем при периодическом пополнении с периодом пополнения 0,5 года. Если увеличить число ЗЧ до двух, то  $P_c(t, 2, \Pi 2)$  принимает значения 0,98674, 0,97366 и 0,96074 для  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно, что очень близко к значениям ВБР при непрерывном пополнении и  $T_0 = 6$  недель. Это значит, что непрерывное пополнение со средним временем доставки 6 недель и одной запасной части эквивалентно периодическому пополнению с периодом 0,5 года и двумя запасными частями.

## Пример П7.4

В однородной дублированной многофункциональной системе (модель МН2) для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка между отказами элементов системы равна 800–12 000 час (количество элементов  $k = 4r$ ). В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Время функционирования совпадает со средним временем доставки. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $A = k\lambda\bar{T}_0 = 0,2\dots 3$ ,  $C = 5A\dots 8A$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.20), (7.23), (7.25)–(7.27). Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.10–П7.16 и на рис. П7.3 и П7.4.

Таблица П7.10. Модель Н2.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$K_{эзип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,нр}$	$k\lambda T_{cp}(П2)$	$K_{эс}(H2)$	$K_{эс,нр}(H2)$	$K_{эс}(П2)$	$\delta T \%$
0,2	0,9836	0,0083	129,00	124,00	339,66	0,99945	0,999933	0,99985	-3,88
0,4	0,9459	0,0278	41,50	38,99	95,93	0,99641	0,999269	0,99891	-6,05
0,6	0,8989	0,0533	23,44	21,76	48,04	0,98999	0,997439	0,99665	-7,18
0,8	0,8491	0,0818	16,50	15,22	30,35	0,98027	0,994281	0,99277	-7,74
1	0,8000	0,1116	13,00	11,96	21,75	0,96774	0,989925	0,98715	-7,98
1,2	0,7534	0,1416	10,94	10,06	16,85	0,95300	0,984622	0,97976	-8,04
1,6	0,6701	0,2002	8,69	8,00	11,69	0,91914	0,972185	0,95999	-7,96
2	0,6000	0,2554	7,50	6,92	9,11	0,88235	0,958608	0,93449	-7,80
3	0,4706	0,3769	6,11	5,65	6,31	0,79070	0,925075	0,85449	-7,49

Таблица П7.11. Модель Н2.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$K_{эзип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,нр}$	$k\lambda T_{cp}(П2)$	$K_{эс}(H2)$	$K_{эс,нр}(H2)$	$K_{эс}(П2)$	$\delta T \%$
0,2	0,99891	0,001	1900	1834	6897,9	0,99997	0,9999997	0,999994	-3,47
0,4	0,99284	0,004	302,5	281,5	990,12	0,99964	0,9999872	0,999915	-6,94
0,6	0,98018	0,010	114,4	102,9	336,43	0,99852	0,9999017	0,999617	-10,10
0,8	0,96131	0,020	61,56	53,68	162,52	0,99615	0,9996256	0,99892	-12,80
1	0,93750	0,032	40,00	33,99	95,114	0,99225	0,9990228	0,997641	-15,03
1,2	0,91022	0,047	29,17	24,26	62,797	0,98671	0,9979822	0,995619	-16,82
1,6	0,85038	0,081	19,02	15,34	34,265	0,97095	0,9943808	0,988852	-19,36
2	0,78947	0,118	14,50	11,46	22,484	0,95000	0,9888273	0,977985	-20,96
3	0,65385	0,212	10,00	7,71	11,881	0,88511	0,9692987	0,933021	-22,93

Таблица П7.12. Модель Н2.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$K_{эзип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,нр}$	$T_{cp}(П2)$	$K_{эс}(H2)$	$K_{эс,нр}(H2)$	$K_{эс}(П2)$
0,025	0,9997	0,000152	6604	6564	19502	0,9999987	0,99999998	0,99985
0,05	0,9988	0,000595	1704	1684	4952	0,9999901	0,99999965	0,99891
0,075	0,9974	0,001306	781,8	768,4	2235	0,9999674	0,99999830	0,99665
0,1	0,9955	0,002268	454	444,0	1277	0,9999246	0,99999488	0,99277
0,125	0,9931	0,00346	300	292,0	830,2	0,9998563	0,99998811	0,98715
0,15	0,9903	0,004868	215	208,4	585,5	0,9997579	0,99997654	0,97976



Таблица П7.12 (окончание)

$A$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П2)$	$K_{zc}(H2)$	$K_{zc,np}(H2)$	$K_{zc}(П2)$
0,2	0,9836	0,008265	129	124,0	339,7	0,9994539	0,99993281	0,95999
0,25	0,9756	0,012346	88	84,00	224,2	0,9989848	0,99985126	0,93449
0,3	0,9665	0,017015	65	61,77	6,3	0,9983299	0,99972010	0,85449

Таблица П7.13. Модель Н2.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П2)$	$K_{zc}(H2)$	$K_{zc,np}(H2)$	$K_{zc}(П2)$
0,025	0,999997	1,27E-06	790765	787444	3126207	1,00000	1,00000	0,99999
0,05	0,99998	9,91E-06	101785	100924	397665	1,00000	1,00000	0,99992
0,075	0,999935	3,26E-05	31058	30662	119902	1,00000	1,00000	0,99962
0,1	0,999849	7,54E-05	13495	13264	51473	0,99999	1,00000	0,99892
0,125	0,999713	0,00014	7117	6964	26818	0,99999	1,00000	0,99764
0,15	0,999516	0,00024	4242,8	4133	15792	0,99999	1,00000	0,99562
0,2	0,998908	0,00055	1900	1834	6898	0,99997	1,00000	0,98885
0,25	0,997972	0,00102	1033	988	3656	0,99994	0,99999	0,97799
0,3	0,996665	0,00167	635,0	601,78	11,88	0,99988	0,99999	0,93302

Таблица П7.14. Модель МН2.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$C$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(МП2)$	$K_{zc}$	$K_{zc,np}$	$K_{zc}(МП2)$
0,1	0,2	0,98361	0,0041	249	245,0	2545,1	0,99986	0,99998	0,0041
0,1	0,3	0,96654	0,0057	180	179,3	877,4	0,99981	0,99997	0,0057
0,1	0,4	0,94595	0,0069	146	147,0	453,5	0,99977	0,99995	0,0069
0,1	0,5	0,92308	0,0080	125	127,9	281,2	0,99973	0,99994	0,0080
0,1	0,6	0,89888	0,0089	112	115,6	193,7	0,99969	0,99992	0,0089
0,2	0,3	0,84906	0,0113	93,7	91,2	127,9	0,99925	0,99987	0,0113
0,2	0,4	0,8	0,0139	76,0	75,0	81,8	0,99907	0,99981	0,0139
0,2	0,5	0,75342	0,0160	65,4	65,5	58,0	0,99893	0,99975	0,0160
0,2	0,6	0,68966	0,0178	58,3	59,3	41,933	0,99880	0,99970	0,0178
0,2	0,7	0,6	0,0192	53,3	55,0	27,026	0,99868	0,99964	0,0192

Таблица П7.15. Модель МН2.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$C$	$K_{эип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(\text{МП2})$	$K_{cc}(\text{МН2})$	$K_{cc,np}$	$K_{cc}(\text{МП2})$
0,1	0,2	0,99891	0,00027	3727	3665	52352	0,99999	1,000000	1,000000
0,1	0,3	0,99667	0,00056	1827	1799	12190	0,99999	1,000000	0,999999
0,1	0,4	0,99284	0,00090	1132	1117	4788	0,99998	0,999999	0,999997
0,1	0,5	0,98734	0,00127	796	788	2407	0,99997	0,999998	0,999991
0,1	0,6	0,98018	0,00167	606	602	1400	0,99996	0,999997	0,999981
0,2	0,3	0,99667	0,00111	932	901	713	0,99994	0,999999	0,999955
0,2	0,4	0,99284	0,00180	578	560	374	0,99991	0,999997	0,999885
0,2	0,5	0,98734	0,00255	407	395	227	0,99987	0,999994	0,999759
0,2	0,6	0,98018	0,00334	310	303	137	0,99983	0,999989	0,999511
0,2	0,7	0,97145	0,00414	249	245	70,5	0,99979	0,999983	0,998694

Таблица П7.16. Модель МН2.  $L = 1$ ,  $A = 0,4$ ,  $C = 2$ ,  $T_{cp} = 18,7$ ,  $T_{cp,np} = 22,576$ 

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{np}(t)$	$P_c(t, \text{МП2})$	$\delta_1 \%$	$\delta_2 \%$
0,08	0,99573	0,99646	0,99981	17,14	95,60
0,16	0,99148	0,99294	0,99867	17,11	84,40
0,24	0,98725	0,98943	0,99602	17,08	68,76
0,32	0,98303	0,98593	0,99158	17,05	50,34
0,4	0,97884	0,98244	0,98526	17,02	30,36
0,48	0,97466	0,97896	0,98508	16,99	41,11
0,56	0,97050	0,97550	0,98395	16,96	45,60
0,64	0,96635	0,97205	0,98134	16,93	44,53
0,72	0,96223	0,96861	0,97696	16,90	39,00
0,8	0,95812	0,96518	0,97074	16,87	30,129

$$\delta_1 = 100(P_{np}(t) - P_c(t))/(1 - P_c(t)), \delta_2 = 100(P_c(t, \text{МП2}) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$$

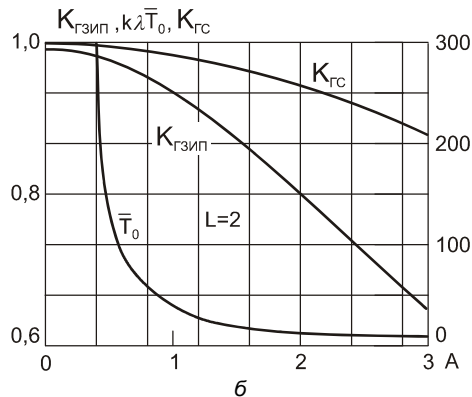
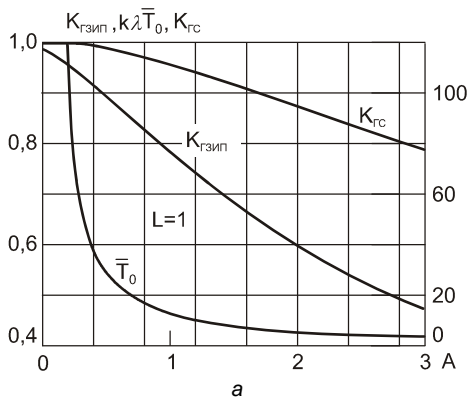


Рис. П7.3. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН2) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

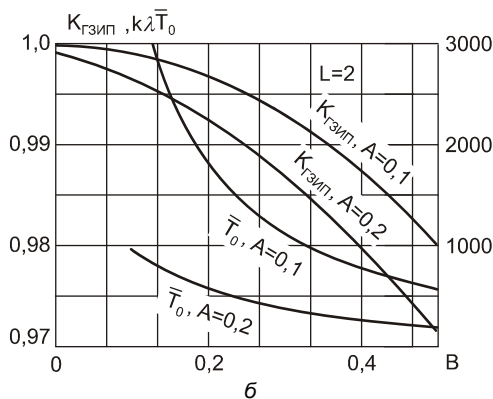
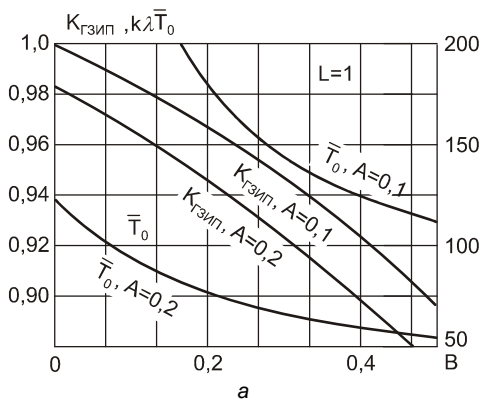


Рис. П7.4. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН2) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.10–П7.16 и рис. П7.3 и П7.4 следует:

- погрешность приближенной формулы (7.25) для расчета средней наработки в модели Н2 существенно меньше, чем в модели Н1. Она составляет 4–8 % при  $L = 1$  и 4–23 % при  $L = 2$ . Однако погрешность в расчете коэффициента готовности по-прежнему велика. Приближенная формула (7.27) дает завышенное значение, а коэффициент неготовности занижен в несколько раз;
- количество аппаратуры в ДПС заметно влияет на показатели безотказности ОПС. Так при  $A = 0,1$  и изменении  $B$  от 0 до  $4A$  средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 454 до 125 при  $L = 1$  и от 13 495 до 796 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;
- в моделях Н2 и МН2, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П2 и МП2 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.5

В однородной мажорированной многофункциональной системе (модель МНЗ) для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа между отказами элементов системы равна 800–12 000 час (количество элементов  $k = 6r$ ). В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Время функционирования совпадает со средним временем доставки. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $A = k\lambda\bar{T}_0 = 0,2\dots3$ ,  $C = 5A-8A$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или  $2$ . Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.30), (7.31), (7.33), (7.36). Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.17–П7.23 и рис. П7.5 и П7.6.

Таблица П7.17. Модель НЗ.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $k = n$

$A$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(ПЗ)$	$K_{zc}$	$K_{zc,np}$	$K_{zc}(ПЗ)$
0,2	0,9836	0,0055	98,50	93,25	256,87	0,99927	0,999910	0,99980
0,4	0,9459	0,0185	32,25	29,49	73,14	0,99522	0,999026	0,99856
0,6	0,8989	0,0355	18,50	16,57	36,91	0,98670	0,996588	0,99562
0,8	0,8491	0,0545	13,19	11,67	23,49	0,97387	0,992389	0,99062
1	0,8000	0,0744	10,50	9,22	16,94	0,95745	0,986612	0,98342
1,2	0,7534	0,0944	8,92	7,80	13,21	0,93830	0,979601	0,97406
1,6	0,6701	0,1334	7,17	6,25	9,27	0,89502	0,963254	0,94935
2	0,6000	0,1703	6,25	5,44	7,3	0,84906	0,945562	0,91807
3	0,4706	0,2513	5,17	4,49	5,16	0,73913	0,902535	0,82319

Таблица П7.18. Модель НЗ.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $k = n$

$A$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(ПЗ)$	$K_{zc}$	$K_{zc,np}$	$K_{zc}(ПЗ)$
0,2	0,99891	0,000364	1442,0	1375,7	5208,2	0,999964	1,00000	0,999992
0,4	0,99284	0,002394	232,63	211,4	752,62	0,999523	0,99998	0,999888
0,6	0,98018	0,006674	89,22	77,41	257,45	0,998022	0,99987	0,999498
0,8	0,96131	0,013154	48,64	40,51	125,19	0,994867	0,99950	0,998591
1	0,93750	0,021513	32,00	25,74	73,75	0,989691	0,99870	0,99694

Таблица П7.18 (окончание)

$A$	$K_{эип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(ПЗ)$	$K_{эс}$	$K_{эс,np}$	$K_{эс}(ПЗ)$
1,2	0,91022	0,031355	23,60	18,45	49,00	0,982362	0,99731	0,994349
1,6	0,85038	0,054024	15,68	11,76	27,06	0,961632	0,99252	0,985779
2	0,78947	0,078796	12,13	8,85	17,95	0,934426	0,98516	0,972216
3	0,65385	0,141628	8,56	6,03	9,71	0,852459	0,95948	0,91765

Таблица П7.19. Модель НЗ.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $k = n$ 

$A$	$K_{эип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(ПЗ)$	$K_{эс}$	$K_{эс,np}$	$K_{эс}(ПЗ)$
0,025	0,99970	0,00010	4963,50	4923,2	14642	1,00000	1,00000	1,00000
0,05	0,99881	0,00040	1283,50	1263,2	3722	0,99999	1,00000	1,00000
0,075	0,99739	0,00087	590,17	576,58	1682	0,99996	1,00000	0,99999
0,1	0,99548	0,00151	343,50	333,25	961,9	0,99990	0,99999	0,99997
0,125	0,99310	0,00231	227,50	219,25	625,9	0,99981	0,99998	0,99995
0,15	0,99031	0,00325	163,50	156,58	441,9	0,99968	0,99997	0,99991
0,2	0,98361	0,00551	98,50	93,25	256,9	0,99927	0,99991	0,9998
0,25	0,97561	0,00823	67,50	63,25	169,9	0,99865	0,99980	0,99962
0,3	0,96654	0,01134	50,17	46,58	121,9	0,99777	0,99963	0,99936
0,4	0,94595	0,01852	32,25	29,49	73,1	0,99522	0,99903	0,99856

Таблица П7.20. Модель НЗ.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $k = n$ 

$A$	$K_{эип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(ПЗ)$	$K_{эс}$	$K_{эс,np}$	$K_{эс}(ПЗ)$
0,025	0,999997	0,0000008	593904,5	590583	2346612	1,00000	1,00000	1,00000
0,05	0,99998	0,0000066	76554,5	75693	298747	1,00000	1,00000	1,00000
0,075	0,999935	0,0000217	23393,4	22997	90152	1,00000	1,00000	1,00000
0,1	0,999849	0,0000503	10179,5	9948	38734	1,00000	1,00000	1,00000
0,125	0,999713	0,0000958	5376,5	5223	20197	1,00000	1,00000	1,00000
0,15	0,999516	0,0001614	3210,1	3100	11904	0,99999	1,00000	1,00000
0,2	0,998908	0,0003641	1442,0	1376	5208	0,99997	1,00000	0,99999
0,25	0,997972	0,0006768	786,5	741,2	2765	0,99994	1,00000	0,99998
0,3	0,996665	0,0011134	485,1	451,6	1659	0,99987	1,00000	0,99996
0,4	0,992844	0,0023938	232,6	211,4	753	0,99964	0,99999	0,99989

Таблица П7.21. Модель МНЗ.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 1$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$C$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}$ (МПЗ)	$K_{zc}$	$K_{zc,np}$	$K_{zc}$ (МПЗ)
0,2	0,3	0,96654	0,0076	71,50	68,62	1911	0,99900	0,99983	0,9999996
0,2	0,4	0,94595	0,0093	58,00	56,49	659,4	0,99877	0,99975	0,9999996
0,2	0,5	0,92308	0,0107	49,90	49,35	341,2	0,99857	0,99967	0,9999996
0,2	0,6	0,89888	0,0118	44,50	44,71	492,9	0,99840	0,99959	0,9999996
0,2	0,7	0,87404	0,0128	40,64	41,49	146,1	0,99825	0,99953	0,9999996
0,4	0,5	0,92308	0,0213	27,80	25,92	96,6	0,99448	0,99872	0,9999996
0,4	0,6	0,89888	0,0237	24,83	23,61	61,8	0,99384	0,99843	0,9999996
0,4	0,7	0,87404	0,0256	22,71	22,00	44,0	0,99328	0,99817	0,9999996
0,4	0,8	0,84906	0,0273	21,13	20,83	31,9	0,99280	0,99794	0,9999996
0,4	0,9	0,82430	0,0286	19,89	19,97	20,6	0,99237	0,99774	0,9999996

Таблица П7.22. Модель МНЗ.  $t = \bar{T}_0$ ,  $L = 2$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0$ ,  $C = n\lambda\bar{T}_0$ 

$A$	$C$	$K_{зип}$	$\rho_1$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}$ (МПЗ)	$K_{zc}$	$K_{zc,np}$	$K_{zc}$ (МПЗ)
0,2	0,3	0,99667	0,0007	707	676	39297	0,99994	0,999999	1,000000
0,2	0,4	0,99284	0,0012	439	420	9158	0,99991	0,999999	0,999999
0,2	0,5	0,98734	0,0017	309	297	3600	0,99987	0,999997	0,999996
0,2	0,6	0,98018	0,0022	235	227	1811	0,99983	0,999995	0,999989
0,2	0,7	0,97145	0,0028	189	184	1054	0,99979	0,999992	0,999975
0,4	0,5	0,98734	0,0034	164	150	537,3	0,99949	0,999989	0,999941
0,4	0,6	0,98018	0,0044	125	115	282,5	0,99934	0,999980	0,999847
0,4	0,7	0,97145	0,0055	101	93	171,7	0,99917	0,999970	0,999681
0,4	0,8	0,96131	0,0066	84	79	103,6	0,99901	0,999957	0,999353
0,4	0,9	0,94993	0,0076	73	68	53,7	0,99886	0,999943	0,998279

Таблица П7.23. Модель МНЗ.  $L = 1$ ,  $A = 0,4$ ,  $C = 2$ ,  $T_{cp} = 14,45$ ,  $T_{cp,np} = 17,182$ 

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{np}(t)$	$P_c(t, \text{МПЗ})$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,08	0,99448	0,99535	0,99975	15,86	95,47
0,16	0,98899	0,99073	0,998241	15,83	84,03
0,24	0,98353	0,98613	0,994743	15,79	68,08
0,32	0,97810	0,98155	0,988924	15,75	49,43

Таблица П7.23 (окончание)

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{np}(t)$	$P_c(t, \text{МПЗ})$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,4	0,97270	0,97699	0,980695	15,72	29,29
0,48	0,96733	0,97245	0,980451	15,68	40,17
0,56	0,96199	0,96793	0,97897	15,64	44,68
0,64	0,95668	0,96344	0,97554	15,61	43,54
0,72	0,95139	0,95896	0,969833	15,57	37,94
0,8	0,94614	0,95451	0,961764	15,53	29,01

Здесь  $\delta_1 = 100(P_{np}(t) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ ,  $\delta_2 = 100(P_c(t, \text{МПЗ}) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ .

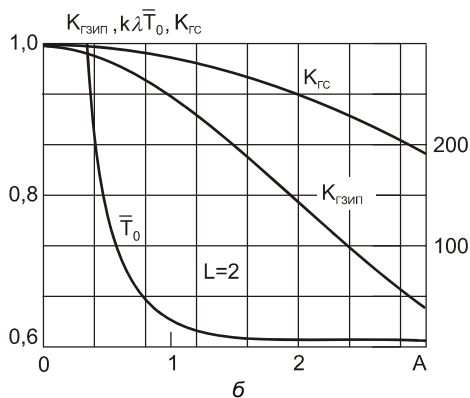
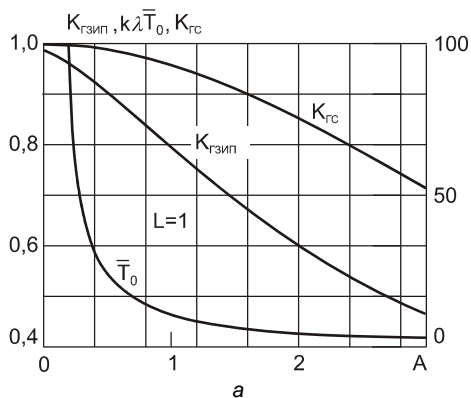


Рис. П7.5. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МНЗ) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

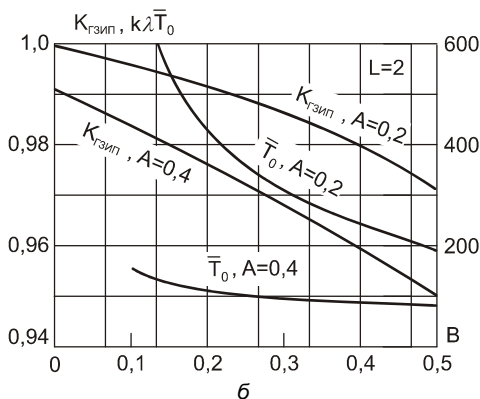
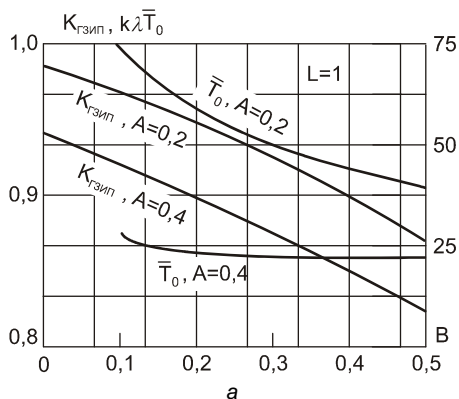


Рис. П7.6. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МНЗ) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.17–П7.23 и рис. П7.5 и П7.6 следует:

- погрешность приближенной формулы (7.36) для расчета средней наработки в модели Н3 существенно меньше, чем в модели Н1. Она составляет 4–8 % при  $L = 1$  и 4–23 % при  $L = 2$ . Причем оценка (7.36) является заниженной при небольших значениях  $B$  и завышенной при больших  $B$ . Погрешность в расчете коэффициента готовности по-прежнему велика. Приближенная формула (7.27) дает завышенное значение, а коэффициент готовности занижен в несколько раз;
- количество аппаратуры в ДПС заметно влияет на показатели безотказности ОПС. Так при  $A = 0,2$  и изменении  $B$  от 0 до  $2A$  средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 98,5 до 44,5 при  $L = 1$  и от 1442 до 235 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;
- в моделях Н3 и МН3, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П3 и МП3 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.6

Верхний уровень системы управления содержит два автоматизированных рабочих места АРМ–1 и АРМ–2. В состав АРМ–1 входит один монитор типа 18,1 дюйма TFT-LCD, а в состав АРМ–2 — два монитора, дублирующих друг друга. Для обеспечения надежности в состав комплекта ЗИП включен один запасной монитор с непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки ЗЧ, равном  $T_0 = 6$  недель = 1008 час. Найти вероятность безотказной работы системы для времени функционирования 1, 2 и 3 года (1 год = 8000 час), среднюю наработку на отказ и коэффициент готовности системы. Оценить влияние времени доставки на показатели надежности. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 1$  год. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 1$  год. Интенсивность отказов монитора  $\lambda = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

## Решение

По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 3 \cdot 1008 \cdot 3,75 \cdot 10^{-5} = 0,1134$  при среднем времени доставки 6 недель,  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 0,0756$  при среднем времени доставки 4 недели. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 3 \cdot 8000 \cdot 3,75 \cdot 10^{-5} = 0,9$ , время функционирования  $t = 8000$ , 16 000 или 24 000 час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 0,9$ , 1,8 или 2,7. Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.38), (7.42), (7.43) модели Н4. Приближенные значения находят по формулам (7.61), (7.62) при  $L_0 = 1$  и  $L_1 = 0$ . Для модели П4 используют формулы *разд.* 5.4. Результаты расчетов приведены в табл. П7.24.



Таблица П7.24. Модель Н4

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t,L)$	$K_{zc}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$K_{zc,np}$	$P_c(t,1,П4)$
0,1134	0,90	28,56	0,96898	0,99799	29,38	0,99808	0,89411
0,1134	1,80	28,56	0,93891	0,99799	29,38	0,99808	0,79943
0,1134	2,70	28,56	0,90978	0,99799	29,38	0,99808	0,71478
0,0756	0,90	41,75	0,97868	0,99909	42,63	0,99911	0,89411
0,0756	1,80	41,75	0,95781	0,99909	42,63	0,99911	0,79943
0,0756	2,70	41,75	0,93738	0,99909	42,63	0,99911	0,71478

Из таблицы следует, что при непрерывном пополнении и среднем времени доставки  $T_0 = 6$  недель вероятность безотказной работы системы существенно выше, чем при периодическом пополнении с периодом пополнения 1 год. Если уменьшить среднее время доставки до 4 недель, то ВБР возрастает до значений 0,97868, 0,95781 и 0,93738 при  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно.

Если увеличить число ЗЧ до двух, то  $P_c(t,2,П4)$  принимает значения 0,97270, 0,94615 и 0,92032 для  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно, что близко к значениям ВБР при непрерывном пополнении и  $T_0 = 6$  недель.

При использовании реконфигурации данная модель сводится к модели НЗ. Тогда ВБР при  $T_0 = 6$  недель увеличивается до значений 0,99670, 0,99341 и 0,99012.

## Пример П7.7

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из одной основной подсистемы, включающей дублированную и нерезервированную части, и  $m$  дополнительных подсистем, для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов (модель МН4). Средняя наработка до отказа одной ветви дублированной части системы равна 3000–24 000 час. Средняя наработка до отказа нерезервированной части не менее 6000 час. Количество элементов в дополнительной подсистеме может втрое превышать число элементов в дублированной части основной подсистемы. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Время функционирования совпадает со средним временем доставки. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,1...0,8$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0 = 0,2...2$ ,  $B = 2ra - 6ra$ ,  $C = 5A - 8A$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.38), (7.43), (7.60)–(7.62). Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.25–П7.29 и на рис. П7.7 и П7.8.

Таблица П7.25. Модель Н4.  $L = 1, L_0 = L_1 = L, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П4)$	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,зип}$
0,1	0,2	129	124	340	0,99845	0,99839	0,99945	0,99993	0,98361
0,1	0,3	12,2	28,03	21,4	0,97577	0,98935	0,98738	0,99541	0,98361
0,1	0,4	7,35	11,45	11,7	0,94701	0,96566	0,97035	0,98354	0,98361
0,1	0,5	5,63	7,06	8,32	0,91495	0,93161	0,94995	0,96648	0,98361
0,1	0,6	4,75	5,18	6,61	0,88123	0,89057	0,92737	0,94588	0,98361
0,2	0,4	41,5	38,99	95,93	0,99041	0,98979	0,99641	0,99927	0,94595
0,2	0,5	11,4	25,84	19,6	0,95719	0,98084	0,97859	0,99475	0,94595
0,2	0,6	7,38	13,76	11,46	0,92187	0,95734	0,95768	0,98289	0,94595
0,2	0,7	5,77	8,81	8,35	0,88572	0,92359	0,93480	0,96584	0,94595
0,2	0,8	4,91	6,42	6,71	0,84954	0,88290	0,91078	0,94525	0,94595
0,4	0,8	16,5	15,22	30,35	0,95267	0,94880	0,98027	0,99428	0,84906
0,4	0,9	9,42	14,60	14,83	0,90884	0,94022	0,95560	0,98978	0,84906
0,4	1	7,00	11,64	10,14	0,86688	0,91770	0,93023	0,97798	0,84906
0,4	1,1	5,78	9,03	7,89	0,82673	0,88534	0,90467	0,96101	0,84906
0,4	1,2	5,05	7,19	6,56	0,78833	0,84634	0,87927	0,94054	0,84906
0,6	1,2	10,9	10,06	16,85	0,89615	0,88760	0,95300	0,98462	0,75342
0,6	1,3	8,00	10,13	11,3	0,85002	0,87956	0,92576	0,98017	0,75342
0,6	1,4	6,53	9,18	8,7	0,80693	0,85850	0,89900	0,96848	0,75342
0,6	1,5	5,64	7,96	7,18	0,76651	0,82823	0,87291	0,95168	0,75342
0,6	1,6	5,05	6,85	6,19	0,72845	0,79174	0,84762	0,93140	0,75342
0,8	1,6	8,69	8,00	11,69	0,83179	0,81865	0,91914	0,97218	0,67010
0,8	1,7	7,10	8,13	9,08	0,78703	0,81124	0,89172	0,96779	0,67010
0,8	1,8	6,13	7,71	7,53	0,74545	0,79181	0,86531	0,95625	0,67010
0,8	1,9	5,47	7,05	6,51	0,70665	0,76389	0,83993	0,93966	0,67010
0,8	2	5,00	6,36	5,79	0,67032	0,73024	0,81560	0,91963	0,67010

Таблица П7.26. Модель Н4.  $L = 2, L_0 = L_1, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П4)$	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,зип}$
0,1	0,2	1900	1834	6898	0,99989	0,99989	0,99997	1,0000	0,99891
0,1	0,3	85,20	320,68	227,14	0,99649	0,99906	0,99878	0,99985	0,99891
0,1	0,4	38,53	70,61	93,79	0,98967	0,99435	0,99615	0,99891	0,99891
0,1	0,5	24,18	31,08	54,19	0,97954	0,98404	0,99190	0,99667	0,99891

Таблица П7.26 (окончание)

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П4)$	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,зип}$
0,1	0,6	17,59	18,31	36,51	0,96647	0,96777	0,98597	0,99284	0,99891
0,2	0,4	302,5	281,50	990,12	0,99868	0,99858	0,99964	0,99999	0,99284
0,2	0,5	52,11	222,48	133,12	0,99045	0,99776	0,99671	0,99984	0,99284
0,2	0,6	27,97	86,00	64,65	0,97878	0,99305	0,99208	0,99890	0,99284
0,2	0,7	19,21	40,24	40,81	0,96422	0,98275	0,98575	0,99665	0,99284
0,2	0,8	14,80	23,48	29,14	0,94737	0,96650	0,97782	0,99283	0,99284
0,4	0,8	61,56	53,68	162,52	0,98709	0,98521	0,99615	0,99963	0,96131
0,4	0,9	27,97	57,22	63,24	0,96834	0,98439	0,98893	0,99947	0,96131
0,4	1	18,67	48,88	38,31	0,94784	0,97975	0,98015	0,99853	0,96131
0,4	1,1	14,33	35,62	27,16	0,92612	0,96959	0,96997	0,99629	0,96131
0,4	1,2	11,84	25,23	20,94	0,90361	0,95356	0,95860	0,99247	0,96131
0,6	1,2	29,17	24,26	62,8	0,95969	0,95174	0,98671	0,99798	0,91022
0,6	1,3	18,85	25,85	36,69	0,93337	0,95096	0,97554	0,99783	0,91022
0,6	1,4	14,36	25,45	25,84	0,90710	0,94647	0,96329	0,99689	0,91022
0,6	1,5	11,84	22,92	19,94	0,88105	0,93666	0,95016	0,99465	0,91022
0,6	1,6	10,24	19,49	16,26	0,85534	0,92117	0,93633	0,99084	0,91022
0,8	1,6	19,02	15,34	34,26	0,91933	0,90095	0,97095	0,99438	0,85038
0,8	1,7	14,47	16,17	24,32	0,88913	0,90021	0,95687	0,99423	0,85038
0,8	1,8	11,94	16,38	18,92	0,86007	0,89596	0,94223	0,99330	0,85038
0,8	1,9	10,33	15,80	15,54	0,83206	0,88667	0,92716	0,99106	0,85038
0,8	2	9,22	14,60	13,23	0,80504	0,87201	0,91182	0,98727	0,85038

Таблица П7.27. Модель МН4.  $L = 1$ ,  $L_0 = L_1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П4)$	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,зип}$
0,2	0,6	1	5,475	6,698	7,65	0,89620	0,91432	0,94556	0,89749	0,84906
0,2	0,6	1,4	4,661	5,149	6,04	0,87921	0,89000	0,93794	0,79838	0,75342
0,2	0,6	1,8	4,208	4,475	5,16	0,86712	0,87453	0,93270	0,70845	0,67010
0,2	0,8	1,2	3,896	4,159	4,94	0,81436	0,82502	0,89443	0,84775	0,84906
0,2	0,8	1,6	3,391	3,408	4,069	0,78982	0,79080	0,88378	0,75189	0,75342
0,2	0,8	2	3,088	3,035	3,56	0,77174	0,76831	0,87629	0,66858	0,67010
0,4	1,2	2	4,009	4,289	4,7	0,74132	0,75597	0,86103	0,74719	0,67010
0,4	1,2	2,8	3,565	3,644	3,93	0,71419	0,71945	0,85141	0,59484	0,54140

Таблица П7.27 (окончание)

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П4)$	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{зип}$
0,4	1,2	3,6	3,318	3,370	3,53	0,69653	0,70040	0,84546	0,48819	0,45064
0,4	1,6	2,4	3,091	2,889	3,32	0,59592	0,57471	0,76438	0,66456	0,67010
0,4	1,6	3,2	2,773	2,551	2,88	0,56155	0,53403	0,75358	0,53674	0,54140
0,4	1,6	4	2,582	2,385	2,62	0,53810	0,51125	0,74661	0,44694	0,45064
0,6	1,8	3	3,529	3,517	3,75	0,60042	0,59943	0,78167	0,62228	0,54140
0,6	1,8	4,2	3,194	3,146	3,25	0,56917	0,56432	0,77293	0,46290	0,41516
0,6	1,8	5,4	3,008	2,995	3	0,54968	0,54828	0,76776	0,36553	0,33487
0,6	2,4	3,6	2,829	2,466	2,82	0,42816	0,37790	0,66171	0,53182	0,54140
0,6	2,4	4,8	2,568	2,261	2,51	0,39282	0,34602	0,65322	0,40838	0,41516
0,6	2,4	6	2,412	2,163	2,34	0,36970	0,32973	0,64792	0,33003	0,33487
0,8	2,4	4	3,291	3,140	3,3	0,48228	0,46568	0,71263	0,52645	0,45064
0,8	2,4	5,6	3,006	2,897	2,93	0,45008	0,43667	0,70531	0,37547	0,33487
0,8	2,4	7,2	2,848	2,804	2,74	0,43055	0,42488	0,70108	0,29024	0,26542
0,8	3,2	4,8	2,701	2,256	2,6	0,30582	0,24205	0,58241	0,43820	0,45064
0,8	3,2	6,4	2,467	2,115	2,35	0,27330	0,22031	0,57600	0,32691	0,33487
0,8	3,2	8	2,326	2,050	2,21	0,25272	0,20994	0,57207	0,26005	0,26542
0,1	0,3	1	5,608	6,188	7,84	0,94791	0,95268	0,97372	0,84868	0,82430
0,2	0,5	1	7,643	6,735	11,22	0,93667	0,92844	0,96916	0,88749	0,61595
0,3	0,7	1	8,575	8,867	12,97	0,92161	0,92409	0,96234	0,93631	0,50985
0,4	0,9	1	8,931	11,061	13,68	0,90414	0,92186	0,95364	0,86097	0,42389
0,2	0,6	1	5,475	4,979	7,65	0,89620	0,88647	0,94556	0,86226	0,56703
0,3	0,8	1	6,400	6,765	9,16	0,88250	0,88847	0,93878	0,83767	0,47188
0,4	1	1,4	5,97	6,27	7,97	0,84581	0,85266	0,92154	0,78243	0,39790
0,4	1	1,8	5,40	5,27	6,78	0,83095	0,82703	0,91571	0,76506	0,40023
0,4	1	2,2	5,04	4,75	6,04	0,81991	0,81017	0,91153	0,75342	0,40191

Таблица П7.28. Модель МН4.  $L = 2$ ,  $L_0 = L_1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$T_{cp}(П4)$	$P$	$P_{np}$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,ип}$
0,2	0,6	1	14,2	18,77	27,86	0,95871	0,96855	0,98465	0,98008	0,96131
0,2	0,6	1,4	9,83	10,72	16,87	0,94076	0,94555	0,97816	0,93728	0,91022
0,2	0,6	1,8	7,76	7,93	12,02	0,92563	0,92710	0,97281	0,88047	0,85038
0,2	0,8	1,2	9,03	9,66	15,43	0,91523	0,92049	0,96469	0,96121	0,96131
0,2	0,8	1,6	6,70	6,40	10,26	0,88744	0,88250	0,95379	0,91001	0,91022
0,2	0,8	2	5,48	5,03	7,7	0,86408	0,85290	0,94498	0,85004	0,85038
0,4	1,2	2	7,22	8,11	10,38	0,84692	0,86251	0,93679	0,90884	0,85038
0,4	1,2	2,8	5,61	5,612	7,08	0,80750	0,80750	0,92295	0,78754	0,73159
0,4	1,2	3,6	4,81	4,68	5,58	0,77934	0,77376	0,91371	0,67645	0,63052
0,4	1,6	2,4	5,30	4,82	6,56	0,73940	0,71759	0,87592	0,84909	0,85038
0,4	1,6	3,2	4,28	3,68	4,85	0,68834	0,64749	0,85755	0,72980	0,73159
0,4	1,6	4	3,72	3,18	3,98	0,65075	0,60428	0,84512	0,62865	0,63052
0,6	1,8	3	5,55	5,56	6,6	0,72308	0,72331	0,87734	0,81543	0,73159
0,6	1,8	4,2	4,54	4,27	4,88	0,67264	0,65606	0,86145	0,64951	0,58761
0,6	1,8	5,4	4,02	3,77	4,09	0,63912	0,62070	0,85178	0,52804	0,48445
0,6	2,4	3,6	4,37	3,56	4,59	0,57736	0,50973	0,78438	0,72775	0,73159
0,6	2,4	4,8	3,65	2,93	3,63	0,51856	0,44088	0,76646	0,58372	0,58761
0,6	2,4	6	3,25	2,65	3,13	0,47790	0,40359	0,75516	0,48111	0,48445
0,8	2,4	4	4,84	4,48	5,12	0,60907	0,58527	0,81807	0,72377	0,63052
0,8	2,4	5,6	4,06	3,67	4,00	0,55394	0,52003	0,80281	0,54292	0,48445
0,8	2,4	7,2	3,66	3,36	3,48	0,51881	0,48907	0,79396	0,42740	0,38955
0,8	3,2	4,8	3,96	3,00	3,82	0,44610	0,34443	0,70474	0,62379	0,63052
0,8	3,2	6,4	3,37	2,59	3,16	0,38727	0,29005	0,68947	0,47882	0,48445
0,8	3,2	8	3,03	2,40	2,81	0,34833	0,26287	0,68015	0,38522	0,38955
0,1	0,3	1	14,4	14,37	28,25	0,97938	0,97934	0,99282	0,96127	0,94993
0,2	0,5	1	20,3	27,06	41,63	0,97564	0,98169	0,99163	0,98005	0,94993
0,3	0,7	1	23,3	39,03	49,53	0,97046	0,98222	0,98985	0,99256	0,94993
0,4	0,9	1	24,7	45,29	53,42	0,96416	0,98032	0,98750	0,99841	0,94993
0,2	0,6	1	14,2	9,77	27,86	0,95871	0,94041	0,98465	0,95919	0,96131
0,3	0,8	1	16,9	11,61	33,99	0,95371	0,93341	0,98268	0,95905	0,96131
0,4	1	1,4	13,0	19,59	23,08	0,92570	0,95023	0,97209	0,97927	0,91022
0,4	1	1,8	10,3	12,67	16,36	0,90723	0,92413	0,96561	0,93608	0,85038
0,4	1	2,2	8,7	9,88	12,74	0,89200	0,90377	0,96043	0,87902	0,78947

Таблица П7.29. Модель МН4.  $L = 2$ ,  $ra = 0,4$ ,  $A = 1,2$ ,  $C = 2,8$ ,  $T_{cp} = 5,612$ ,  $T_{cp,mp} = 5,176$ 

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{mp}(t)$	$P_c(t, \text{МП4})$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,24	0,96731	0,97085	0,99387	10,82	81,25
0,48	0,93570	0,94255	0,97668	10,66	63,73
0,72	0,90511	0,91508	0,95029	10,50	47,61
0,96	0,87553	0,88840	0,9166	10,34	33,00
1,2	0,84691	0,86251	0,87736	10,19	19,89
1,44	0,81923	0,83737	0,87198	10,03	29,18
1,68	0,79245	0,81296	0,8569	9,88	31,05
1,92	0,76655	0,78926	0,83375	9,73	28,79
2,16	0,74150	0,76626	0,80419	9,58	24,25
2,40	0,71726	0,74392	0,76976	9,43	18,57

Здесь  $\delta_1 = 100(P_{mp}(t) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ ,  $\delta_2 = 100(P_c(t, \text{МП4}) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ .

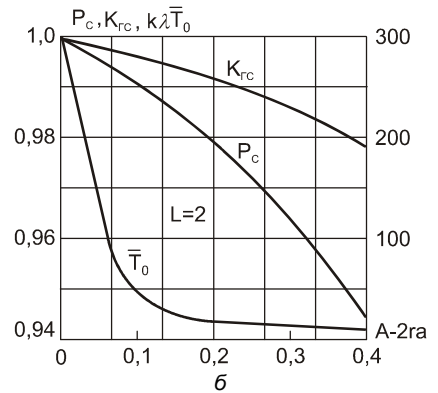
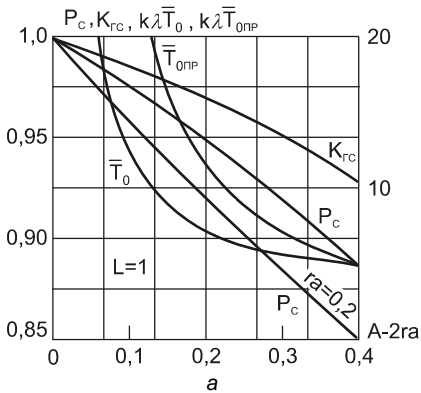


Рис. П7.7. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН4) от сложности нерезервированной части ОПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

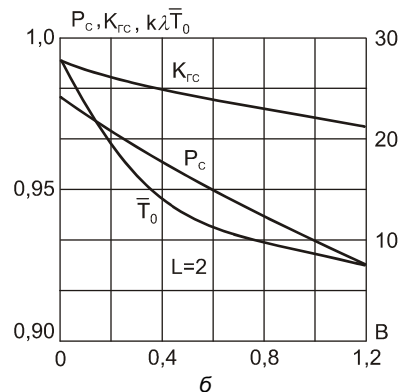
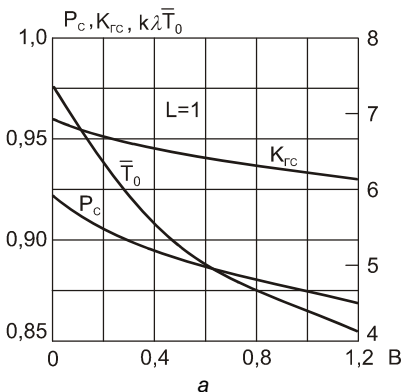


Рис. П7.8. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН4) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.25–П7.29 и рис. П7.7 и П7.8 можно сделать следующие выводы:

- показатели безотказности быстро ухудшаются при увеличении доли нерезервированной части системы. Уже при  $A = 3ra$  средняя наработка до отказа системы уменьшается в 10 раз, когда  $L = 1$ , и в 22 раза, когда  $L = 2$ , по сравнению со случаем, когда нерезервированная часть отсутствует;
- оценка по приближенной формуле для расчета средней наработки в модели Н4 является заниженной при небольших значениях  $A - 2ra$  и завышенной при больших  $A - 2ra$ . Погрешность в расчете коэффициента готовности по-прежнему велика. Приближенная формула (7.62) дает завышенное значение, а коэффициент неготовности занижен в несколько раз;
- количество аппаратуры в ДПС заметно влияет на показатели безотказности ОПС. Так при  $ra = 0,2$ ,  $A = 0,6$  и изменении  $B$  от 0 до  $2A$  средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 7,38 до 4,21 при  $L = 1$  и от 27,97 до 7,76 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;
- в моделях Н4 и МН4, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П4 и МП4 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.8

Система электропитания из четырех одинаковых блоков обеспечивает электроэнергией две автономные группы аппаратуры. Первая группа подключена к одному нерезервированному блоку. Остальные три блока соединены по схеме «два из трех» и подключены ко второй группе аппаратуры. Для обеспечения надежности в комплект ЗИП включен один запасной блок с непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки 3Ч, равном  $T_0 = 8$  недель = 1344 час. Найти показатели надежности для времени функционирования 3 года. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 0,5$  года. Интенсивность отказов блока  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

## Решение

По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 4 \cdot 1344 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,2688$  при среднем времени доставки 8 недель,  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 0,1344$  при среднем времени доставки 4 недели. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 4 \cdot 8736 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,8736$ , время функционирования  $t = 8736$ , 17 472 или 26 208 час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 0,8736$ , 1,7472 или 2,6208. Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.63), (7.67), (7.68). Приближенные значения находят по формулам (7.70) при  $L_0 = 1$  и  $L_1 = 0$ . Для модели П5 используют формулы разд. 5.5. Результаты расчетов приведены в табл. П7.30.

Таблица П7.30. Модель Н5

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t, L)$	$K_{zc}$	$k\lambda T_{cp, np}$	$K_{zc, np}$	$P_c(t, 1, П5)$
0,2688	0,8736	16,099	0,94718	0,99170	11,621	0,98850	0,82954
0,2688	1,7472	16,099	0,89716	0,99170	11,621	0,98850	0,68813
0,2688	2,6208	16,099	0,84977	0,99170	11,621	0,98850	0,57083
0,1344	0,8736	30,681	0,97193	0,99783	20,194	0,99666	0,82954
0,1344	1,7472	30,681	0,94464	0,99783	20,194	0,99666	0,68813
0,1344	2,6208	30,681	0,91813	0,99783	20,194	0,99666	0,57083

Из таблицы следует, что при непрерывном пополнении и среднем времени доставки  $T_0 = 8$  недель вероятность безотказной работы системы существенно выше, чем при периодическом пополнении с периодом пополнения 0,5 года. Если уменьшить среднее время доставки до 4 недель, то ВБР возрастает до значений 0,97193, 0,94464 и 0,91813 при  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно.

Если увеличить число ЗЧ до двух, то  $P_c(t, 2, П5)$  принимает значения 0,91559, 0,83830 и 0,76754 для  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно, что близко к значениям ВБР, но несколько меньше, чем при непрерывном пополнении и  $T_0 = 8$  недель.

## Пример П7.9

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из одной основной подсистемы, включающей мажорированную и нерезервированную части, и дополнительной подсистемы, для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов (модель МН5). Средняя наработка до отказа одной ветви мажорированной части системы равна 3000–24 000 час. Средняя наработка до отказа нерезервированной части не менее 6000 час. Количество элементов в дополнительной подсистеме может втрое превышать число элементов в мажорированной части основной подсистемы. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Время функционирования совпадает со средним временем доставки. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,1...0,8$ ,  $A = k\lambda\bar{T}_0 = 0,3...2,8$ ,  $B = 2ra - 6ra$ ,  $C = 5A - 8A$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.65), (7.68), (7.70)–(7.72). Результаты расчетов показателей надежности приведены в таблицах П7.31–П7.35 и на рис. П7.9 и П7.10.



Таблица П7.31. Модель Н5.  $L = 1$ ,  $L_0 = L_1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(П5)$	$P$	$P_{np}$	$K_e$	$K_{e,np}$	$K_{e,ПП}$
0,1	0,3	50,17	46,58	121,9	0,99404	0,99358	0,99777	0,99963	0,96654
0,1	0,4	11,44	25,75	19,91	0,96563	0,98459	0,98250	0,99510	0,96654
0,1	0,5	7,25	12,57	11,41	0,93336	0,96101	0,96330	0,98324	0,96654
0,1	0,6	5,64	7,93	8,26	0,89916	0,92712	0,94150	0,96618	0,96654
0,1	0,7	4,80	5,80	6,62	0,86417	0,88628	0,91811	0,94559	0,96654
0,2	0,6	18,50	16,57	36,91	0,96809	0,96444	0,98670	0,99659	0,89888
0,2	0,7	9,49	15,45	15,61	0,92890	0,95571	0,96465	0,99208	0,89888
0,2	0,8	6,86	11,50	10,28	0,88998	0,93282	0,94096	0,98025	0,89888
0,2	0,9	5,61	8,54	7,86	0,85177	0,89993	0,91639	0,96325	0,89888
0,2	1	4,88	6,64	6,48	0,81454	0,86028	0,89147	0,94272	0,89888
0,4	1,2	8,92	7,80	13,21	0,87408	0,85737	0,93830	0,97960	0,75342
0,4	1,3	7,01	7,98	9,64	0,83067	0,84961	0,91151	0,97517	0,75342
0,4	1,4	5,93	7,48	7,74	0,78982	0,82926	0,88525	0,96354	0,75342
0,4	1,5	5,24	6,72	6,55	0,75125	0,80002	0,85967	0,94683	0,75342
0,4	1,6	4,76	5,97	5,75	0,71476	0,76478	0,83490	0,92665	0,75342
0,6	1,8	6,65	5,79	8,14	0,76281	0,73263	0,87214	0,95448	0,63348
0,6	1,9	5,87	5,93	6,94	0,72329	0,72600	0,84649	0,95016	0,63348
0,6	2	5,31	5,81	6,11	0,68628	0,70861	0,82192	0,93883	0,63348
0,6	2,1	4,90	5,52	5,5	0,65152	0,68363	0,79840	0,92254	0,63348
0,6	2,2	4,58	5,17	5,04	0,61878	0,65351	0,77591	0,90288	0,63348
0,8	2,4	5,69	4,94	6,15	0,65575	0,61547	0,80348	0,92784	0,54140
0,8	2,5	5,26	5,06	5,59	0,62162	0,60990	0,78078	0,92364	0,54140
0,8	2,6	4,92	5,01	5,16	0,58959	0,59529	0,75915	0,91263	0,54140
0,8	2,7	4,65	4,87	4,81	0,55948	0,57430	0,73853	0,89679	0,54140
0,8	2,8	4,43	4,67	4,53	0,53112	0,54900	0,71888	0,87768	0,54140

Таблица П7.32. Модель Н5.  $L = 2$ ,  $L_0 = L_1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(П5)$	$P$	$P_{np}$	$K_e$	$K_{e,np}$	$K_{e,ПП}$
0,1	0,3	485	451,6	1659,5	0,99938	0,99934	0,99983	0,999996	0,99667
0,1	0,4	62,9	268,3	164,7	0,99366	0,99851	0,99781	0,999845	0,99667
0,1	0,5	31,8	80,39	75,48	0,98441	0,99380	0,99418	0,998905	0,99667
0,1	0,6	21,1	36,06	46,05	0,97199	0,98350	0,98886	0,996662	0,99667

Таблица П7.32 (окончание)

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}$ (П5)	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,зип}$
0,1	0,7	15,9	21,01	32,12	0,95695	0,96723	0,98188	0,992841	0,99667
0,2	0,6	89,2	77,41	257,45	0,99330	0,99228	0,99802	0,999869	0,98018
0,2	0,7	34,0	81,61	81,77	0,97962	0,99146	0,99288	0,999718	0,98018
0,2	0,8	21,4	60,12	46,39	0,96324	0,98678	0,98603	0,998777	0,98018
0,2	0,9	15,8	37,93	31,66	0,94480	0,97655	0,97760	0,996535	0,98018
0,2	1	12,8	24,75	23,76	0,92485	0,96040	0,96774	0,992714	0,98018
0,4	1,2	23,6	18,45	49,00	0,95042	0,93702	0,98236	0,997311	0,91022
0,4	1,3	16,7	19,73	31,56	0,92497	0,93624	0,97095	0,997161	0,91022
0,4	1,4	13,2	19,83	23,22	0,89945	0,93183	0,95850	0,996223	0,91022
0,4	1,5	11,1	18,51	18,37	0,87406	0,92217	0,94520	0,993986	0,91022
0,4	1,6	9,77	16,38	15,22	0,84893	0,90692	0,93125	0,990175	0,91022
0,6	1,8	13,6	10,05	21,66	0,87607	0,83596	0,94869	0,989133	0,81973
0,6	1,9	11,4	10,56	17,29	0,84709	0,83527	0,93353	0,988983	0,81973
0,6	2	10,0	10,83	14,45	0,81921	0,83133	0,91807	0,988053	0,81973
0,6	2,1	9,02	10,76	12,46	0,79237	0,82271	0,90243	0,985834	0,81973
0,6	2,2	8,27	10,39	10,99	0,76649	0,80911	0,88672	0,982055	0,81973
0,8	2,4	10,2	7,30	13,32	0,79008	0,71980	0,90305	0,975795	0,73159
0,8	2,5	9,19	7,58	11,65	0,76190	0,71920	0,88664	0,975647	0,73159
0,8	2,6	8,45	16,80	10,39	0,73508	0,85661	0,87038	0,974729	0,73159
0,8	2,7	6,05	14,55	9,42	0,63978	0,83063	0,85433	0,972541	0,73159
0,8	2,8	5,84	12,45	8,64	0,61917	0,79855	0,83852	0,968812	0,73159

Таблица П7.33. Модель МН5.  $L = 1$ ,  $L_0 = L_1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}$ (МП5)	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,зип}$
0,2	0,8	1,2	5,55	6,73	7,57	0,86566	0,88800	0,9302	0,8942	0,8000
0,2	0,8	1,6	4,89	5,44	6,24	0,84898	0,86315	0,9233	0,7950	0,7101
0,2	0,8	2	4,49	4,84	5,45	0,83683	0,84771	0,9184	0,7053	0,6335
0,2	1	1,4	4,09	4,51	5,08	0,78306	0,80127	0,8780	0,8446	0,8000
0,2	1	1,8	3,65	3,77	4,32	0,76051	0,76694	0,8689	0,7487	0,7101
0,2	1	2,2	3,38	3,39	3,85	0,74357	0,74475	0,8624	0,6656	0,6335
0,4	1,6	2,4	4,04	4,21	4,49	0,67293	0,68354	0,8209	0,7358	0,6000
0,4	1,6	3,2	3,68	3,74	3,89	0,64714	0,65181	0,8130	0,5862	0,4922

Таблица П7.33 (окончание)

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}$ (МП5)	$P$	$P_{np}$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,МП}$
0,4	1,6	4	3,46	3,54	3,54	0,62965	0,63620	0,8079	0,4816	0,4152
0,4	2	2,8	3,25	3,06	3,38	0,54043	0,51965	0,7311	0,6544	0,6000
0,4	2	3,6	2,97	2,75	3,00	0,51023	0,48382	0,7228	0,5289	0,4922
0,4	2	4,4	2,80	2,61	2,77	0,48897	0,46439	0,7173	0,4409	0,4152
0,6	2,4	3,6	3,56	3,45	3,56	0,50962	0,49899	0,7216	0,6051	0,4706
0,6	2,4	4,8	3,28	3,21	3,18	0,48098	0,47305	0,7151	0,4515	0,3709
0,6	2,4	6	3,11	3,11	2,96	0,46224	0,46265	0,7110	0,3575	0,3051
0,6	3	4,2	2,98	2,59	2,88	0,36532	0,31458	0,6183	0,5171	0,4706
0,6	3	5,4	2,75	2,42	2,61	0,33560	0,29005	0,6124	0,3983	0,3709
0,6	3	6,6	2,60	2,35	2,45	0,31547	0,27824	0,6085	0,3228	0,3051
0,8	3,2	4,8	3,33	3,10	3,15	0,38226	0,35566	0,6391	0,5062	0,3846
0,8	3,2	6,4	3,08	2,95	2,86	0,35405	0,33744	0,6340	0,3630	0,2962
0,8	3,2	8	2,93	2,90	2,70	0,33605	0,33184	0,6309	0,2818	0,2403
0,8	4	5,6	2,85	2,37	2,66	0,24530	0,18487	0,5335	0,4213	0,3846
0,8	4	7,2	2,64	2,26	2,45	0,21928	0,17025	0,5293	0,3160	0,2962
0,8	4	8,8	2,50	2,21	2,32	0,20219	0,16397	0,5266	0,2525	0,2403
0,1	0,4	1,5	5,43	5,92	7,11	0,92902	0,93461	0,9655	0,7522	0,7101
0,2	0,7	1,5	6,53	7,40	8,85	0,89840	0,90980	0,9516	0,8192	0,7101
0,3	1	1,5	6,67	7,46	9,00	0,86071	0,87448	0,9318	0,8871	0,7101
0,4	1,3	1,5	6,59	7,19	8,72	0,82101	0,83465	0,9079	0,9456	0,7101
0,2	0,8	1,5	5,02	5,66	6,50	0,85264	0,86823	0,9248	0,8193	0,7313
0,3	1,1	1,5	5,52	6,45	7,16	0,81924	0,84325	0,9058	0,8875	0,7313

Таблица П7.34. Модель МН5.  $L = 2$ ,  $L_0 = L_1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}$ (МП5)	$P$	$P_{np}$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,МП}$
0,2	0,8	1,2	13,2	18,7	27,86	0,94097	0,95822	0,9778	0,9797	0,9375
0,2	0,8	1,6	9,84	11,4	16,87	0,92192	0,93244	0,9710	0,9366	0,8808
0,2	0,8	2	8,11	8,70	12,02	0,90608	0,91218	0,9654	0,8796	0,8197
0,2	1	1,4	8,79	10,7	15,43	0,89249	0,91068	0,9547	0,9608	0,9375
0,2	1	1,8	6,90	7,20	10,26	0,86515	0,87027	0,9441	0,9094	0,8808
0,2	1	2,2	5,83	5,70	7,70	0,84233	0,83917	0,9357	0,8492	0,8197
0,4	1,6	2,4	6,92	7,59	10,38	0,79365	0,80995	0,9106	0,9049	0,7895

Таблица П7.34 (окончание)

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(M\Pi 5)$	$P$	$P_{np}$	$K_c$	$K_{c,np}$	$K_{c,3\Pi\Pi}$
0,4	1,6	3,2	5,69	5,68	7,08	0,75497	0,75433	0,8976	0,7833	0,6785
0,4	1,6	4	5,02	4,90	5,58	0,72686	0,72135	0,8888	0,6725	0,5876
0,4	2	2,8	5,35	5,07	6,56	0,68798	0,67386	0,8474	0,8454	0,7895
0,4	2	3,6	4,50	3,98	4,85	0,64138	0,60486	0,8318	0,7259	0,6785
0,4	2	4,4	4,00	3,49	3,98	0,60655	0,56335	0,8211	0,6250	0,5876
0,6	2,4	3,6	5,44	5,19	6,60	0,64344	0,62961	0,8309	0,8058	0,6538
0,6	2,4	4,8	4,64	4,28	4,88	0,59617	0,57044	0,8174	0,6415	0,5317
0,6	2,4	6	4,19	3,90	4,09	0,56371	0,54058	0,8089	0,5217	0,4443
0,6	3	4,2	4,48	3,69	4,59	0,51212	0,44369	0,7423	0,7192	0,6538
0,6	3	5,4	3,87	3,13	3,63	0,46084	0,38334	0,7285	0,5765	0,5317
0,6	3	6,6	3,50	2,87	3,13	0,42452	0,35149	0,7194	0,4753	0,4443
0,8	3,2	4,8	4,81	4,22	5,12	0,51424	0,46847	0,7552	0,7091	0,5493
0,8	3,2	6,4	4,17	3,67	4,00	0,46454	0,41824	0,7432	0,5324	0,4322
0,8	3,2	8	3,81	3,45	3,48	0,43160	0,39573	0,7360	0,4198	0,3542
0,8	4	5,6	4,10	3,10	3,82	0,37730	0,27569	0,6543	0,6112	0,5493
0,8	4	7,2	3,59	2,75	3,16	0,32803	0,23328	0,6433	0,4696	0,4322
0,8	4	8,8	3,27	2,58	2,81	0,29449	0,21270	0,6363	0,3783	0,3542
0,1	0,4	1,5	11,1	11,4	28,25	0,96468	0,96565	0,9879	0,9100	0,8808
0,2	0,7	1,5	14,0	16,5	41,63	0,95135	0,95850	0,9832	0,9490	0,8808
0,3	1	1,5	14,6	17,5	49,53	0,93380	0,94445	0,9762	0,9782	0,8808
0,4	1,3	1,5	14,5	16,5	53,42	0,91417	0,92405	0,9671	0,9931	0,8808
0,2	0,8	1,5	10,5	6,61	27,86	0,92636	0,88600	0,9725	0,9310	0,8957
0,3	1,1	1,5	11,7	8,26	33,99	0,91045	0,87538	0,9653	0,9645	0,8957

Таблица П7.35. Модель МН5.  $L = 2$ ,  $ra = 0,2$ ,  $A = 0,8$ ,  $C = 1,6$ ,  $T_{cp} = 9,84$ ,  $T_{cp,np} = 11,44$ 

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{np}(t)$	$P_c(t, M\Pi 5)$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,16	0,98387	0,98611	0,99939	13,87	96,22
0,32	0,96800	0,97241	0,99563	13,77	86,34
0,48	0,95239	0,95890	0,98682	13,67	72,32
0,64	0,93703	0,94558	0,9721	13,58	55,69
0,8	0,92192	0,93244	0,95135	13,48	37,69

Таблица П7.35 (окончание)

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{np}(t)$	$P_c(t, \text{МП5})$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,96	0,90705	0,91949	0,95077	13,38	47,04
1,12	0,89242	0,90672	0,94719	13,29	50,91
1,28	0,87803	0,89412	0,93881	13,19	49,83
1,44	0,86387	0,88170	0,92481	13,10	44,77
1,60	0,84993	0,86945	0,90507	13,01	36,74

Здесь  $\delta_1 = 100(P_{np}(t) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ ,  $\delta_2 = 100(P_c(t, \text{МП5}) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ .

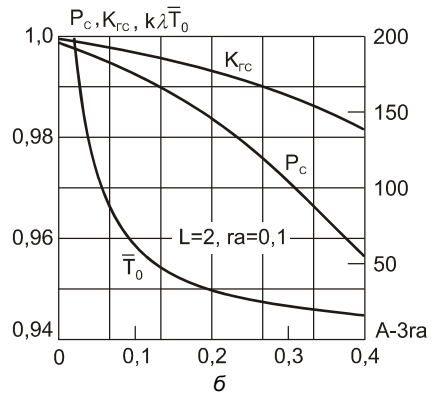
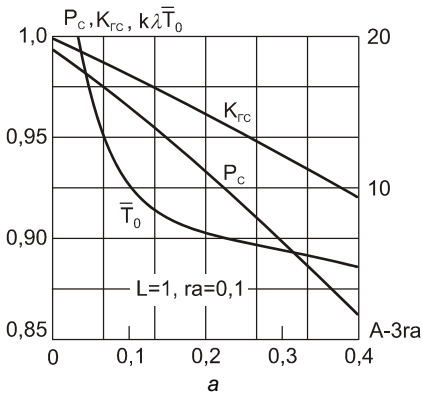


Рис. П7.9. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН5) от сложности нерезервированной части ОПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

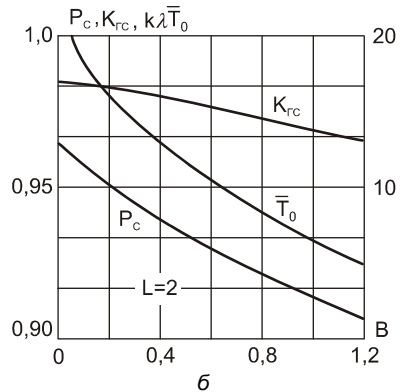
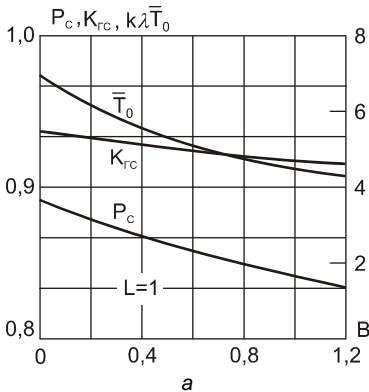


Рис. П7.10. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН5) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.31–П7.35 и рис. П7.9 и П7.10 можно сделать следующие выводы:

- показатели безотказности быстро ухудшаются при увеличении доли нерезервированной части системы. Уже при  $A-3ra = ra$  средняя наработка до отказа системы уменьшается в 4,4 раза, когда  $L = 1$ , и в 7 раз, когда  $L = 2$ , по сравнению со случаем, когда нерезервированная часть отсутствует;
- погрешность приближенной формулы (7.70) для расчета средней наработки является заниженной при небольших значениях  $A-3ra$  и завышенной при больших значениях  $A-3ra$ . Погрешность в расчете коэффициента готовности по-прежнему велика. Приближенная формула (7.72) дает завышенное значение, а коэффициент неготовности занижен в несколько раз;
- количество аппаратуры в ДПС влияет на показатели безотказности ОПС не существенно. Так при  $ra = 0,2$ ,  $A = 0,8$  и изменении  $B$  от 0,4 до 1,2 средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 5,55 до 4,42 при  $L = 1$  и от 13,2 до 8,11 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;
- в моделях Н5 и МН5, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П5 и МП5 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.10

В условиях примера П7.6 рассмотреть вариант, когда оба автоматизированных рабочих места оснащены дублированными мониторами.

## Решение

По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 4*1008*3,75*10^{-5} = 0,1512$  при среднем времени доставки 6 недель,  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 0,1008$  при среднем времени доставки 4 недели. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 4*8000*3,75*10^{-5} = 1,2$ , время функционирования  $t = 8000$ , 16 000 или 24 000 час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 1,2$ , 2,4 или 3,6. Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.75), (7.78) модели МН6. Приближенные значения находят по формулам (7.81) при  $L = 1$ . Для модели П6 используют формулы разд. 5.6. Результаты расчетов приведены в табл. П7.36.

Таблица П7.36. Модель МН6

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t,L)$	$K_{cc}$	$k\lambda T_{cp,pp}$	$K_{cc,pp}$	$P_c(t,1,П6)$
0,1512	1,20	396,5	0,99698	0,99987	407,8	0,999988	0,95756
0,1512	2,40	396,5	0,99397	0,99987	407,8	0,999988	0,91692
0,1512	3,60	396,5	0,99096	0,99987	407,8	0,999988	0,87801
0,1008	1,20	854,8	0,99860	0,99996	871,7	0,999997	0,95756
0,1008	2,40	854,8	0,99720	0,99996	871,7	0,999997	0,91692
0,1008	3,60	854,8	0,99580	0,99996	871,7	0,999997	0,87801

Из таблицы следует, что при непрерывном пополнении и среднем времени доставки  $T_0 = 6$  недель вероятность безотказной работы системы существенно выше, чем при периодическом пополнении с периодом пополнения 1 год. Если уменьшить среднее время доставки до 4 недель, то ВБР возрастает до значений 0,99860, 0,99720 и 0,99580 при  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно.

Если увеличить число ЗЧ до двух, то  $P_c(t, 2, П6)$  принимает значения 0,988802, 0,977729 и 0,966780 для  $t = 1, 2$  и 3 года соответственно. Это заметно меньше, чем при непрерывном пополнении и  $T_0 = 6$  недель.

## Пример П7.11

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из одной основной подсистемы, включающей две одинаковых дублированных части, и дополнительной подсистемы (модель МН6), для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа одной ветви дублированной части системы равна 4000–48 000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Комплект обслуживает до трех одинаковых систем, идентичных основной подсистеме. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,05 \dots 0,6$ ,  $A = 0,2-2,4$ ,  $B = 4ra-12ra$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.75), (7.78), (7.80)–(7.81), (7.83)–(7.85) моделей Н6 и МН6. Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.37–П7.45 и на рис. П7.11 и П7.12.

Таблица П7.37. Модель Н6.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp, np}$	$k\lambda T_{cp}$ (П6)	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_c$	$K_{c, np}$	$K_{c, ЗИП}$
0,05	0,2	236	245	654,9	0,99915	0,99918	0,99971	0,99997	0,9836
0,1	0,4	70,5	75,0	121,9	0,99434	0,99468	0,99803	0,99962	0,9459
0,2	0,8	25,1	27,4	53,11	0,96861	0,97127	0,98830	0,99691	0,8491
0,3	1,2	15,5	17,1	27,94	0,92550	0,93234	0,97036	0,99128	0,7534
0,4	1,6	11,7	13,0	18,5	0,87269	0,88413	0,94643	0,98352	0,6701
0,5	2	9,83	10,8	13,85	0,81596	0,83138	0,91892	0,97452	0,6000
0,6	2,4	8,69	9,52	11,19	0,75878	0,77715	0,88968	0,96494	0,5414

Таблица П7.38. Модель Н6.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}$ (П6)	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,зип}$
0,05	0,2	3562	3665	13395	0,99994	0,99995	0,99999	1,00000	0,9989
0,1	0,4	533,6	560,0	1869	0,99925	0,99929	0,99981	0,99999	0,9928
0,2	0,8	97,65	104,4	290,6	0,99184	0,99236	0,99803	0,99981	0,9613
0,3	1,2	42,64	45,52	106,9	0,97225	0,97398	0,99382	0,99894	0,9102
0,4	1,6	26,21	27,68	55,77	0,94077	0,94384	0,98791	0,99697	0,8504
0,5	2	19,14	19,92	35,15	0,90079	0,90448	0,98118	0,99378	0,7895
0,6	2,4	15,43	15,80	24,91	0,85591	0,85907	0,97418	0,98952	0,7316

Таблица П7.39. Модель МН6.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}$ (П6)	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,зип}$
0,05	0,2	0,4	139	147	344	0,99857	0,99864	0,9995	0,9999	0,9998
0,05	0,2	0,6	107	116	240	0,99813	0,99827	0,9994	0,9998	0,9998
0,05	0,2	0,8	91	101	188	0,99780	0,99802	0,9993	0,9998	0,9997
0,1	0,4	0,8	46	51,9	98	0,99144	0,99232	0,9970	0,9992	0,9989
0,1	0,4	1,2	38	45,4	71,3	0,98967	0,99123	0,9964	0,9989	0,9985
0,1	0,4	1,6	34	43,0	58,0	0,98849	0,99073	0,9960	0,9988	0,9981
0,2	0,8	1,6	19	23,0	31,5	0,95855	0,96579	0,9848	0,9955	0,9930
0,2	0,8	2,4	17	22,6	24,4	0,95360	0,96516	0,9832	0,9953	0,9907
0,2	0,8	3,2	16	23,1	21,0	0,95065	0,96592	0,9822	0,9955	0,9890
0,4	1,6	3,2	9,8	13,0	12,3	0,84990	0,88450	0,9397	0,9836	0,9618
0,4	1,6	4,8	9,2	14,0	10,4	0,84038	0,89178	0,9370	0,9861	0,9533
0,4	1,6	6,4	8,9	15,1	9,51	0,83515	0,89922	0,9356	0,9883	0,9477
0,6	2,4	4,8	7,5	10,3	8,10	0,72751	0,79237	0,8826	0,9713	0,9095
0,6	2,4	6	7,3	10,9	7,53	0,72027	0,80165	0,8811	0,9747	0,9012
0,6	2,4	7,2	7,2	11,4	7,17	0,71522	0,81041	0,8801	0,9776	0,8950



Таблица П7.40. Модель МН6.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,mp}$	$k\lambda T_{cp}$ (П6)	$P(t)$	$P_{mp}(t)$	$K_c$	$K_{c,mp}$	$K_{c,МП}$
0,05	0,2	0,4	1083	1117	344	0,99982	0,99982	1,0000	1,0000	0,9928
0,05	0,2	0,6	581	602	240	0,99966	0,99967	0,9999	1,0000	0,9802
0,05	0,2	0,8	390	408	188	0,99949	0,99951	0,9999	1,0000	0,9613
0,1	0,4	0,8	194	206	98	0,99794	0,99806	0,9995	1,0000	0,9613
0,1	0,4	1,2	120	131	71	0,99667	0,99694	0,9992	0,9999	0,9102
0,1	0,4	1,6	90,5	102	58	0,99559	0,99608	0,9989	0,9998	0,8504
0,2	0,8	1,6	46,5	52,4	31,5	0,98295	0,98484	0,9958	0,9992	0,8504
0,2	0,8	2,4	34,3	41,4	24,4	0,97698	0,98086	0,9943	0,9987	0,7316
0,2	0,8	3,2	29,2	37,7	21,0	0,97297	0,97900	0,9931	0,9984	0,6305
0,4	1,6	3,2	16,7	20,3	12,3	0,90872	0,92437	0,9801	0,9941	0,6305
0,4	1,6	4,8	14,2	19,6	10,4	0,89342	0,92145	0,9755	0,9935	0,4844
0,4	1,6	6,4	13,1	20,0	9,5	0,88468	0,92301	0,9724	0,9938	0,3895
0,6	2,4	4,8	11,1	14,0	8,1	0,80587	0,84286	0,9614	0,9862	0,4844
0,6	2,4	6	10,4	14,2	7,5	0,79349	0,84461	0,9574	0,9866	0,4098
0,6	2,4	7,2	9,90	14,6	7,2	0,78474	0,84805	0,9542	0,9874	0,3542

Таблица П7.41. Модель МН6.  $L = 2$ ,  $ra = 0,2$ ,  $A = 0,8$ ,  $C = 1,6$ ,  $T_{cp} = 73,63$ ,  $T_{cp,mp} = 52,36$ 

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{mp}(t)$	$P_c(t, МП6)$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,16	0,99657	0,99695	0,99998	11,16	99,42
0,32	0,99314	0,99391	0,99968	11,14	95,33
0,48	0,98973	0,99087	0,99858	11,12	86,17
0,64	0,98633	0,98785	0,99612	11,11	71,61
0,8	0,98295	0,98484	0,99176	11,09	51,68
0,96	0,97957	0,98183	0,99174	11,07	59,57
1,12	0,97621	0,97884	0,99144	11,05	64,02
1,28	0,97285	0,89412	0,99036	11,04	64,49
1,44	0,96951	0,88170	0,98791	11,02	60,34
1,60	0,96618	0,86945	0,98359	11,00	51,47

Здесь  $\delta_1 = 100(P_{mp}(t) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ ,  $\delta_2 = 100(P_c(t, МП5) - P_c(t))/(1 - P_c(t))$ .

Таблица П7.42. Модель Н6.  $L = 1, t = T_0$ . С реконfigurацией

$A$	$k\lambda T_{cp}$			$K_z$		
	ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,2	2530	66838	3322940	0,999980	0,99999939	0,999999898
0,4	401,2	5239	129291	0,999731	0,99998388	0,9999994626
0,8	80,33	514,6	6229,1	0,997078	0,99965001	0,9999766681
1,2	37,28	158,7	1252,8	0,989774	0,99817203	0,9998172368
1,6	23,82	77,29	449,21	0,977216	0,99462253	0,9992835173
2	17,83	47,83	219,83	0,960000	0,98837209	0,9980657640
2,4	14,59	34,10	130,25	0,939201	0,97919981	0,9958571954

Таблица П7.43. Модель Н6.  $L = 2, t = T_0$ . С реконfigurацией

$A$	$k\lambda T_{cp}$			$K_z$		
	ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,2	50145	1678658	99389446	0,9999992	0,999999980	0,9999999997
0,4	3938,0	66084	1930480	0,9999786	0,999998927	0,9999999694
0,8	390,92	3281	46636	0,9995464	0,999953869	0,9999973640
1,2	122,75	685,9	6319,7	0,9977623	0,999645000	0,9999695723
1,6	61,13	257,1	1729,0	0,9939483	0,998641226	0,9998447357
2	38,67	131,8	692,44	0,9881423	0,996432818	0,9994906621
2,4	28,12	81,68	351,43	0,9808296	0,992585973	0,9987306372

Таблица П7.44. Модель МН6.  $L = 1, t = T_0$ . С реконfigurацией

$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$			$K_z$		
		ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,2	0,4	1494,00	39469	1962237	0,999965	0,99999896	0,9999999827
0,2	0,6	1148,56	30345	1508670	0,999955	0,99999865	0,9999999775
0,2	0,8	975,83	25784	1281886	0,999947	0,99999841	0,9999999735
0,4	0,8	266,08	3479,1	85864	0,999595	0,99997572	0,9999991908
0,4	1,2	221,06	2892,4	71389	0,999513	0,99997080	0,9999990267
0,4	1,6	198,54	2599,0	64151	0,999458	0,99996751	0,9999989169
0,8	1,6	61,50	396,79	4809,2	0,996214	0,99954673	0,9999697832
0,8	2,4	55,22	357,53	4335,9	0,995800	0,99949728	0,9999664867

Таблица П7.44 (окончание)

A	C	$k\lambda T_{cp}$			$K_c$		
		ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,8	3,2	52,08	337,90	4099,3	0,995557	0,99946828	0,9999645532
1,6	3,2	20,54	68,15	399,38	0,974364	0,99396193	0,9991955719
1,6	4,8	19,44	65,10	382,77	0,973248	0,99370413	0,9991612543
1,6	6,4	18,89	63,57	374,46	0,972652	0,99356679	0,9991429736
2,4	4,8	13,07	31,49	122,28	0,935413	0,97797225	0,9956137745
2,4	6	12,77	30,97	120,69	0,934598	0,97770915	0,9955616168
2,4	7,2	12,57	30,62	119,63	0,934044	0,97753023	0,9955261504

Таблица П7.45. Модель МН6.  $L = 2, t = T_0$ . С реконfigurацией

A	C	$k\lambda T_{cp}$			$K_c$		
		ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,2	0,4	15220	505475	30221215	0,9999973	0,999999933	0,9999999990
0,2	0,6	8140,2	271071	16206737	0,9999950	0,999999874	0,9999999982
0,2	0,8	5455,6	182225	10894797	0,9999925	0,999999813	0,9999999973
0,4	0,8	1415,50	23541	700887	0,9999412	0,999997045	0,9999999156
0,4	1,2	868,00	14605	434835	0,9999054	0,999995238	0,9999998639
0,4	1,6	649,25	11043	328774	0,9998752	0,999993701	0,9999998200
0,8	1,6	180,40	1524,90	22473,8	0,9990754	0,999904279	0,9999945302
0,8	2,4	129,81	1136,5	16754,2	0,9987741	0,999871607	0,9999926633
0,8	3,2	108,18	971,97	14332,0	0,9985779	0,999849913	0,9999914237
1,6	3,2	36,281	162,73	1171,43	0,9915211	0,997997783	0,9997712276
1,6	4,8	29,458	142,06	1025,45	0,9905270	0,997714618	0,9997388817
1,6	6,4	26,320	132,77	959,936	0,9900010	0,997559792	0,9997211968
2,4	4,8	18,355	59,414	281,195	0,9774405	0,990805225	0,9984262335
2,4	6	16,598	56,679	269,272	0,9767447	0,990415650	0,9983596638
2,4	7,2	15,462	54,944	261,718	0,9762817	0,990151519	0,9983145346

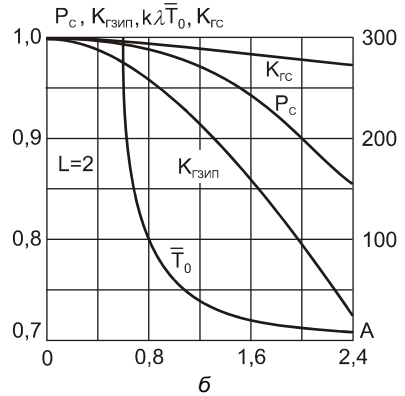
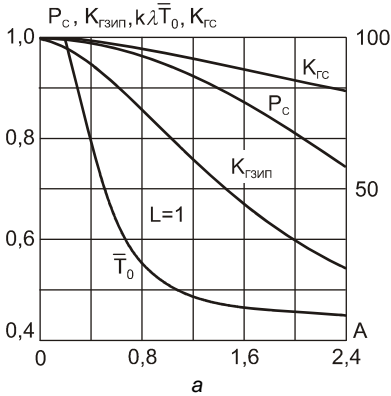


Рис. П7.11. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН6) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

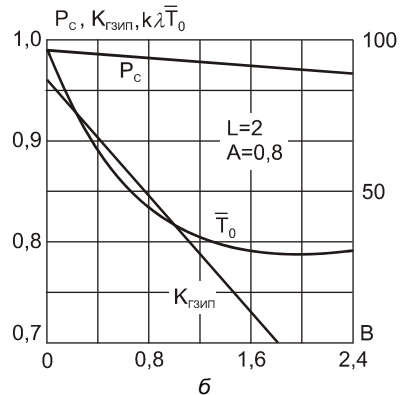
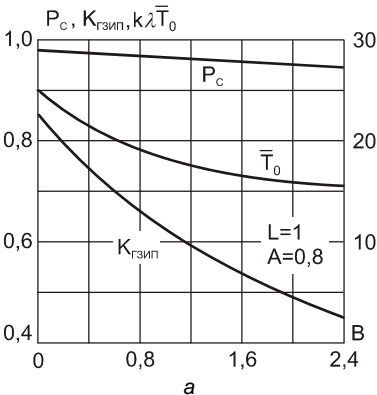


Рис. П7.12. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН6) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.37–П7.45 и рис. П7.11 и П7.12 можно сделать следующие выводы:

- зависимость показателей надежности от среднего времени доставки ЗЧ существенно нелинейная: при увеличении  $T_0$  в 12 раз ( $L = 1$ ) средняя наработка до отказа уменьшается в 27 раз, коэффициент неготовности в 380 раз. Быстро ухудшаются при увеличении  $T_0$  и другие показатели надежности;
- оценка по приближенной формуле (7.81) для расчета средней наработки является завышенной при любых значениях  $A$ . Погрешность в расчете коэффициента готовности по-прежнему велика. Приближенная формула (7.81) для расчета коэффициента готовности дает завышенное значение, а коэффициент неготовности занижен в несколько раз (3–4 раза);
- количество аппаратуры в ДПС влияет на показатели безотказности ОПС не существенно. Так при  $ra = 0,2$ ,  $A = 0,8$  и изменении  $B$  втрое (от 0,8 до 2,4) средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 19 до 16 при  $L = 1$  и от 46,5 до 29,2 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;

- в моделях Н6 и МН6, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П6 и МП6 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1;
- реконфигурация дает значительное улучшение показателей надежности. Так при  $L = 1$ ,  $B = 0$  и  $A = 0,2$  частичная реконфигурация увеличивает среднюю наработку в 10,7 раза, групповая реконфигурация в 283 раза, а полная реконфигурация в 14 080 раз. При  $L = 2$ ,  $B = 0$  и  $A = 0,2$  средняя наработка увеличивается в 14,471 и 27 902 раза соответственно. При появлении ДПС эффективность реконфигурации уменьшается.

## Пример П7.12

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из одной основной подсистемы, включающей две одинаковых мажорированных группы, и дополнительной подсистемы (модель МН7), для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа одной ветви дублированной части системы равна 4000–48 000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Комплект обслуживает до трех одинаковых систем, идентичных основной подсистеме. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,05 \dots 0,6$ ,  $A = 0,3 \text{--} 3,6$ ,  $B = 4ra \text{--} 12ra$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.103), (7.104), (7.106)–(7.109), (7.111)–(7.113) модели МН7. Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.46–П7.54 и на рис. П7.13 и П7.14.

**Таблица П7.46.** Модель Н7.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$T_{cp}$	$T_{cp,up}$	$T_{cp}(П7)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_e$	$K_{e,np}$	$K_{e,зип}$
0,05	0,3	87,3	90,7	229,63	0,99657	0,99670	0,99880	0,99981	0,9665
0,1	0,6	28,9	30,6	65,90	0,97944	0,98061	0,99238	0,99820	0,8990
0,2	1,2	12,1	13,1	21,57	0,90544	0,91244	0,96086	0,98840	0,7534
0,3	1,8	8,29	9,07	12,39	0,80472	0,82002	0,91261	0,97231	0,6335
0,4	2,4	6,72	7,39	8,87	0,69950	0,72267	0,85812	0,95366	0,5414
0,5	3	5,88	6,48	7,12	0,60011	0,62942	0,80374	0,93462	0,4706
0,6	3,6	5,36	5,91	6,12	0,51058	0,54397	0,75243	0,91619	0,4152

Таблица П7.47. Модель Н7.  $L = 2, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$T_{cp}$	$T_{cp,np}$	$T_{cp}(П7)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,ЗИП}$
0,05	0,3	875	601	3162	0,99966	0,99950	0,99991	1,0000	0,9967
0,1	0,6	147	102	468,7	0,99592	0,99416	0,99891	0,99985	0,9802
0,2	1,2	34	23,8	82,20	0,96524	0,95075	0,98897	0,99691	0,9102
0,3	1,8	18	12,6	33,92	0,90500	0,86650	0,96312	0,98723	0,8197
0,4	2,4	13	8,90	19,70	0,82989	0,76362	0,92082	0,97097	0,7316
0,5	3	11	7,21	13,69	0,75148	0,65951	0,86654	0,95057	0,6538
0,6	3,6	9,2	6,26	10,61	0,67570	0,56274	0,80665	0,92831	0,5876

Таблица П7.48. Модель МН7.  $L = 1, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$T_{cp}$	$T_{cp,np}$	$T_{cp}(МП7)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,np}$	$K_{z,ЗИП}$
0,05	0,3	0,5	61,2	44,1	144	0,99511	0,99323	0,9983	0,99917	0,9231
0,05	0,3	0,7	50,0	37,2	108	0,99402	0,99196	0,9979	0,99880	0,8740
0,05	0,3	0,9	43,8	33,5	87,9	0,99317	0,99110	0,9976	0,99852	0,8243
0,1	0,6	1	22,1	17,4	43,3	0,97328	0,96618	0,9902	0,99392	0,8000
0,1	0,6	1,4	19,3	16,1	33,6	0,96933	0,96348	0,9889	0,99276	0,7101
0,1	0,6	1,8	17,7	15,6	28,3	0,96660	0,96237	0,9879	0,99225	0,6335
0,2	1,2	2	10,1	9,02	15,2	0,88777	0,87550	0,9552	0,97196	0,6000
0,2	1,2	2,8	9,22	9,08	12,5	0,87800	0,87625	0,9523	0,97240	0,4922
0,2	1,2	3,6	8,75	9,32	11,1	0,87180	0,87925	0,9505	0,97412	0,4152
0,4	2,4	4	5,87	5,99	6,87	0,66464	0,66981	0,8512	0,91907	0,3846
0,4	2,4	5,6	5,51	6,34	6,08	0,64714	0,68468	0,8481	0,93055	0,2962
0,4	2,4	7,2	5,31	6,71	5,66	0,63662	0,69924	0,8463	0,94037	0,2403
0,6	3,6	6	4,73	5,12	5,03	0,46740	0,49494	0,7473	0,87419	0,2800
0,6	3,6	7,2	4,58	5,31	4,77	0,45548	0,50736	0,7460	0,88650	0,2403
0,6	3,6	8,4	4,47	5,49	4,60	0,44665	0,51929	0,7451	0,89718	0,2104

Таблица П7.49. Модель МН7.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$T_{cp}$	$T_{cp,pp}$	$T_{cp}(МП7)$	$P(t)$	$P_{pp}(t)$	$K_z$	$K_{z,pp}$	$K_{z,ПП}$
0,05	0,3	0,5	382	264,2	1230	0,99922	0,99886	0,999799	0,999978	0,9873
0,05	0,3	0,7	2359	163,6	677,0	0,99872	0,99817	0,999672	0,999943	0,9714
0,05	0,3	0,9	17,0	119,3	441,0	0,99823	0,99749	0,999544	0,999891	0,9499
0,1	0,6	1	75,6	54,15	196,0	0,99210	0,98898	0,997857	0,999454	0,9375
0,1	0,6	1,4	53,0	39,27	115,0	0,98873	0,98484	0,996904	0,998935	0,8808
0,1	0,6	1,8	42,4	32,68	80,20	0,98595	0,98181	0,996092	0,998433	0,8197
0,2	1,2	2	21,7	16,60	39,10	0,94620	0,93027	0,982346	0,993216	0,7895
0,2	1,2	2,8	17,5	14,53	25,80	0,93371	0,92073	0,977676	0,990847	0,6785
0,2	1,2	3,6	15,4	13,78	19,70	0,92517	0,91663	0,974308	0,989684	0,5876
0,4	2,4	4	9,79	8,064	11,40	0,78260	0,74258	0,897124	0,962898	0,5493
0,4	2,4	5,6	8,63	8,063	8,700	0,75733	0,74256	0,883954	0,962892	0,4322
0,4	2,4	7,2	8,03	8,281	7,440	0,74178	0,74840	0,875648	0,965294	0,3542
0,6	3,6	6	7,37	6,237	6,990	0,61361	0,56146	0,774680	0,927544	0,4098
0,6	3,6	7,2	6,95	6,354	6,260	0,59581	0,56747	0,765652	0,931086	0,3542
0,6	3,6	8,4	6,66	6,500	5,790	0,58248	0,57475	0,758925	0,935163	0,3114

Таблица П7.50. Модель МН7.  $L = 2$ ,  $ra = 0,2$ ,  $A = 1,6$ ,  $C = 2$ ,  $T_{cp} = 21,7$ ,  $T_{cp,pp} = 16,6$ 

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{pp}(t)$	$P_c(t,МП7)$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,24	0,98900	0,98565	0,99388	1,305	0,010
0,48	0,97812	0,97150	0,98780	1,303	0,063
0,72	0,96736	0,95755	0,98176	1,301	0,177
0,96	0,95672	0,94381	0,97575	1,298	0,348
1,2	0,94620	0,93026	0,96978	1,296	0,566
1,44	0,93579	0,91691	0,96384	1,294	0,476
1,68	0,92550	0,90375	0,95794	1,292	0,427
1,92	0,91532	0,89078	0,95208	1,290	0,426
2,16	0,90525	0,87799	0,94626	1,288	0,476
2,40	0,89530	0,86539	0,94047	1,286	0,573

Таблица П7.51. Модель Н7.  $L = 1, t = T_0$ . С реконfigurацией

$A$	$k\lambda T_{cp}$			$K_c$		
	ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,3	581	9106	224945	0,99986	0,9999931	0,99999977
0,6	106	813	9884	0,99835	0,9998346	0,99998898
1,2	27,5	104	608,6	0,98504	0,9970275	0,99960382
1,8	15,5	40,9	156,3	0,95560	0,9869976	0,99740626
2,4	11,4	24,5	70,70	0,91436	0,9675511	0,99142120
3	9,5	17,9	42,71	0,86726	0,9396378	0,98027613
3,6	8,4	14,5	30,42	0,81872	0,9057561	0,96367193

Таблица П7.52. Модель Н7.  $L = 2, t = T_0$ . С реконfigurацией

$A$	$k\lambda T_{cp}$			$K_c$		
	ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,3	7594	150132	1661904	0,9999917	0,99999965	0,999999990
0,6	680,9	6629	70364	0,9998023	0,99998353	0,999999059
1,2	88,59	418,1	4023,4	0,9965001	0,99941753	0,999933437
1,8	35,63	111,36	959,38	0,9850307	0,99628549	0,999363632
2,4	21,75	52,40	405,126	0,9635178	0,98809265	0,997285708
3	16,12	32,802	230,902	0,9335793	0,97349823	0,992484970
3,6	13,25	24,060	157,232	0,8981583	0,95269254	0,984039181

Таблица П7.53. Модель МН7.  $L = 1, t = T_0$ . С реконfigurацией

$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$			$K_c$		
		ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,2	0,4	408,3	6406	158245	0,999802	0,9999901	0,99999967
0,2	0,6	334,4	5249	129659	0,999759	0,9999879	0,99999960
0,2	0,8	293,4	4606	113778	0,999725	0,9999863	0,99999954
0,4	0,8	82,30	633,7	7704	0,997877	0,9997878	0,99998586
0,4	1,2	72,13	556,7	6770	0,997584	0,9997586	0,99998391
0,4	1,6	66,48	513,9	6251	0,997383	0,9997385	0,99998257
0,8	1,6	23,55	90,60	532,7	0,982906	0,9966073	0,99954784
0,8	2,4	21,88	84,86	500,2	0,981795	0,9963885	0,99951870



Таблица П7.53 (окончание)

A	C	$k\lambda T_{cp}$			$K_z$		
		ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,8	3,2	20,95	81,67	482,1	0,981112	0,9962543	0,99950082
1,6	3,2	10,39	22,86	67,14	0,910364	0,9661196	0,99104613
1,6	4,8	9,946	22,17	65,61	0,908534	0,9654667	0,99087516
1,6	6,4	9,697	21,79	64,76	0,907485	0,9650930	0,99077732
2,4	4,8	7,717	13,72	29,377	0,815279	0,9042081	0,96309725
2,4	6	7,547	13,52	29,117	0,814398	0,9038132	0,96295073
2,4	7,2	7,426	13,38	28,932	0,813763	0,9035290	0,96284536

Таблица П7.54. Модель МН7.  $L = 2, t = T_0$ . С реконfigurацией

A	C	$k\lambda T_{cp}$			$K_z$		
		ЧР	ГР	ПР	ЧР	ГР	ПР
0,2	0,4	3318	65600	726171	0,9999809	0,99999921	0,999999977
0,2	0,6	2037	40267	445753	0,9999689	0,99999871	0,999999963
0,2	0,8	1468	29019	321234	0,9999569	0,99999820	0,999999949
0,4	0,8	351,5	3424,8	36359	0,9996174	0,99996812	0,999998178
0,4	1,2	246,9	2408,1	25571	0,9994559	0,99995467	0,999997410
0,4	1,6	198,4	1935,7	20559	0,9993233	0,99994362	0,999996778
0,8	1,6	57,70	274,72	2655,1	0,9946950	0,99911778	0,999899185
0,8	2,4	47,13	225,74	2188,2	0,9935624	0,99892993	0,999877722
0,8	3,2	41,95	201,76	1959,9	0,9928118	0,99880555	0,999863510
1,6	3,2	17,21	42,592	340,63	0,9566542	0,98590774	0,996789254
1,6	4,8	15,51	38,934	316,88	0,9534362	0,98488919	0,996557988
1,6	6,4	14,64	37,044	304,70	0,9515951	0,98430810	0,996426098
2,4	4,8	11,09	20,641	144,45	0,8898209	0,94911528	0,982852959
2,4	6	10,60	19,847	141,54	0,8877443	0,94823071	0,982560080
2,4	7,2	10,25	19,295	139,53	0,8862691	0,94760385	0,982352628

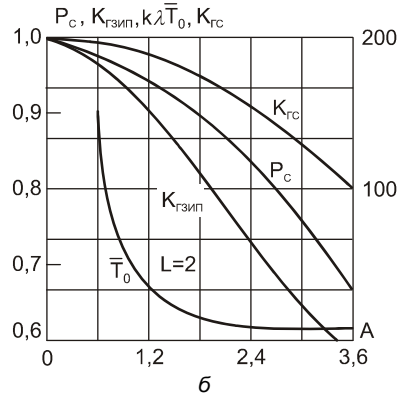
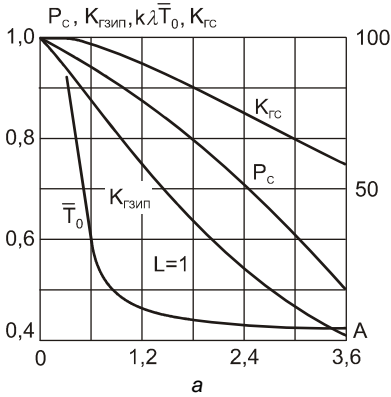


Рис. П7.13. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН7) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

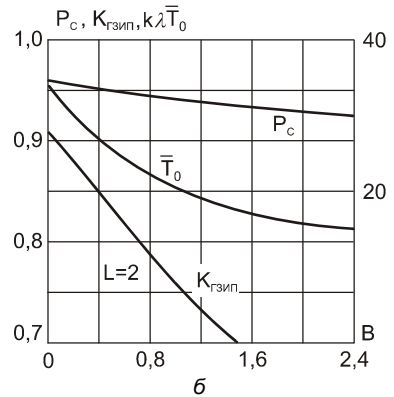
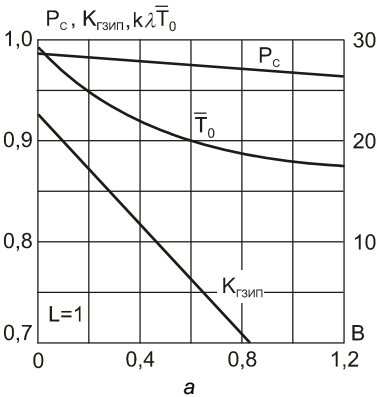


Рис. П7.14. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН7) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.46–П7.54 и рис. П7.13 и П7.14 можно сделать следующие выводы:

- зависимость показателей надежности от среднего времени доставки ЗЧ существенно нелинейная: при увеличении  $T_0$  в 12 раз ( $L = 1$ ) средняя наработка до отказа уменьшается в 16,3 раза, коэффициент неготовности в 441 раз. Быстро ухудшаются при увеличении  $T_0$  и другие показатели надежности;
- оценка средней наработки по приближенной формуле (7.108) является завышенной при любых значениях  $A$ . Погрешность в расчете коэффициента готовности по-прежнему велика. Приближенная формула (7.108) для расчета коэффициента готовности дает завышенное значение, а коэффициент неготовности занижен в несколько раз (3–4 раза);
- количество аппаратуры в ДПС влияет на показатели безотказности ОПС не существенно. Так при  $ra = 0,2$ ,  $A = 1,2$  и изменении  $B$  втрое (от 0,8 до 2,4) средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 10,1 до 8,75 при  $L = 1$  и от 21,7 до 15,4 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;

- в моделях Н7 и МН7, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П7 и МП7 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1;
- реконфигурация дает значительное улучшение показателей надежности. Так при  $L = 1$ ,  $B = 0$  и  $A = 0,3$  частичная реконфигурация увеличивает среднюю наработку в 6,7 раза, групповая реконфигурация в 104 раза, а полная реконфигурация в 2577 раз. При  $L = 2$ ,  $B = 0$  и  $A = 0,3$  средняя наработка увеличивается в 8,7, 172 и 1900 раз соответственно. При появлении ДПС эффективность реконфигурации уменьшается.

## Пример П7.13

Система электропитания состоит из 5 однотипных модулей (МП), обеспечивающих электроэнергией две группы аппаратуры. В первой группе используются два модуля, соединенных по схеме дублирования. Во второй группе применена схема модели Н4, причем допускается реконфигурация при отказе нерезервированного модуля. Это приводит к логике отказа по схеме «два из трех». Для обеспечения надежности в комплект ЗИП включен один запасной модуль с непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки ЗЧ, равном  $T_o = 8$  недель = 1344 час. Найти показатели надежности для времени функционирования 3 года. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 0,5$  года. Интенсивность отказов модуля  $\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

## Решение

По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_o = 5 \cdot 1344 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 0,1344$  при среднем времени доставки 8 недель. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 5 \cdot 8736 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 0,8736$ , время функционирования  $t = 8736, 17\,472$  или  $26\,208$  час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 0,8736, 1,7472$  или  $2,6208$ . Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.126), (7.131)–(7.133) модели МН8. Приближенное значение средней наработки находят по формулам (7.128) при  $L = 1$ . Для модели П8 используют формулы разд. 5.8. Результаты расчетов приведены в табл. П7.55.

Таблица П7.55. Модель МН8

$k\lambda\bar{T}_o$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t,L)$	$K_{zc}$	$k\lambda T_{cp,mp}$	$P_{c,mp}(t,L)$	$P_c(t,1,П8)$	$P_c(t,2,П8)$
0,1344	0,8736	394,3	0,99779	0,99988	383,89	0,99773	0,99279	0,99925
0,1344	1,7472	394,3	0,99558	0,99988	383,89	0,99546	0,98564	0,99849
0,1344	2,6208	394,3	0,99337	0,99988	383,89	0,99320	0,97853	0,99774

Вероятность безотказной работы при периодическом пополнении и  $L = 2$  близка к вероятности при непрерывном пополнении при  $L = 1$ . Это значит, что переход от периодического к непрерывному пополнению позволяет уменьшить вдвое количество запасных модулей. По средней наработке ситуация немного иная:  $k\lambda T_{cp}(1,П8) = 120,88$ ,  $k\lambda T_{cp}(2,П8) = 1159$ ,  $k\lambda T_{cp}(1,Н8) = 394,25$ .

## Пример П7.14

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из основной подсистемы, включающей дублированную и мажорированную части, и дополнительной подсистемы (модель МН8), для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа одной ветви резервированной части системы равна 4000–48 000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Комплект обслуживает до трех одинаковых систем, идентичных основной подсистеме. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,05 \dots 0,6$ ,  $A = 0,25 \dots 3,0$ ,  $B = 4ra - 12ra$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или  $2$ . Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.103), (7.104), (7.106)–(7.109), (7.111)–(7.113) модели МН8. Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.56–П7.60 и на рис. П7.15 и П7.16.

Таблица П7.56. Модель Н8.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(П8)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{zЗИП}$
0,05	0,25	127,83	121,22	337,83	0,99805	0,99794	0,99933	0,97561
0,1	0,5	65,62	36,52	95,04	0,99241	0,98640	0,99561	0,92308
0,2	1	22,53	12,92	29,92	0,95659	0,92550	0,97638	0,80000
0,3	1,5	13,73	7,82	16,59	0,89651	0,82542	0,94475	0,68966
0,4	2	10,36	5,78	11,50	0,82444	0,70770	0,90647	0,60000
0,5	2,5	8,67	4,73	8,98	0,74950	0,58936	0,86578	0,52830
0,6	3	7,68	4,09	7,52	0,67663	0,48034	0,82522	0,47059

Таблица П7.57. Модель Н8.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(П8)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{zЗИП}$
0,05	0,25	1527,0	1474,9	5548,45	0,99984	0,99983	0,999958	0,9981
0,1	0,5	245,46	226,50	801,41	0,99797	0,99779	0,999460	0,9873
0,2	1	51,44	42,43	133,43	0,98075	0,97671	0,994370	0,9375
0,3	1,5	25,17	18,50	52,37	0,94215	0,92213	0,981197	0,8657
0,4	2	16,90	11,21	29,03	0,88839	0,83658	0,960082	0,7895
0,5	2,5	13,19	8,03	19,35	0,82734	0,73237	0,933116	0,7178
0,6	3	11,17	6,33	14,43	0,76447	0,62265	0,902655	0,6538

Таблица П7.58. Модель МН8.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

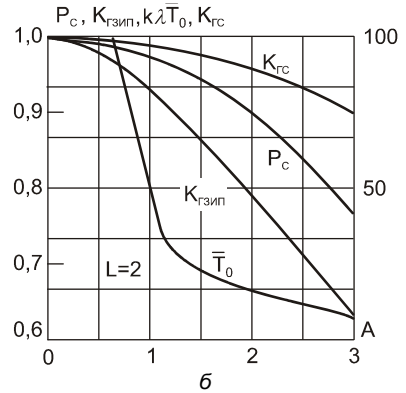
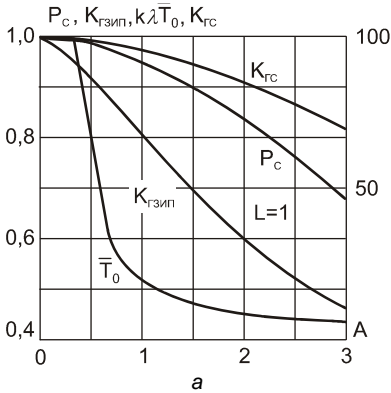
$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(МП8)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{zипп}$
0,05	0,25	0,45	83,39	79,21	196,9	0,99701	0,99685	0,99897	0,93473
0,05	0,25	0,65	66,29	63,05	142,8	0,99624	0,99604	0,99870	0,88650
0,05	0,25	0,85	57,25	54,50	114,2	0,99564	0,99542	0,99850	0,83663
0,1	0,5	0,9	29,60	26,60	57,8	0,98325	0,98138	0,99398	0,82430
0,1	0,5	1,3	25,21	22,78	43,7	0,98036	0,97829	0,99298	0,73132
0,1	0,5	1,7	22,89	20,76	36,2	0,97839	0,97620	0,99231	0,65139
0,2	1	1,8	13,14	10,69	19,61	0,92672	0,91073	0,97161	0,63348
0,2	1	2,6	11,91	9,84	15,7	0,91947	0,90336	0,96922	0,51576
0,2	1	3,4	11,26	9,39	13,8	0,91502	0,89895	0,96778	0,43222
0,4	2	3,6	7,56	5,33	8,39	0,76755	0,68726	0,89934	0,41516
0,4	2	5,2	7,10	5,16	7,27	0,75451	0,67862	0,89629	0,31440
0,4	2	6,8	6,87	5,07	6,71	0,74743	0,67386	0,89461	0,25226
0,6	3	5,4	6,09	3,92	5,87	0,61103	0,46555	0,81911	0,30505
0,6	3	6,6	5,91	3,89	5,53	0,60193	0,46208	0,81767	0,25868
0,6	3	7,8	5,79	3,86	5,30	0,59563	0,45965	0,81665	0,22438

Таблица П7.59. Модель МН8.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

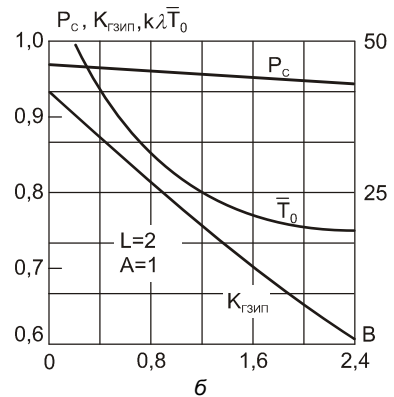
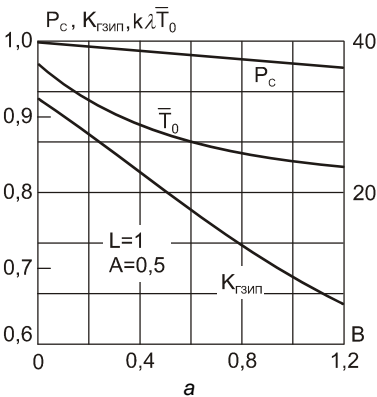
$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(МП8)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{zипп}$
0,05	0,25	0,45	572,65	553,09	6,8	0,99956	0,99955	0,99989	0,99030
0,05	0,25	0,65	330,64	319,37	6,8	0,99924	0,99922	0,99981	0,97600
0,05	0,25	0,85	230,64	222,82	6,8	0,99892	0,99888	0,99972	0,95576
0,1	0,5	0,9	109,16	100,87	6,8	0,99543	0,99506	0,99879	0,94993
0,1	0,5	1,3	72,38	67,01	6,8	0,99312	0,99257	0,99818	0,89571
0,1	0,5	1,7	56,42	52,35	6,8	0,99118	0,99049	0,99767	0,83504
0,2	1	1,8	29,21	24,50	6,8	0,96634	0,96000	0,99029	0,81973
0,2	1	2,6	22,68	19,26	6,8	0,95687	0,94940	0,98768	0,70439
0,2	1	3,4	19,67	16,86	6,8	0,95043	0,94242	0,98595	0,60846
0,4	2	3,6	12,02	8,55	6,8	0,84672	0,79150	0,94833	0,58761
0,4	2	5,2	10,44	7,71	6,8	0,82566	0,77148	0,94299	0,45696
0,4	2	6,8	9,67	7,30	6,8	0,81316	0,76039	0,94000	0,37108
0,6	3	5,4	8,61	5,46	6,8	0,70579	0,57739	0,88887	0,44427
0,6	3	6,6	8,09	5,29	6,8	0,69016	0,56704	0,88563	0,38010
0,6	3	7,8	7,74	5,17	6,8	0,67869	0,55991	0,88338	0,33150

**Таблица П7.60.** Модель МН8.  $L = 2$ ,  $ra = 0,2$ ,  $A = 1,2$ ,  $C = 2$ ,  $k\lambda T_{cp} = 10,75$ ,  $k\lambda T_{cp,np} = 8,59$

$k\lambda t$	$P_c(t)$	$P_{np}(t)$	$P_c(t, \text{МП18})$	$P_{np}(\text{МП18})$	$\delta_1$	$\delta_2$
0,24	0,97792	0,97245	0,99906	0,98593	1,248	0,043
0,48	0,95633	0,94565	0,99343	0,97206	1,245	0,150
0,72	0,93522	0,91960	0,98053	0,95838	1,241	0,301
0,96	0,91457	0,89426	0,95951	0,9449	1,238	0,474
1,2	0,89438	0,86962	0,93056	0,93161	1,234	0,657
1,44	0,87463	0,84566	0,92969	0,9185	1,231	0,561
1,68	0,85532	0,82236	0,92445	0,90558	1,228	0,522
1,92	0,83644	0,79970	0,91245	0,89284	1,225	0,535
2,16	0,81797	0,77767	0,89288	0,88027	1,221	0,588
2,40	0,79991	0,75624	0,86595	0,86789	1,218	0,670



**Рис. П7.15.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН8) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$



**Рис. П7.16.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН8) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

Из данных табл. П7.56–П7.60 и рис. П7.15 и П7.16 можно сделать следующие выводы:

- зависимость показателей надежности от среднего времени доставки ЗЧ существенно нелинейная: при увеличении  $T_0$  в 12 раз ( $L = 1$ ) средняя наработка до отказа уменьшается в 16,6 раза для  $L = 1$  и в 136,7 раза для  $L = 2$ , коэффициент неготовности уменьшается в 261 и 2317 раз соответственно. Быстро ухудшаются при увеличении  $T_0$  и другие показатели надежности;
- оценка средней наработки по приближенной формуле (7.128) является заниженной при любых значениях  $A$ ;
- количество аппаратуры в ДПС влияет на показатели безотказности ОПС не существенно. Так при  $ra = 0,2$ ,  $A = 1$  и изменении  $B$  втрое (от 0,8 до 2,4) средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 13,14 до 11,26 при  $L = 1$  и от 29,21 до 19,67 при  $L = 2$ ;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием в системе структурного резервирования;
- в моделях Н8 и МН8, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П8 и МП8 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.15

В бортовом вычислителе, содержащем три параллельных канала, использовано общее резервирование по схеме «два из трех». Для обеспечения надежности в комплект ЗИП включен запасной модуль (канал) с непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки ЗЧ, равном  $T_0 = 8$  недель = 1344 час. Согласно логике работы мажорированного вычислителя после отказа двух каналов работа на одном канале запрещается из-за недостаточной достоверности получаемых на одном канале результатов вычислений. Найти показатели надежности для времени функционирования 3 года. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 0,5$  года. Оценить степень улучшения показателей надежности, если разрешить работу вычислителя при одном работоспособном канале. Интенсивность отказов модуля  $\lambda = 10^{-4}$  ч<sup>-1</sup>.

## Решение

Если не допускается работа вычислителя на одном канале, то при расчете надежности надо использовать модели Н3 или П3. Если же работа разрешается, то надо использовать модели Н9 или П9. По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 3 \cdot 1344 \cdot 10^{-4} = 0,4032$  при среднем времени доставки 8 недель. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 3 \cdot 8736 \cdot 10^{-4} = 2,6208$ , время функционирования  $t = 8736$ , 17 472 или 26 208 час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 2,6208$ , 5,2416 или 7,8624. Расчет показателей надежности для модели Н3 проводится по формулам (7.1), (7.31), (7.33), а модели Н9 проводится по формулам (7.1), (7.141), (7.146) модели Н9. Для модели П3 и П9 используют формулы разд. 5.3 и 5.9. Результаты расчетов приведены в табл. П7.61–П7.64.

Таблица П7.61. Модель Н3

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}(1)$	$P_c(t,1)$	$K_{zc}(1)$	$k\lambda T_{cp}(2)$	$P_c(t,2)$	$K_{zc}(2)$
0,4032	2,6208	31,87	0,92107	0,99512	228,1	0,98857	0,99951
0,4032	5,2416	31,87	0,84836	0,99512	228,1	0,97728	0,99951
0,4032	7,8624	31,87	0,78140	0,99512	228,1	0,96611	0,99951

Таблица П7.62. Модель П3

$k\lambda T$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}(1)$	$P_c(t,1)$	$K_{zc}(1)$	$k\lambda T_{cp}(2)$	$P_c(t,2)$	$K_{zc}(2)$
1,3104	2,6208	11,79	0,79648	0,96800	40,57	0,93692	0,99246
1,3104	5,2416	11,79	0,63438	0,96800	40,57	0,87781	0,99246
1,3104	7,8624	11,79	0,50527	0,96800	40,57	0,82244	0,99246

Таблица П7.63. Модель Н9

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}(1)$	$P_c(t,1)$	$K_{zc}(1)$	$k\lambda T_{cp}(2)$	$P_c(t,2)$	$K_{zc}(2)$
0,4032	2,6208	646,35	0,99595	0,99984	6342	0,99959	0,999987
0,4032	5,2416	646,35	0,99192	0,99984	6342	0,99917	0,999987
0,4032	7,8624	646,35	0,98791	0,99984	6342	0,99876	0,999987

Таблица П7.64. Модель П9

$k\lambda T$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}(1)$	$P_c(t,1)$	$K_{zc}(1)$	$k\lambda T_{cp}(2)$	$P_c(t,2)$	$K_{zc}(2)$
1,3104	2,6208	102,77	0,98729	0,99710	430,35	0,99696	0,99942
1,3104	5,2416	102,77	0,97473	0,99710	430,35	0,99392	0,99942
1,3104	7,8624	102,77	0,96234	0,99710	430,35	0,99090	0,99942

Из таблиц следует, что при непрерывном пополнении запасов разрешение работать на одном канале увеличивает среднюю наработку в 20,3 раза при  $L = 1$  и в 27 раз при  $L = 2$ . При периодическом пополнении средняя наработка увеличивается соответственно в 8,7 и 10,6 раза.

## Пример П7.16

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из основной подсистемы, включающей троированную и нерезервированную части, и дополнительной подсистемы (модель МН9), для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа одной ветви резервированной части основной подсистемы равна 3000–24 000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Комплект об-



служивает до трех одинаковых систем, идентичных основной подсистеме. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,05 \dots 0,8$ ,  $A = 0,3 \dots 2,8$ ,  $B = 2ra \dots 6ra$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или  $2$ . Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.138), (7.140)–(7.142), (7.145)–(7.147), (7.149) модели МН9. Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.65–П7.68 и на рис. П7.17 и П7.18.

**Таблица П7.65.** Модель Н9.  $m = 3$ ,  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp}(П9)$	$P(t)$	$K_c$	$K_{c,зип}$	$\delta$
0,1	0,3	1398	4783,36	0,999785	0,999944	0,96654	1
0,1	0,4	11,21	2140,81	0,970999	0,985063	0,94595	0,0060
0,1	0,5	7,85	1162,48	0,938278	0,966139	0,92308	0,0034
0,1	0,6	5,92	713,27	0,903638	0,944531	0,89888	0,0021
0,1	0,7	4,96	476,09	0,868255	0,921258	0,87404	0,0015
0,2	0,6	244,0	713,27	0,997544	0,999335	0,89888	0,0873
0,2	0,7	12,89	476,09	0,954065	0,977751	0,87404	0,6570
0,2	0,8	8,67	337,95	0,911812	0,954311	0,84906	0,6901
0,2	0,9	6,51	251,42	0,870946	0,929821	0,82430	0,7333
0,2	1	5,42	194,07	0,831548	0,904872	0,80000	0,7658
0,4	1,2	57,54	125,79	0,979361	0,993868	0,75342	0,1179
0,4	1,3	15,65	104,65	0,920273	0,965639	0,73132	0,6536
0,4	1,4	9,83	88,59	0,867266	0,937838	0,71006	0,6483
0,4	1,5	7,51	76,12	0,819019	0,910683	0,68966	0,6921
0,4	1,6	6,27	66,26	0,774648	0,884316	0,67010	0,7224
0,6	1,8	30,11	51,87	0,941973	0,981182	0,63348	0,3489
0,6	1,9	14,73	46,54	0,878988	0,951183	0,61637	0,6442
0,6	2	10,27	42,08	0,822987	0,922460	0,60000	0,7310
0,6	2,1	8,14	38,32	0,772568	0,895002	0,58435	0,7737
0,6	2,2	6,89	35,12	0,726733	0,868781	0,56940	0,8000
0,8	2,4	20,95	30	0,891775	0,962182	0,54140	0,5219
0,8	2,5	13,46	27,93	0,830454	0,932642	0,52830	0,6943
0,8	2,6	10,23	26,12	0,775623	0,904618	0,51576	0,7667
0,8	2,7	8,44	24,52	0,726149	0,878021	0,50374	0,8064
0,8	2,8	7,29	23,1	0,681174	0,852766	0,49223	0,8314

Здесь через  $\delta$  обозначена степень уменьшения средней наработки до отказа при увеличении нерезервированной части и неизменной резервированной части ( $ra = 0,1$ ) по сравнению со случаем, когда она отсутствует:  $\delta = T_{cp}(r, k_2)/T_{cp}(r, k_1)$ . В остальных строках этого столбца приведены значения  $\delta$  как отношение средних наработок до отказа при увеличении резервированной части при неизменной нерезервированной части:  $\delta = T_{cp}(r_2, \Delta k)/T_{cp}(r_1, \Delta k)$ . Для резервированной части сравниваются соседние значения  $ra$  в таблице. Например, при  $A - 3ra = 0,1$  сравниваются случаи, когда  $ra = 0,2$  и  $0,1$  или  $0,4$  и  $0,2$ .

**Таблица П7.66.** Модель Н9.  $m = 3, L = 2, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp}(П9)$	$P(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$\delta$
0,1	0,3	18481	813498	0,999984	0,9999967	0,99667	1
0,1	0,4	71,79	27493	0,994376	0,9980670	0,99284	0,0029
0,1	0,5	33,77	12026	0,984928	0,9945384	0,98734	0,0011
0,1	0,6	21,89	6191,9	0,971914	0,9893187	0,98018	0,0006
0,1	0,7	16,29	3567,6	0,955813	0,9824328	0,97145	0,0004
0,2	0,6	1605	6191,9	0,999626	0,9999209	0,98018	0,0434
0,2	0,7	49,23	3567,6	0,985659	0,9951779	0,97145	0,3918
0,2	0,8	25,65	2231,7	0,96837	0,9886951	0,96131	0,4747
0,2	0,9	17,75	1486,5	0,948469	0,9805917	0,94993	0,5408
0,2	1	13,84	1040,3	0,92659	0,9710303	0,93750	0,5948
0,4	1,2	193,7	570,37	0,993823	0,9985909	0,91022	0,0722
0,4	1,3	34,42	441,36	0,962344	0,9879307	0,89571	1,0390
0,4	1,4	20,19	349,64	0,931067	0,9760843	0,88082	1,3967
0,4	1,5	14,85	282,63	0,900194	0,9632619	0,86567	1,6348
0,4	1,6	12,06	232,51	0,869875	0,9496581	0,85038	1,8222
0,6	1,8	72,08	164,47	0,975336	0,9938810	0,81973	0,3672
0,6	1,9	27,28	140,96	0,931839	0,9787487	0,80453	0,5549
0,6	2	17,86	122,12	0,891585	0,9631573	0,78947	0,6420
0,6	2,1	13,76	106,82	0,854051	0,9472541	0,77462	0,6970
0,6	2,2	11,47	94,27	0,81885	0,9311652	0,76001	0,7369
0,8	2,4	41,13	75,12	0,943316	0,9847244	0,73159	0,5599
0,8	2,5	22,60	67,75	0,894232	0,9668948	0,71783	0,6818
0,8	2,6	16,29	61,47	0,849836	0,9491421	0,70439	0,7477
0,8	2,7	13,10	56,09	0,809279	0,9315404	0,69126	0,7902
0,8	2,8	11,17	51,44	0,771933	0,9141496	0,67846	0,8206

Таблица П7.67. Модель МН9.  $m = 3, L = 1, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp}(П9)$	$P(t)$	$K_e$	$K_{эип}$
0,1	0,3	0,5	983,10	4783,36	0,999695	0,999921	0,92308
0,1	0,3	0,7	805,21	2140,81	0,999627	0,999903	0,87404
0,1	0,3	0,9	706,39	1162,48	0,999575	0,999890	0,82430
0,1	0,4	0,6	10,38	713,27	0,962213	0,980744	0,89888
0,1	0,4	0,8	8,78	476,09	0,955467	0,977489	0,84906
0,1	0,4	1	7,82	713,27	0,999405	0,974949	0,80000
0,3	0,9	1,3	86,83	476,09	0,989689	0,997085	0,73132
0,3	0,9	1,7	79,85	337,95	0,988793	0,996838	0,65139
0,3	0,9	2,1	75,53	251,42	0,988155	0,996663	0,58435
0,3	1,2	1,6	6,25	194,07	0,825307	0,912155	0,67010
0,3	1,2	2	5,77	125,79	0,984456	0,907272	0,60000
0,3	1,2	2,4	5,44	104,65	0,802191	0,903703	0,54140
0,5	1,5	2,3	35,67	88,59	0,958824	0,987328	0,55509
0,5	1,5	3,1	33,82	76,12	0,956662	0,986724	0,46042
0,5	1,5	3,9	32,73	66,26	0,955206	0,986340	0,39184
0,5	2	2,8	34,57	51,87	0,94379	0,843450	0,49223
0,5	2	3,6	4,87	46,54	0,663014	0,838875	0,41516
0,5	2	4,4	4,65	42,08	0,650712	0,835821	0,35809
0,8	2,4	4	19,40	38,32	0,883617	0,960224	0,38462
0,8	2,4	5,6	18,73	35,12	0,879733	0,959321	0,29623
0,8	2,4	7,2	18,36	30	0,87746	0,958801	0,24033
0,8	3,2	4,8	4,59	27,93	0,498272	0,757475	0,33487
0,8	3,2	6,4	4,33	26,12	0,477809	0,754295	0,26542
0,8	3,2	8	4,18	24,52	0,464767	0,752347	0,21951

Таблица П7.68. Модель МН9.  $m = 3, L = 2, t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp}(П9)$	$P(t)$	$K_e$	$K_{эип}$
0,1	0,3	0,5	11361	31255	0,999963	0,9999924	0,98734
0,1	0,3	0,7	8309,5	16998	0,999939	0,9999876	0,97145
0,1	0,3	0,9	6614,1	10947	0,999916	0,9999827	0,94993
0,1	0,4	0,6	49,190	91	0,999935	0,9964074	0,98018
0,1	0,4	0,8	37,889	56	0,999904	0,9946744	0,96131

Таблица П7.68 (окончание)

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp}(П9)$	$P(t)$	$K_c$	$K_{зип}$
0,1	0,4	1	31,107	39	0,999873	0,9929910	0,93750
0,3	0,9	1,3	335,33	807	0,996973	0,9993365	0,89571
0,3	0,9	1,7	279,29	532	0,996166	0,9991605	0,83504
0,3	0,9	2,1	244,60	392	0,995519	0,9990195	0,77462
0,3	1,2	1,6	12,883	21	0,995148	0,9635004	0,85038
0,3	1,2	2	11,085	15	0,994238	0,9569780	0,78947
0,3	1,2	2,4	9,887	12	0,993505	0,9517987	0,73159
0,5	1,5	2,3	86,819	152,3812	0,981657	0,9956675	0,74566
0,5	1,5	3,1	75,898	104	0,978653	0,9949815	0,64203
0,5	1,5	3,9	69,457	81	0,976622	0,9945219	0,55847
0,5	2	2,8	8,313	11	0,973093	0,9107735	0,67846
0,5	2	3,6	7,308	8,4	0,969991	0,9018299	0,58761
0,5	2	4,4	6,669	7,2	0,967813	0,8957059	0,51507
0,8	2,4	4	34,377	42	0,930376	0,9816894	0,54930
0,8	2,4	5,6	31,484	31	0,923944	0,9802478	0,43221
0,8	2,4	7,2	29,876	26	0,920146	0,9794176	0,35421
0,8	3,2	4,8	6,360	6,8	0,904525	0,8321776	0,48445
0,8	3,2	6,4	5,685	5,7	0,898034	0,8242534	0,38955
0,8	3,2	8	5,279	5,1	0,893953	0,8194507	0,32454

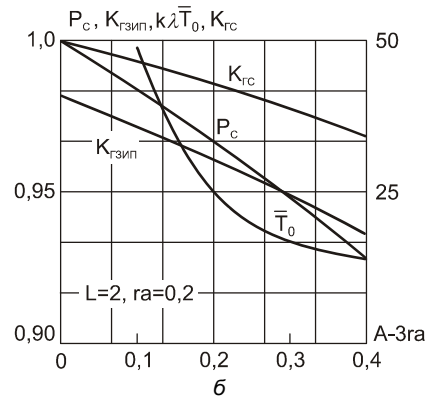
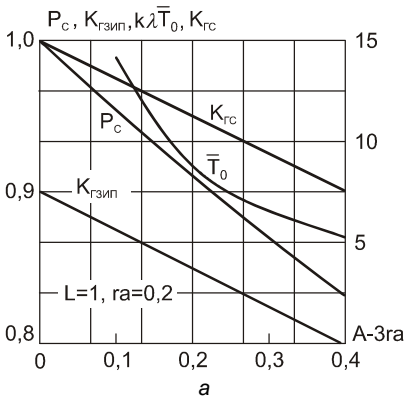
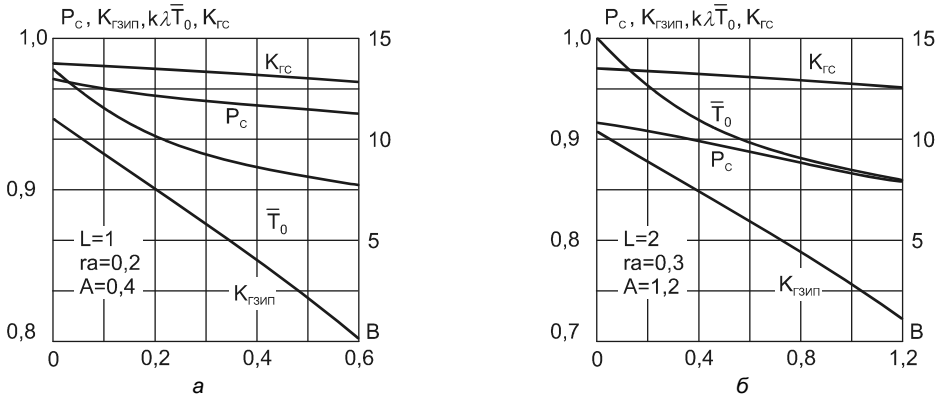


Рис. П7.17. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН9) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L=1$ ; б —  $L=2$



**Рис. П7.18.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН9) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ;  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$ ;  $ra = 0,3$ ,  $A = 0,9$ ; б —  $L = 2$ ;  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$ ;  $ra = 0,3$ ,  $A = 0,9$

Из данных табл. П7.65–П7.68 и рис. П7.17 и П7.18 можно сделать следующие выводы:

- показатели безотказности быстро ухудшаются при увеличении доли нерезервированной части системы. Уже при  $A-3ra = ra = 0,1$ ,  $B = 0$  и  $L = 1$  приведенная средняя наработка до отказа системы уменьшается в 124 раза, а коэффициент неготовности увеличивается в 267 раз по сравнению со случаем, когда нерезервированная часть отсутствует. При  $A-3ra = 0,1$ ,  $ra = 0,2$ ,  $B = 0$  и  $L = 1$  эти показатели изменяются соответственно в 19 и 33 раза;
- степень влияния количества аппаратуры в ДПС на показатели безотказности ОПС существенно зависит от количества ЗЧ. Так при  $L = 1$ ,  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,3$  и изменении  $B$  от 0,2 до 0,6 средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 983 до 706, при  $L = 1$ ,  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$  — от 10,4 до 7,8. При  $L = 2$  влияние существеннее: при  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,3$  и изменении  $B$  от 0,2 до 0,6 приведенная средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 11361 до 6614,1, при  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$  — от 49,19 до 31,1;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Различия особенно заметны при отсутствии в ОПС нерезервированной части;
- в моделях Н9 и МН9, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П9 и МП9 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.17

В условиях примера П7.13 резервирование по схеме «два из трех» заменяется резервированием по схеме «один из трех». Найти показатели надежности для времени функционирования 3 года. Сравнить с вариантом, когда пополнение запасов периодическое с периодом пополнения  $T = 0,5$  года.

## Решение

По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 5 \cdot 1344 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 0,1344$  при среднем времени доставки 8 недель. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 5 \cdot 8736 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 0,8736$ ,

время функционирования  $t = 8736, 17\,472$  или  $26\,208$  час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 0,8736, 1,7472$  или  $2,6208$ . Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.156), (7.166) модели МН10. Коэффициент готовности ЗИП рассчитывают по формуле (1.28). Приближенное значение средней наработки находят по формуле (7.163) при  $L = 1$ . Для модели П10 используют формулы разд. 5.10. Результаты расчетов приведены в табл. П7.69.

Таблица П7.69. Результаты расчетов

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t,L)$	$K_{zc}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P_{c,np}(t,L)$	$P_c(t,1,П10)$	$P_c(t,2,П10)$
0,1344	0,8736	1536	0,99943	0,99997	1515,6	0,99942	0,99801	0,99980
0,1344	1,7472	1536	0,99886	0,99997	1515,6	0,99885	0,99602	0,99959
0,1344	2,6208	1536	0,99830	0,99997	1515,6	0,99827	0,99404	0,99939

Вероятность безотказной работы при периодическом пополнении и  $L = 2$  близка к вероятности при непрерывном пополнении при  $L = 1$ . Это значит, что переход от периодического к непрерывному пополнению позволяет уменьшить вдвое количество запасных модулей. По средней наработке ситуация немного иная:  $k\lambda T_{cp}(1,П10) = 438,70$ ,  $k\lambda T_{cp}(2,П10) = 4283,2$ ,  $k\lambda T_{cp}(1,Н10) = 1536,3$ . Коэффициент готовности ЗИП при непрерывном пополнении  $K_{ззип} = 0,99210$ , а при периодическом пополнении  $K_{ззип} = 0,97432$ .

## Пример П7.18

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из основной подсистемы, включающей троированную и дублированную части, и дополнительной подсистемы (модель МН10), для обеспечения надежности использован комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Средняя наработка до отказа одной ветви резервированной части основной подсистемы равна 3000–48 000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Дополнительная подсистема либо отсутствует, либо имеет поток отказов, превышающий поток отказов одной ветви ОПС в 4–12 раз. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,05\dots 0,6$ ,  $A = 0,25\dots 3,0$ ,  $B = 4ra \dots 12ra$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.156)–(7.157), (7.159)–(7.163), (7.165)–(7.166). Приближенное значение средней наработки до отказа как среднее время пребывания в работоспособном состоянии  $T_{cp,np}$  находим по формуле (7.163), а среднее время по приближенной методике [4]  $T_{cp,np1}$  находим по формуле (7.165). Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.70–П7.73 и на рис. П7.19 и П7.20.

Таблица П7.70. Модель Н10.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(\Pi 10)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$T_{cp,np1}$
0,05	0,25	484	471,3	1278	0,99948	0,99947	0,99983	0,9756	510
0,1	0,5	152	136,2	340	0,99672	0,99634	0,99887	0,9231	160
0,2	1	55,4	43,70	161	0,98210	0,97738	0,99344	0,8000	60,0
0,3	1,5	33,5	24,02	96,5	0,95622	0,93945	0,98324	0,6897	37,2
0,4	2	24,2	16,32	48,7	0,92080	0,88463	0,96895	0,6000	28,0
0,5	2,5	19,2	12,40	31,2	0,87785	0,81744	0,95150	0,5283	23,1
0,6	3	16,0	10,10	22,6	0,82932	0,74297	0,93180	0,4706	20,1

Таблица П7.71. Модель Н10.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}(\Pi 10)$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$k\lambda T_{cp,np1}$
0,05	0,25	5860	5769	21213	0,99997	0,99996	1,0000	0,99797	6160
0,1	0,5	889	861	2928	0,99944	0,99942	0,9999	0,98734	985,0
0,2	1	162	151	957,6	0,99403	0,99341	0,9985	0,93750	197,4
0,3	1,5	69,0	61,8	445,7	0,97968	0,97603	0,9946	0,86567	90,31
0,4	2	41,3	35,3	160,5	0,95592	0,94486	0,9879	0,78947	56,49
0,5	2,5	29,4	23,9	82,09	0,92416	0,90082	0,9784	0,71783	41,29
0,6	3	23,2	18,0	50,81	0,88619	0,84661	0,9667	0,65385	32,98

Таблица П7.72. Модель МН10.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$k\lambda T_{cp}^{(*)}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$k\lambda T_{cp,np1}$
0,05	0,25	0,45	316	308	744	0,99921	0,99919	0,9997	0,9347	337,07
0,05	0,25	0,65	251	245	540	0,99901	0,99898	0,9997	0,8865	273,49
0,05	0,25	0,85	217	212	432	0,99885	0,99882	0,9996	0,8366	241,98
0,1	0,5	0,9	104	99,0	207	0,99522	0,99498	0,9985	0,8243	120,12
0,1	0,5	1,3	89,4	85,2	156	0,99442	0,99415	0,9982	0,7313	107,54
0,1	0,5	1,7	81,4	77,6	130	0,99388	0,99358	0,9980	0,6514	102,82
0,2	1	1,8	40,2	36,33	63,1	0,97544	0,97285	0,9921	0,6335	52,89
0,2	1	2,6	36,9	33,5	50,5	0,97326	0,97059	0,9915	0,5158	52,69
0,2	1	3,4	35,1	32,0	44,0	0,97194	0,96923	0,9911	0,4322	54,28

Таблица П7.72 (окончание)

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,mp}$	$k\lambda T_{cp}^{(*)}$	$P(t)$	$P_{mp}(t)$	$K_e$	$K_{e3ИП}$	$k\lambda T_{cp,mp1}$
0,4	2	3,6	18,7	15,2	27,8	0,89836	0,87630	0,9666	0,4152	29,14
0,4	2	5,2	17,9	14,7	25,6	0,89423	0,87277	0,9656	0,3144	31,64
0,4	2	6,8	17,5	14,5	23,9	0,89189	0,87081	0,9651	0,2523	34,42
0,6	3	5,4	13,2	9,75	15,8	0,79698	0,73516	0,9296	0,3050	22,47
0,6	3	6,6	13,0	9,67	14,6	0,79364	0,73332	0,9290	0,2587	23,86
0,6	3	7,8	12,8	9,62	13,8	0,79135	0,73203	0,9286	0,2244	25,27

(\*) — для модели МП10.

Таблица П7.73. Модель МН10.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$ra$	$A$	$C$	$T_{cp}$	$T_{cp,mp}$	$T_{cp}^{(*)}$	$P(t)$	$P_{mp}(t)$	$K_e$	$K_{e3ИП}$	$T_{cp,mp1}$
0,05	0,25	0,45	2204	2163	7073	0,99989	0,99988	0,99997	0,9903	2313
0,05	0,25	0,65	1276	1249	3657	0,99980	0,99980	0,99995	0,9760	1341
0,05	0,25	0,85	892	872	2303	0,99972	0,99971	0,99993	0,9558	943
0,1	0,5	0,9	402	384	1049	0,99876	0,99870	0,99969	0,9499	441,7
0,1	0,5	1,3	269	255	580,2	0,99815	0,99804	0,99953	0,8957	298,8
0,1	0,5	1,7	212	199	389,2	0,99764	0,99750	0,99940	0,8350	239,5
0,2	1	1,8	98,4	87,6	181,6	0,98989	0,98865	0,99738	0,8197	116,9
0,2	1	2,6	78,3	69,0	112,4	0,98731	0,98562	0,99668	0,7044	96,41
0,2	1	3,4	69,1	60,5	83,16	0,98563	0,98361	0,99621	0,6085	89,20
0,4	2	3,6	33,9	27,2	64,80	0,94279	0,92901	0,98433	0,5876	45,91
0,4	2	5,2	30,6	24,6	53,83	0,93675	0,92187	0,98272	0,4570	45,09
0,4	2	6,8	29,0	23,3	46,37	0,93334	0,91789	0,98182	0,3711	46,47
0,6	3	5,4	20,8	15,7	27,70	0,86551	0,82631	0,96201	0,4443	31,28
0,6	3	6,6	20,0	15,3	23,30	0,86038	0,82158	0,96091	0,3801	31,98
0,6	3	7,8	19,4	15,0	20,52	0,85672	0,81831	0,96015	0,3315	32,99

(\*) — для модели МП10.



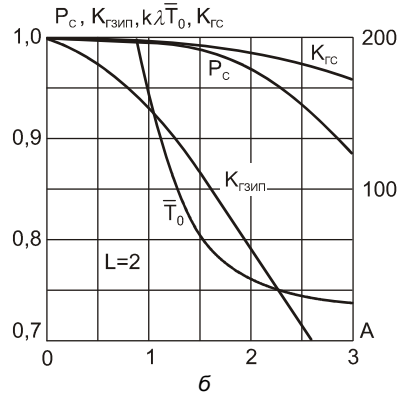
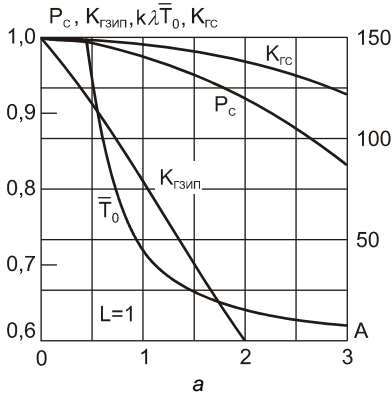


Рис. П7.19. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН10) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$

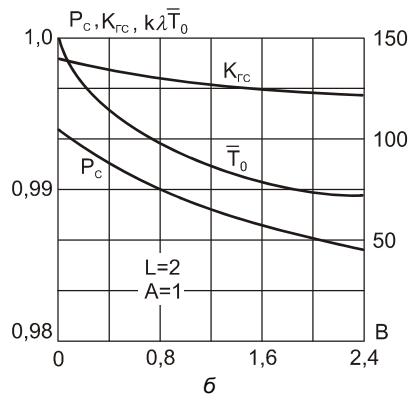
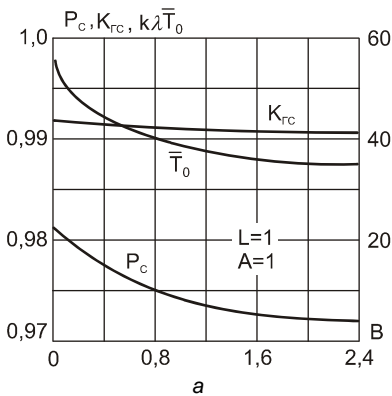


Рис. П7.20. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН10) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ;  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$ ;  $ra = 0,3$ ,  $A = 0,9$ ; б —  $L = 2$ ;  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$ ;  $ra = 0,3$ ,  $A = 0,9$

Из данных табл. П7.70–П7.73 и рис. П7.19 и П7.20 можно сделать следующие выводы:

- расчет средней наработки по формуле (7.163) дает всегда оценку снизу, а по формуле (7.165) — оценку сверху. Поэтому можно пользоваться средним арифметическим этих двух оценок. Но надо иметь в виду, что среднее арифметическое тоже является оценкой сверху. При больших значениях  $A$  в модели МН10 при использовании приближенной методики [4] нарушается принцип когерентности: с увеличением ДПС средняя наработка начинает увеличиваться. Это происходит вследствие роста погрешности. Поэтому для этой области параметров формулу (7.165) использовать нельзя;
- степень влияния количества аппаратуры в ДПС на показатели безотказности ОПС существенно зависит от количества ЗЧ. Так при  $L = 1$ ,  $A = 0,25$  и изменении  $B$  от 0,2 до 0,6 приведенная средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 316 до 217, при  $L = 1$ ,  $A = 0,5$  и изменении  $B$  от 0,4 до 1,2 средняя наработка до отказа уменьшается от 104 до 81,4. При  $L = 2$  влияние существеннее: при  $A = 0,25$  и изменении  $B$  от 0,2 до 0,6 приведенная средняя наработка до отказа уменьшается от 2204 до 892, при  $A = 0,5$  — от 402 до 212;

- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Различия особенно заметны при отсутствии в ОПС резервированной части;
- в моделях Н10 и МН10, как и в моделях Н1 и МН1, средняя наработка до отказа по-прежнему уступает средней наработке в моделях П10 и МП10 по тем же причинам, что и в моделях Н1 и МН1.

## Пример П7.19

Двухуровневая система управления группой технологических объектов (ТО) состоит из двух независимых, взаимозаменяемых и территориально разнесенных центров управления (ЦУ) на верхнем уровне и радиальных средств ввода-вывода и передачи данных для связи центра и технологических объектов на нижнем уровне. Система должна обеспечить непрерывную управляемость всеми технологическими объектами. Для непрерывного бесперебойного питания используются однотипные источники (ИБП) типа PULSAR. В составе ЦУ ИБП дублируются, на нижнем уровне ИБП не резервируются. Для обеспечения надежности в комплект ЗИП включен один (или два) запасной модуль с непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки ЗЧ, равном  $T_0 = 4$  недели = 672 час. Найти показатели надежности для времени функционирования 3 года, если число управляемых ТО оценивается величиной от 4 до 8. Интенсивность отказов модуля  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

## Решение

По исходным данным определяем:  $k\rho = k\lambda\bar{T}_0 = 8 \cdot 672 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,2688$  или  $k\rho = 12 \cdot 672 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,4032$  при среднем времени доставки 4 недели. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = 8 \cdot 8736 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 3,4944$ , время функционирования  $t = 8736$  или 17 472 час. Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 3,4944$  или 6,9888. Расчет показателей надежности проводится по формулам (7.1), (7.168), (7.169), (7.180). Приближенное значение средней наработки находят по формуле (7.178). Для модели П11 используют формулы разд. 5.11. Результаты расчетов приведены в табл. П7.74.

Таблица П7.74. Модель Н11.  $k = 12$  или 20

$k\lambda\bar{T}_0$	$k\lambda t$	$L$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t,L)$	$K_{cc}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P_{c,np}(t,L)$	$k\lambda T_{cp,np1}$	$P_{c,np1}(t,L)$
0,4032	5,242	1	84,09	0,93957	0,99832	75,36	0,93281	56,20	0,91095
0,4032	10,483	1	84,09	0,88279	0,99832	75,36	0,87013	56,20	0,82983
0,4032	15,725	1	84,09	0,82944	0,99832	75,36	0,81166	56,20	0,75593
0,4032	5,242	2	621,4	0,99160	0,99983	590,8	0,99117	412,06	0,97902
0,4032	10,483	2	621,4	0,98327	0,99983	590,8	0,98241	412,06	0,95848
0,4032	15,725	2	621,4	0,97501	0,99983	590,8	0,97374	412,06	0,93838
0,672	8,736	1	29,21	0,74152	0,99137	24,66	0,70165	42,40	0,88372
0,672	17,472	1	29,21	0,54986	0,99137	24,66	0,49231	42,40	0,78097
0,672	26,208	1	29,21	0,40773	0,99137	24,66	0,34543	42,40	0,69016
0,672	8,736	2	129,71	0,93487	0,99857	116,12	0,92753	193,01	0,95575
0,672	17,472	2	129,71	0,87398	0,99857	116,12	0,86031	193,01	0,91345
0,672	26,208	2	129,71	0,81706	0,99857	116,12	0,79796	193,01	0,87303

Методика [4] дает значительную погрешность, причем знакопеременную. Замена средней наработки на отказ средним временем пребывания в работоспособном состоянии дает оценку снизу с приемлемой погрешностью.

Неоднородная система состоит из двух параллельно соединенных подсистем. Каждая подсистема состоит из дублированной пары (элементы 1 и 2) и соединенных с ней последовательно  $r-2$  однотипных элементов.

## Пример П7.20

В однородной смешанной многофункциональной системе, состоящей из основной и дополнительной подсистем, для обеспечения надежности используется комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Основная подсистема состоит из двух параллельно соединенных ветвей. Каждая ветвь состоит из дублированной пары (элементы 1 и 2) и соединенных с ней последовательно одного или двух элементов (модель МН11). Средняя наработка до отказа одного элемента равна 4800–48 000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Дополнительная подсистема либо отсутствует, либо имеет поток отказов, превышающий поток отказов одной ветви ОПС в 4–12 раз. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $a = 0,05 \dots 0,5$ ,  $ra = 0,2 \dots 2,0$ ,  $A = 0,4 \dots 4,0$ ,  $B = 4a \dots 12a$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или 2. Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.169), (7.172), (7.176), (7.178)–(7.180). Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.75–П7.78 и на рис. П7.21 и П7.22.

Таблица П7.75. Модель Н11.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$a$	$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_e$	$K_{зип}$	$k\lambda T_{np1}$	$k\lambda T_{np2}$
0,05	0,2	0,4	142	134	0,99718	0,99702	0,99904	0,9460	151	150
0,1	0,4	0,8	49,0	44,1	0,98380	0,98204	0,99440	0,8491	56,2	54,8
0,15	0,6	1,2	29,2	25,2	0,95976	0,95344	0,98588	0,7534	35,5	34,1
0,2	0,8	1,6	21,4	17,7	0,92799	0,91375	0,97439	0,6701	27,1	25,7
0,25	1	2	17,4	13,9	0,89124	0,86613	0,96092	0,6000	22,7	21,3
0,3	1,2	2,4	15,0	11,6	0,85169	0,81345	0,94619	0,5414	20,0	18,6
0,4	1,6	3,2	12,2	9,03	0,76961	0,70149	0,91488	0,4506	16,8	15,5
0,5	2	4	10,7	7,59	0,68881	0,59047	0,88286	0,3846	15,0	13,7

Таблица П7.76. Модель Н11.  $L = 2$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

$a$	$ra$	$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$k\lambda T_{np1}$	$k\lambda T_{np2}$
0,05	0,2	0,4	1071	1032	0,9996	0,9996	0,9999	0,9928	1121	1120
0,1	0,4	0,8	191	176,8	0,9958	0,9955	0,9989	0,9613	210	208,7
0,15	0,6	1,2	80,7	71,03	0,9852	0,9833	0,9960	0,9102	92,5	90,99
0,2	0,8	1,6	47,7	40,06	0,9670	0,9609	0,9909	0,8504	56,7	55,26
0,25	1	2	33,6	26,98	0,9422	0,9286	0,9835	0,7895	41,1	39,69
0,3	1,2	2,4	26,2	20,20	0,9125	0,8880	0,9743	0,7316	32,8	31,39
0,4	1,6	3,2	19,0	13,60	0,8447	0,7903	0,9519	0,6305	24,4	23,03
0,5	2	4	15,5	10,50	0,7729	0,6832	0,9264	0,5493	20,3	18,92

Здесь:

$k\lambda T_{cp,np}$  — среднее время пребывания системы в работоспособном состоянии как нижняя оценка средней наработки до отказа;

$k\lambda T_{np1}$  — средняя наработка до отказа по методике [4];

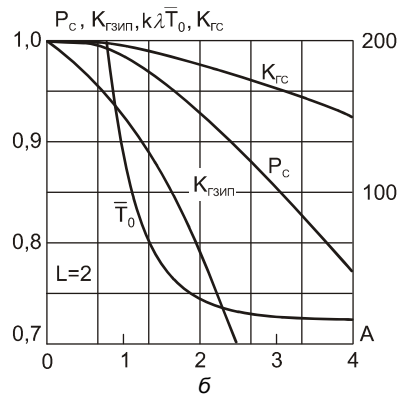
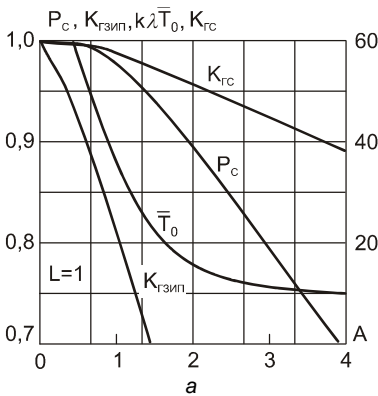
$\lambda T_{np2}$  — среднее время пребывания системы в работоспособном состоянии как нижняя оценка средней наработки до отказа, рассчитанное по методике [4].

Таблица П7.77. Модель МН11.  $L = 1$ ,  $t = T_0$ . Без реконфигурации

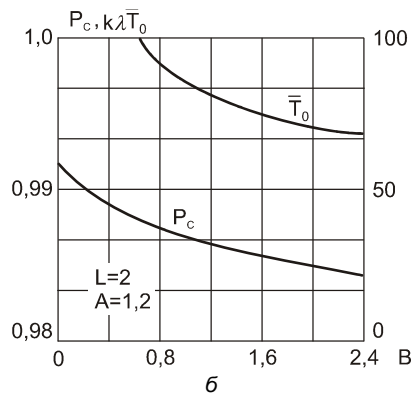
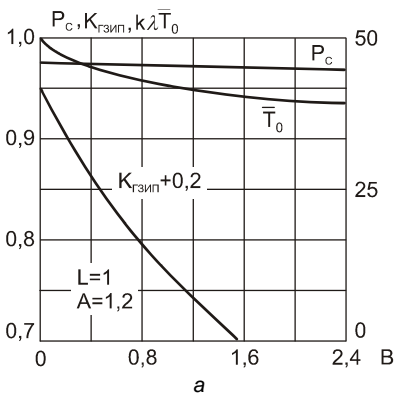
$a$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$k\lambda T_{np1}$	$k\lambda T_{np2}$
0,1	0,6	1	110	105	0,99459	0,99432	0,9983	0,8000	143	142
0,1	0,6	1,4	97,1	92,5	0,99384	0,99353	0,9980	0,7101	131	130
0,1	0,6	1,8	89,5	85,3	0,99332	0,99299	0,9979	0,6335	127	126
0,2	1,2	2	43,1	39,1	0,97255	0,96979	0,9914	0,6000	66,8	65,5
0,2	1,2	2,8	40,2	36,7	0,97061	0,96781	0,9908	0,4922	67,3	66,1
0,2	1,2	3,6	38,6	35,3	0,96941	0,96659	0,9904	0,4152	69,5	68,3
0,4	2,4	4	20,6	17,1	0,89003	0,86921	0,9653	0,3846	38,8	37,4
0,4	2,4	5,6	19,9	16,8	0,88660	0,86652	0,9646	0,2962	42,1	40,6
0,4	2,4	7,2	19,6	16,6	0,88458	0,86498	0,9642	0,2403	45,5	44,1
0,6	3,6	6	14,8	11,4	0,78447	0,72916	0,9298	0,2800	30,6	29,1
0,6	3,6	8,4	14,5	11,29	0,77988	0,72701	0,9292	0,2104	34,2	32,7
0,6	3,6	10,8	14,3	11,23	0,77717	0,72581	0,9289	0,1683	37,7	36,2

**Таблица П7.78.** Модель МН11.  $L = 2, t = T_0$ . Без реконфигурации

$a$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{z,зип}$	$k\lambda T_{np1}$	$k\lambda T_{np2}$
0,1	0,6	1	389	375	0,99846	0,99840	0,9996	0,9375	474	473
0,1	0,6	1,4	273	264	0,99781	0,99773	0,9995	0,8808	340	339
0,1	0,6	1,8	220	212	0,99727	0,99717	0,9993	0,8197	280	279
0,2	1,2	2	94,0	86,7	0,98731	0,98625	0,9969	0,7895	135	134
0,2	1,2	2,8	77,0	71,3	0,98453	0,98331	0,9962	0,6785	117	116
0,2	1,2	3,6	68,6	63,8	0,98266	0,98136	0,9958	0,5876	110	109
0,4	2,4	4	32,6	27,5	0,92896	0,91634	0,9820	0,5493	58,0	56,7
0,4	2,4	5,6	29,8	25,5	0,92255	0,91013	0,9806	0,4322	58,0	56,7
0,4	2,4	7,2	28,3	24,5	0,91877	0,90657	0,9798	0,3542	60,0	58,7
0,6	3,6	6	20,8	16,1	0,84086	0,79995	0,9574	0,4098	41,1	39,7
0,6	3,6	8,4	19,6	15,6	0,83221	0,79366	0,9560	0,3114	43,6	42,2
0,6	3,6	10,8	19,0	15,3	0,82723	0,79021	0,9552	0,2504	46,67	45,29



**Рис. П7.21.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН11) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$



**Рис. П7.22.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН11) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ;  $ra = 0,1, A = 0,4$ ;  $ra = 0,3, A = 0,9$ ; б —  $L = 2$ ;  $ra = 0,1, A = 0,4$ ;  $ra = 0,3, A = 0,9$

Из данных табл. П7.75–П7.78 и рис. П7.21 и П7.22 можно сделать следующие выводы:

- расчет средней наработки по формуле (7.172) как среднего времени пребывания в работоспособном состоянии дает всегда оценку снизу, а по формуле (7.176) — оценку сверху. Поэтому можно пользоваться средним арифметическим этих двух оценок. Но надо иметь в виду, что среднее арифметическое тоже является оценкой сверху. Расчет средней наработки по формуле (7.178) как среднего времени пребывания в работоспособном состоянии по эквивалентной модели также дает всегда оценку сверху, но эта оценка ближе к точному значению. Поэтому следует рекомендовать в качестве оценки средней наработки брать среднее арифметическое оценок, полученных по формулам (7.172) и (7.178). При больших значениях  $A$  в модели МН11 при использовании приближенной методики [4] нарушается принцип когерентности: с увеличением ДПС средняя наработка начинает увеличиваться. Это происходит вследствие роста погрешности. Поэтому для этой области параметров формулы (7.176) и (7.178) использовать нельзя;
- степень влияния количества аппаратуры в ДПС на показатели безотказности ОПС существенно зависит от количества ЗЧ. Так при  $L = 1$ ,  $a = 0,1$ ,  $A = 0,6$  и изменении  $B$  от 0,4 до 1,2 приведенная средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 110 до 89,5. При  $L = 1$ ,  $a = 0,2$ ,  $A = 1,2$  и изменении  $B$  от 0,8 до 2,4 средняя наработка до отказа уменьшается от 39,1 до 35,3. При  $L = 2$  влияние существеннее: при  $A = 0,6$  и изменении  $B$  от 0,4 до 1,2 приведенная средняя наработка до отказа уменьшается от 389 до 220, при  $A = 1,2$  — от 86,7 до 63,8;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием глубокого резервирования.

## Пример П7.21

В условиях примера П7.20 каждый из двух центров управления верхнего уровня двухуровневой системы оснащен системой электропитания, состоящей из десяти однотипных блоков питания (БП), разбитых на две равные группы с групповым дублированием. Для обеспечения надежности в комплект ЗИП включено  $L$  запасных модулей с непрерывным пополнением запасов при среднем времени доставки ЗЧ, равном  $T_0 = 8$  недель = 1344 час. Найти показатели надежности для времени функционирования 3 года. Интенсивность отказов модуля  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ .

## Решение

По исходным данным определяем:  $r = 5$ ,  $k = 40$ ,  $\rho = 8 \cdot 168 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,336$ ,  $k\rho = k\lambda \bar{T}_0 = 0,336 \cdot 8 = 2,688$  при среднем времени доставки 8 недель. Среднее число отказов за 1 год равно  $A = k\lambda t = 40 \cdot 8736 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 3,4944$ , время функционирования  $t = 0,5; 1,0; 1,5$  года (4368, 8736 или 13 104 час). Среднее число отказов за время функционирования  $k\lambda t = 8,736$ , 17,472 или 26,208. При  $L = 0$  запас БП в комплекте ЗИП отсутствует, но после каждого отказа модуля питания направляется заявка на восстановление базовой структуры системы питания. При  $L = 1$  или 2 после каждого отказа модуля питания направляется заявка на пополнение запасов в комплекте ЗИП или восстановление базовой структуры системы питания. Расчет средней наработки системы до отказа проводится путем решения системы из 9 алгебраических уравнений (7.182) методом определителей. Вероятность безотказной работы вычисляются по формуле (7.1). Среднее время пребывания системы в работоспособном

состоянии находят по формулам (7.183), (7.184) и рассматривают как приближенное значение средней наработки. Коэффициент готовности — по формуле (7.185). Результаты расчетов приведены в табл. П7.79.

**Таблица П7.79.** Модель Н12.  $k\lambda\bar{T}_0 = 2,688$

$k\lambda t$	$L$	$k\lambda T_{cp}$	$P_c(t,L)$	$K_{gc}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P_{c,np}(t,L)$	$k\lambda T_{cp,np1}$	$P_{c,np1}(t,L)$	$K_{ззип}(L)$
8,736	0	78,4	0,89450	0,99173	66,55	0,87699	313,4	0,97251	0,27115
17,472	0	78,4	0,80014	0,99173	66,55	0,76910	313,4	0,94578	0,27115
26,208	0	78,4	0,71572	0,99173	66,55	0,67449	313,4	0,91978	0,27115
8,736	1	157	0,94606	0,99659	137,62	0,93850	1418,1	0,99386	0,50516
17,472	1	157	0,89503	0,99659	137,62	0,88077	1418,1	0,98775	0,50516
26,208	1	157	0,84675	0,99659	137,62	0,82660	1418,1	0,98169	0,50516
8,736	2	347	0,97516	0,99870	312,23	0,97241	7124,3	0,99877	0,69282
17,472	2	347	0,95095	0,99870	312,23	0,94558	7124,3	0,99755	0,69282
26,208	2	347	0,92733	0,99870	312,23	0,91949	7124,3	0,99633	0,69282

Заметим, что приближенная методика [4] дает здесь неприемлемую погрешность. Расчеты по формуле (7.186) и (7.182) при  $L = 0$  дают следующие значения среднего времени задержки в выполнении заявки:

$$\Delta t_{зип}(0) = 652,5 \text{ час}, \Delta t_{зип}(1) = 341,4 \text{ час}, \Delta t_{зип}(2) = 183,5 \text{ час}.$$

Это существенно меньше среднего времени доставки 1344 час. Средняя наработка до отказа завышена в 4–20 раз. Такой эффект можно объяснить тем, что в методике в качестве среднего времени восстановления используется безусловная средняя задержка  $\Delta t_{зип}(L)$ , которая учитывает и случаи, когда нет отказа и соответственно нет заявки. Если в качестве среднего времени восстановления использовать условную среднюю задержку, то при  $L = 0$  надо брать среднее время доставки и тогда получим точное значение  $T_{cp}$ , а при  $L > 0$  надо брать  $\Delta t_{зип}(L - 1)$ . При этом также будет завышенное значение средней наработки до отказа, но в меньшей степени: в 2–4 раза.

## Пример П7.22

В однородной многофункциональной системе, состоящей из основной и дополнительной подсистем, для обеспечения надежности используется комплект ЗИП-О с непрерывным пополнением запасов. Основная подсистема состоит из двух параллельно соединенных ветвей. Каждая ветвь состоит из двух одинаковых дублированных частей, соединенных последовательно (модель МН12). Средняя наработка до отказа одной ветви дублированной части равна 300–3000 час. В комплекте ЗИП-О находится одна или две запасные части. Среднее время доставки запасной части равно 2400 час. Дополнительная подсистема либо отсутствует, либо имеет поток отказов, превышающий поток отказов одной из восьми ветвей ОПС в 4–12 раз. Необходимо исследовать зависимость показателей надежности от среднего времени доставки, времени функционирования и от соотношения интенсивностей отказов основной и дополнительной подсистем. Сравнить со стратегией периодического пополнения запасов.

## Решение

По условиям примера находим:  $ra = 0,1 \dots 1,0$ ,  $A = 0,8-8,0$ ,  $B = 4ra-12ra$ . Количество запасных частей  $L = 1$  или  $2$ . Для расчетов используем формулы (7.1)–(7.2), (7.182)–(7.185) модели МН12. Среднее время пребывания системы в работоспособном состоянии находят по формулам (7.183), (7.184) и рассматривают как приближенное значение средней наработки. Результаты расчетов показателей надежности приведены в табл. П7.80–П7.84 и на рис. П7.22 и П7.23.

**Таблица П7.80.** Модель Н12.  $L = 0$ . С восстановлением без ЗИП

$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{зип}$
0,8	962,1	929,30	0,99917	0,99914	0,999799	0,5556
1,6	204,5	189,57	0,99221	0,99160	0,998143	0,3846
2,4	95,01	83,89	0,97506	0,97180	0,994026	0,2941
3,2	59,43	49,79	0,94758	0,93775	0,987161	0,2381
4	43,29	34,41	0,91174	0,89026	0,977652	0,2000
4,8	34,50	26,06	0,87011	0,83178	0,965804	0,1724
6,4	25,54	17,63	0,77834	0,69557	0,936701	0,1351
8	21,17	13,57	0,68530	0,55458	0,903024	0,1111

*Примечание.* Восстановление проводится на основе экстренных доставок при отсутствии комплекта ЗИП.

**Таблица П7.81.** Модель Н12.  $L = 1$

$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_z$	$K_{зип}$	$k\lambda T_{np1}$	$k\lambda T_{np2}$
0,8	4995,6	4866,8	0,99984	0,99984	0,999969	0,84906	67645	67186
1,6	586,39	552,90	0,99728	0,99711	0,999468	0,67010	5640	5546
2,4	204,71	185,20	0,98834	0,98712	0,997705	0,54140	1854	1807
3,2	108,47	93,56	0,97093	0,96638	0,994137	0,45064	970,6	937,7
4	71,02	58,22	0,94523	0,93360	0,988566	0,38462	631,16	605,2
4,8	52,58	40,96	0,91275	0,88942	0,981026	0,33487	462,7	440,6
6,4	35,47	25,10	0,83491	0,77493	0,960769	0,26542	302,7	284,8
8	27,83	18,13	0,75017	0,64323	0,935273	0,21951	228,3	212,6



Таблица П7.82. Модель Н12.  $L = 2$ 

$A$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_e$	$K_{e3ИП}$	$k\lambda T_{np1}$	$k\lambda T_{np2}$
0,8	31742	31091	0,99997	0,99997	0,999996	0,96131	4318193	4311103
1,6	1958,2	1871	0,99918	0,99915	0,999866	0,85038	69519	69051
2,4	490,61	453,99	0,99512	0,99473	0,999193	0,73159	11025	10882
3,2	212,38	189,07	0,98505	0,98322	0,997478	0,63052	3875	3800,2
4	121,62	103,69	0,96765	0,96216	0,994383	0,54930	1970,0	1920,4
4,8	81,98	66,8	0,94313	0,93066	0,989759	0,48445	1224,1	1186,5
6,4	49,03	36,52	0,87763	0,83925	0,976022	0,38955	651,23	624,79
8	35,79	24,56	0,79969	0,72200	0,957152	0,32454	434,21	412,83

Таблица П7.83. Модель МН12.  $L = 1$ 

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_e$	$K_{e3ИП}$	$k\lambda T_{np1}$
0,1	0,8	1,2	4240,6	4131,4	0,99981	0,99981	0,999963	0,75342	45045
0,1	0,8	1,6	3863,0	3763,8	0,99979	0,99979	0,999959	0,67010	38147
0,1	0,8	2	3636,5	3543,2	0,99978	0,99977	0,999957	0,60000	35989
0,2	1,6	2,4	544,2	513,49	0,99706	0,99689	0,999427	0,54140	5324
0,2	1,6	3,2	523,1	493,78	0,99695	0,99676	0,999405	0,45064	5708
0,2	1,6	4	510,4	481,95	0,99687	0,99669	0,999390	0,38462	6386
0,4	3,2	4,8	106,0	91,81	0,97026	0,96575	0,994026	0,33487	1205
0,4	3,2	6,4	104,8	90,93	0,96992	0,96542	0,993969	0,26542	1525
0,4	3,2	8	104,0	90,41	0,96971	0,96522	0,993934	0,21951	1909
0,6	4,8	7,2	51,84	40,71	0,91156	0,88878	0,980914	0,24033	639
0,6	4,8	9,6	51,47	40,59	0,91096	0,88847	0,980857	0,18701	860
0,6	4,8	12	51,25	40,51	0,91059	0,88826	0,980823	0,15294	1121
0,8	6,4	9,6	34,99	25,04	0,83284	0,77446	0,960684	0,18701	441
0,8	6,4	12,8	34,75	25,02	0,83179	0,77430	0,960642	0,14417	612
0,8	6,4	16	34,60	25,00	0,83113	0,77414	0,960616	0,11724	815
1	8	12	27,42	18,11	0,74695	0,64291	0,935215	0,15294	343
1	8	16	27,21	18,10	0,74527	0,64276	0,935186	0,11724	485
1	8	20	27,08	18,09	0,74422	0,64260	0,935169	0,09502	653

Таблица П7.84. Модель МН12.  $L = 2$ 

$ra$	$A$	$C$	$k\lambda T_{cp}$	$k\lambda T_{cp,np}$	$P(t)$	$P_{np}(t)$	$K_c$	$K_{зип}$	$k\lambda T_{np1}$
0,1	0,8	1,2	19996	19587	0,99996	0,99996	0,999993	0,91022	1098943
0,1	0,8	1,6	15314	15000	0,99995	0,99995	0,999991	0,85038	517700
0,1	0,8	2	12885	12622	0,99994	0,99994	0,999990	0,78947	329834
0,2	1,6	2,4	1519,2	1452,0	0,99895	0,99890	0,999827	0,73159	34062
0,2	1,6	3,2	1333,3	1274,6	0,99880	0,99875	0,999803	0,63052	25608
0,2	1,6	4	1232,5	1178,5	0,99870	0,99864	0,999787	0,54930	22994
0,4	3,2	4,8	195,1	174,4	0,98373	0,98182	0,997266	0,48445	3430
0,4	3,2	6,4	187,4	167,8	0,98307	0,98111	0,997159	0,38955	3659
0,4	3,2	8	183,1	164,1	0,98268	0,98069	0,997095	0,32454	4131
0,6	4,8	7,2	78,9	64,9	0,94098	0,92871	0,989458	0,35421	1373
0,6	4,8	9,6	77,5	64,0	0,93994	0,92774	0,989313	0,27766	1663
0,6	4,8	12	76,7	63,5	0,93934	0,92720	0,989228	0,22788	2034
0,8	6,4	9,6	47,9	36,1	0,87493	0,83754	0,975742	0,27766	822
0,8	6,4	12,8	47,3	35,9	0,87345	0,83671	0,975609	0,21498	1060
0,8	6,4	16	47,0	35,8	0,87269	0,83630	0,975531	0,17519	1349
1	8	12	35,0	24,43	0,79567	0,72075	0,956933	0,22788	587
1	8	16	34,7	24,37	0,79410	0,72017	0,956829	0,17519	785
1	8	20	34,5	24,34	0,79304	0,71988	0,956768	0,14218	1022

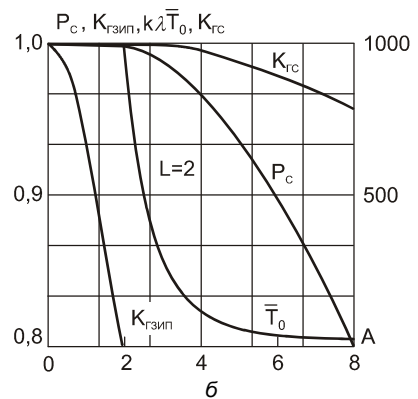
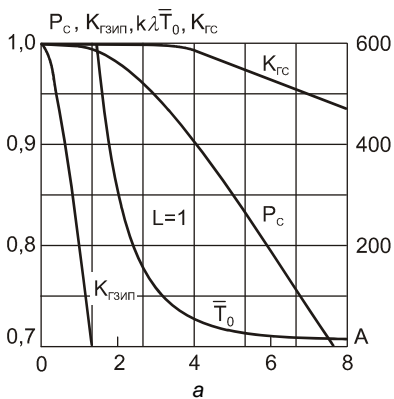
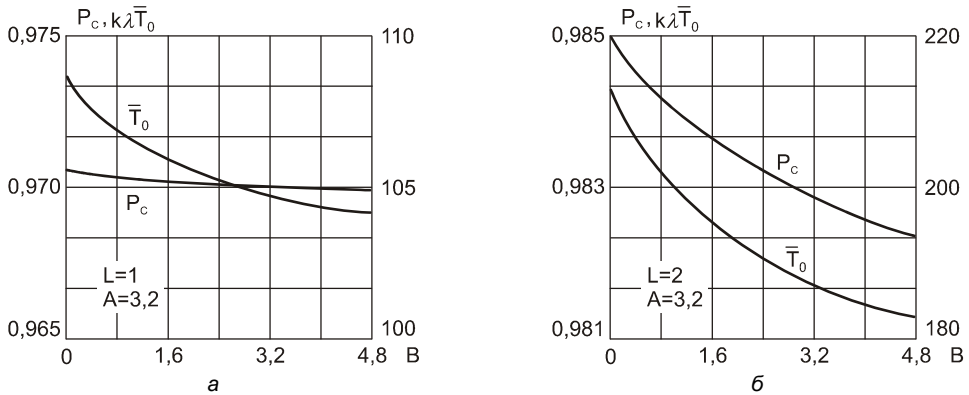


Рис. П7.23. Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН12) от среднего времени доставки ЗЧ: а —  $L = 1$ ; б —  $L = 2$



**Рис. П7.24.** Зависимость показателей надежности многофункциональной системы (модель МН12) от сложности ДПС: а —  $L = 1$ ;  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$ ;  $ra = 0,3$ ,  $A = 0,9$ ; б —  $L = 2$ ;  $ra = 0,1$ ,  $A = 0,4$ ;  $ra = 0,3$ ,  $A = 0,9$

Из данных табл. П7.80–П7.84 и рис. П7.23 и П7.24 можно сделать следующие выводы:

- расчет средней наработки по формуле (7.184) как среднего времени пребывания в работоспособном состоянии дает всегда оценку снизу, а по формулам (7.182) при  $L = 0$  и (7.186) — оценку сверху. Оценка с помощью приближенной методики [4] дает ошибку в 10 раз и более. Поэтому формулы (7.182) и (7.186) приближенной методики использовать нельзя;
- степень влияния количества аппаратуры в ДПС на показатели безотказности ОПС существенно зависит от количества ЗЧ. Так при  $L = 1$ ,  $a = 0,1$ ,  $A = 0,8$  и изменении  $B$  от 0,4 до 1,2 приведенная средняя наработка до отказа ОПС  $k\lambda T_{cp}$  уменьшается от 4240,6 до 3636,5. При  $L = 1$ ,  $a = 0,2$ ,  $A = 1,6$  и изменении  $B$  от 0,8 до 2,4 средняя наработка до отказа уменьшается от 544,2 до 481,95. При  $L = 2$  влияние существеннее: при  $A = 0,8$  и изменении  $B$  от 0,4 до 1,2 приведенная средняя наработка до отказа уменьшается от 19 996 до 12 885, при  $A = 1,2$  — от 1519,2 до 1232,5;
- коэффициент готовности системы существенно больше коэффициента готовности ЗИП. Это можно объяснить наличием глубокого резервирования.