

из-за разнознаковых изгибающих моментов  $I$  и напряжения изменяются от 132 МПа до 129 МПа.

График изменения общих коэффициентов запаса по нормальным и касательным напряжениям в сечении  $B$  (рис. 5, б) также показывает, что наиболее нагруженной остается правая (верхняя) ступица, коэффициенты запаса в исследуемом сечении которой уменьшаются с 2,15 до 1,77.

С увеличением угла склона в сечении  $B$  возможно увеличение эквивалентных напряжений и уменьшение коэффициента запаса с приближением к экстремальным значениям. В целом проведенная модернизация показала, что в установленном диапазоне углов склона коэффициент запаса и, как следствие, эквивалентные напряжения не уменьшаются ниже предельных значений.

## ВЛИЯНИЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА РИСК ОТКАЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. В. Шевченко

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. И. Михайлов, д-р техн. наук, профессор

Основными показателями надежности восстанавливаемых систем являются наработка на отказ  $T$ , функция готовности  $K_d(t)$ , коэффициент готовности  $K_r$  [1]–[3]. Эти показатели зависят от следующих основных факторов: вид и кратность резервирования, дисциплина обслуживания. Для повышения надежности техники наиболее часто применяются два вида резервирования: с постоянно включенным резервом и по методу замещения. При этом обслуживание системы может осуществляться с двумя видами приоритета – прямым и обратным.

При прямом приоритете техника обслуживается в порядке ее поступления в ремонт.

При обратном приоритете первой обслуживается система, поступившая в ремонт последней. Структурное резервирование с возможностью восстановления отказавших элементов в процессе функционирования системы является наиболее эффективным способом обеспечения и повышения надежности техники и снижения техногенного риска. Однако применение резервирования удорожает технику и ее эксплуатацию. Поэтому кратность резервирования ограничена, и в большинстве случаев применяется резервирование с кратностью от 1. Из двух указанных видов резервирования наибольший выигрыш надежности достигается при резервировании замещением.

Для резервированной системы замещением:

$$T = T_0 \sum_{i=0}^m \frac{1}{\rho^i}; \quad K_r = \frac{T}{T + \frac{1}{\mu}},$$

где  $\rho$  – вероятность отказа;  $T_0$  – срок службы системы до первого отказа. Показатели надежности зависят от числа обслуживающих бригад. Формулы для любых видов обслуживания легко получить топологическими методами расчета надежности. Приведем формулы для двух обслуживающих бригад:

$$T = T_0 \left( \sum_{i=0}^m \frac{2^i}{(i+1)! \rho^i} + \frac{2^{m-1}}{(m+1)! \rho^m} \right); \quad K_r = \frac{T}{T + \frac{1}{\mu}}$$

Тогда

$$T = T_0 \left( \sum_{i=0}^{m-1} \frac{2^i}{\rho^i} + \frac{2^{m-1}}{\rho^m} \right); \quad K_r = \frac{T}{T + \frac{1}{2\mu}}$$

Исследования свойств структурного резервирования показывают, что для случая высоконадежных систем, когда  $\rho < 0,001$ , дисциплина обслуживания не оказывает существенного влияния на надежность резервированных восстанавливаемых систем.

Риск системы определяется по формуле

$$R(t) = rM(t) = r\lambda \int_0^t \rho_m(\tau) d\tau,$$

где  $M(t)$  – среднее число отказов системы в течение времени  $t$ ;  $\rho_m(\tau)$  – вероятность пребывания системы в предотказовом состоянии в момент  $t$ .

*Пример:* срок службы системы  $T_0 = 380$  ч; время непрерывной работы  $t = 4,2$  ч; интенсивность отказа системы  $\lambda = 1,5$  ч;  $\rho$ , которое может быть равно 1; 0,1; 0,05; 0,01; кратность резервирования  $m = 1$ ; риск из-за отказа системы  $r = 8,5$  усл. ед.: допустимый риск в течение времени непрерывной работы  $R(1000) = 275$  усл. ед. Определение наработки на отказ  $T$  и коэффициента готовности  $K_r$  системы.



Рис. 1. Общее постоянное резервирование (а) и резервирование замещением (б)



Рис. 2. Структурные схемы резервированных систем: а – одна обслуживающая бригада; б – две обслуживающие бригады

Для дублированной системы замещением:

$$T = T_0 \left( \frac{1}{\rho} \right); \quad K_r = \frac{1 + \rho}{1 + \rho + \rho^2}.$$

Для дублированной системы с одной обслуживающей бригадой ( $u = 1$ ):

$$T = T_0 \left( 1 + \frac{1}{\rho} \right); \quad K_r = \frac{1 + \rho}{1 + \rho + \rho^2}.$$

Для дублированной системы с двумя обслуживающими бригадами ( $u = 2$ ):

$$T = T_1 = T_0 = \frac{1}{\lambda}; \quad K_r = \frac{1}{1 + \rho}.$$

Приведенные формулы позволяют заключить, что наработка на отказ и коэффициент готовности резервированной системы являются функциями  $\rho$ . Это позволяет автоматизировать расчеты, используя MS Excel.

Наработка на отказ нерезервированной системы не зависит от восстановления и равна среднему времени безотказной работы системы.

На рис. 1 приведены значения коэффициента готовности  $K_r$  нерезервированной системы при всех заданных значениях  $\rho$ .

	A	B	C	D	E	F
1						
2	$T_0 =$	380				
3	$t =$	4,2				
4	$\lambda =$	1,5				
5	$r =$	8,5				
6	$r1000 =$	275				
7						
8		$\rho$	1	0,1	0,05	0,01
9	наработка на отказ с пвр (1 бр)	TP1	570	2280	4180	19380
10	наработка на отказ с пвр (2 бр)	TP2	570	2280	4180	19380
11	наработка на отказ с зам (1 бр)	TZ1	760	4180	7980	38380
12	наработка на отказ с зам (2 бр)	TZ2	760	4180	7980	38380
13	коэф. готовности с пвр (1 бр)	KP1	0,6	0,983607	0,995475	0,999804
14	коэф. готовности с пвр (2 бр)	KP2	0,75	0,991736	0,997732	0,999902
15	коэф. готовности с зам (1 бр)	KZ1	1	1,081081	1,045131	1,009801
16	коэф. готовности с зам (2 бр)	KZ2	1,2	1,085973	1,046373	1,009851

Рис. 1. Значение коэффициента готовности  $K_r$  нерезервированной системы при всех заданных значений  $\rho$

Анализ данных рис. 1 позволяет сделать следующие выводы при всех заданных значениях  $\rho$ .

Наработка на отказ резервированной системы с кратностью  $m = 1$  не зависит от числа ремонтных бригад.

При малых значениях  $\rho$  наработка на отказ дублированной системы замещением практически вдвое больше, чем при дублировании с постоянно включенным резервом.

Резервирование с восстановлением является средством повышения наработки на отказ системы: так, например, в случае резервирования замещением при  $\rho = 0,01$  наработка на отказ составляет примерно 1664 ч.

Число ремонтных бригад оказывает незначительное влияние на коэффициент готовности дублированной системы, если  $\rho$  мало: так, коэффициент готовности дублированной системы с постоянно включенным резервом и  $\rho = 0,05$  при одной и двух бригадах обслуживания составляет 0,9954 и 0,9977 соответственно.

При малых  $\rho$  вид резервирования практически не влияет на величину коэффициента готовности: например, коэффициент готовности системы при одной бригаде обслуживания составляет 0,999 и 1,009 соответственно.

#### **Л и т е р а т у р а**

1. Альгин, В. Б. Надежность технически сложных изделий в свете «Индустрии 4.0» / В. Б. Альгин, Н. Н. Ишин // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; ред. кол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – 2017. – Вып. 6. – С. 43–54.
2. Арсаланов, А. М. Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях / А. М. Арсаланов. – М. : Машиностроение, 1987. – 167 с.
3. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984.