

Определение надежности невосстанавливаемых резервированных технических изделий

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Проблема надежности становится все более острой в связи с развитием техники, важностью задач, выполняемых ею, повышением требований к безопасности и срокам эксплуатации. Использование ЭВМ для хранения и обработки статистических данных, проведения расчетов показателей надежности, прогнозирования состояния технических систем, хранения и выдачи информации позволяет свести к минимуму затраты времени, ресурсов и средств на исследование надежности в процессе создания нового изделия.

Отказ технического изделия - это событие, заключающееся в нарушении векторного неравенства:

$$a \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\} \leq x \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)\} \leq b \{b_1, \dots, b_i, \dots, b_n\},$$

где x_i - i -й технический параметр, определяющий целевое назначение изделия;

a_i, b_i - границы поля допуска на технический параметр.

Поскольку отказы технических изделий являются случайными событиями, то теория вероятностей и математическая статистика являются основным аппаратом, используемым при исследовании надежности, а сами характеристики надежности должны выбираться из числа показателей, принятых в теории вероятностей. При этом качественное определение надежности является недостаточным, так как не позволяет учитывать надежность аппаратуры при планировании использования изделий на различных объектах, формулировать требования к надежности к проектируемым изделиям, сравнивать различные варианты построения изделий, рассчитывать сроки службы и т.д.

В качестве количественных характеристик надежности используют следующие величины: вероятность безотказной работы $P(t)$, вероятность отказа $Q(t)$, частота отказов $a(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$. В табл. 1 приведены основные соотношения, устанавливающие функциональную связь между этими показателями.

В данной работе за основную количественную меру надежности невосстанавливаемых изделий принята *вероятность безотказной работы изделия* в течение определенного времени $P(t)$ в определенных условиях. При этом предполагаем, что в момент включения в работу изделие всегда находится в исправном состоянии. Действительно, если отказ возникает во время хранения, то он будет обнаружен при подготовке к работе или проведении профилактических мероприятий и изделие будет заменено исправным.

В целях обеспечения надежности технических изделий широко используется введение избыточности, т.е. дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых для выполнения изделием заданных функций. Одним из методов повышения надежности путем введения избыточности является *резервирование*, т.е. применение дополнительных средств и (или) возможностей для сохранения работоспособного состояния изделия при отказе одного или нескольких его элементов.

Таблица 1 – Взаимосвязь между основными количественными характеристиками надежности

Показатель	Формулы для определения показателей			
	P(t)	Q(t)	a(t)	λ(t)
P(t)	-	1 - P(t)	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$-\frac{1}{p(t)} \frac{dP(t)}{dt}$
Q(t)	1 - Q(t)	-	$\frac{dQ}{dt}$	$\frac{1}{1-Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt}$
a(t)	$\int_t^{\infty} a(x)dx$	$\int_0^t a(x)dx$	-	$\frac{a(t)}{\int_t^{\infty} a(x)dt}$
λ(t)	$\exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right)$	$1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right)$	$\lambda(t) \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right)$	-

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для ориентировочного расчета надежности невосстанавливаемых изделий, при этом использованы следующие допущения:

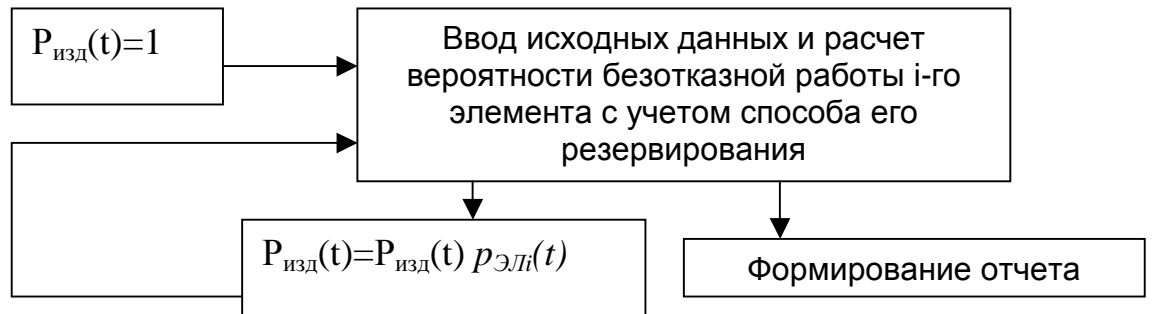
- все элементы одного типа являются равнонадежными;
- все элементы работают в режиме, предусмотренном техническими условиями;
- не учитывается старение и износ элементов, т.е. интенсивность отказов элементов не зависит от времени;
- отказы элементов являются случайными и независимыми событиями.

Разработанный программный продукт позволяет определить вероятность безотказной работы изделия $P_{\text{изд}}(t)$, представляющего собой основное соединение N элементов, по известным значениям этого параметра для отдельных элементов $p_{\text{ЭЛ}i}(t)$:

$$P_{\text{изд}}(t) = \prod_{i=0}^N p_{\text{ЭЛ}i}(t).$$

Каждый из элементов, входящих в состав изделия, может не иметь резерва или резервироваться одним из способов, приведенных в табл. 2. При включении резервных элементов по способу замещения учитывается, что до момента включения в работу резервные элементы могут находиться в одном из трех состояний: нагруженном резерве (резерв работает в режиме основного элемента, т.е. нельзя определить, какой из элементов основной, а какой – резервный); ненагруженном резерве (резервные элементы находятся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента); облегченном резерве (один или несколько резервных элементов находятся в менее нагруженном режиме, чем основной. Вероятности безотказной работы отдельного элемента резервированного изделия за некоторый промежуток времени t являются исходными данными для расчета. Их можно определить статистическим путем по результатам опытной эксплуатации или испытаний как отношение числа элементов, оставшихся ис-

правными к концу периода исследования, к начальному числу элементов. Алгоритм расчета показан на рис.1.



Цикл по элементам изделия

Рисунок 1 - Укрупненная блок-схема программного продукта

Таблица 2 – Способы резервирования элементов

Способ резервирования	Вероятность безопасной работы изделия
Общее резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью	$P_{\text{изд}}(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^n p_i(t)]^{m+1}$
Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью	$P_{\text{изд}}(t) = \prod_{i=1}^n \{1 - [1 - p_i(t)]^{m_i+1}\}$
Общее резервирование замещением с целой кратностью (принимается экспоненциальный закон надежности)	<p><i>Ненагруженное состояние резерва:</i></p> $P_{\text{изд}}(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$ <p><i>Недогруженное состояние резерва:</i></p> $P_{\text{изд}}(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_i t})^i \right]$ <p><i>Нагруженное состояние резерва:</i></p> $P_{\text{изд}}(t) = 1 - [1 - \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_0 t}]^{m_i+1}$
Раздельное резервирование замещением с целой кратностью	$P_{\text{изд}}(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t)$
Общее резервирование замещением с дробной кратностью и постоянно включенным резервом	$P_{\text{изд}}(t) = \sum_{i=0}^{l-h} C_l^i p_0^{l-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j p_0^j(t)$
Скользящее резервирование (принимается экспоненциальный закон надежности)	$P_{\text{изд}}(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

n - число элементов основной или любой резервной системы;

m - кратность резервирования;

λ_0 – интенсивность отказов основного устройства;

λ_i – интенсивность отказов резервного устройства до замещения;
 l – общее число основных и резервных элементов;
 h – число элементов, необходимое для нормальной работы резервированной системы;

$$b_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right).$$

Важные системы самолета, отказы которых влияют на безопасность, резервируются аварийными системами. Например, на самолетах для увеличения надежности работы системы управления от кабины пилота к приводу руля идут дублированные параллельные независимые тросовые проводки, каждая из которых способна самостоятельно обеспечивать функционирование системы. Так, на фронтовом бомбардировщике Су-24 для повышения надежности и живучести привод рулевых поверхностей дублирован от двух автономных гидросистем (рис.2). В табл.3 приведены некоторые результаты расчета определения эффективности различных способов резервирования двух автономных приводов рулевых поверхностей в предположении, что вероятность безотказной работы каждой гидросистемы и каждого привода равна 0,9. Расчеты выполнены разработанным программным комплексом.



Рисунок 2 - Пример дублирования приводов несущих поверхностей Су-24

Таблица 3 – Пример анализа эффективности способа резервирования приводов рулевых поверхностей Су-24

Способ резервирования	Схема включения резерва	Вероятность безотказной работы
Отсутствие резервирования		0,720
Общее резервирование с постоянно включенным резервом		0,963
Раздельное резервирование с постоянно включенным резервом и целой кратностью		0,929
Общее резервирование замещением с целой кратностью и ненагруженным состоянием резерва		0,996
Общее резервирование замещением с целой кратностью и недогруженным состоянием резерва		0,997
Раздельное резервирование замещением с целой кратностью		0,810

Выводы

1. Предложен алгоритм определения вероятности безотказной работы сложных невосстанавливаемых резервированных технических изделий. Рассмотрено шесть способов резервирования.

3. Разработано программное обеспечение для оперативного расчета вероятности безотказной работы сложного технического обеспечения. Программный продукт имеет развитый интерфейс, контекстную справочную систему, прост и удобен в эксплуатации.

4. Программный продукт позволяет решать ряд важных практических задач, возникающих при проектировании сложных технических изделий, и может быть использован в учебном процессе при подготовке инженеров-проектировщиков.

Список литературы

1. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. – М.:Радио и связь, 1981. – 264 с.
2. Дмитриук Г.Н., Пясику И.Б. Надежность механических систем. – М.:Машиностроение, 1966. – 183 с.
3. Капур К., Ламберсон Л.Л. Надежность и проектирование систем. – М.:Мир, 1980. – 604 с.
4. Куликов М.А. Фронтальной бомбардировщик Су-24. – М.:Стрелец, 1996. – 88 с.