

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ МНОГОРЕЖИМНЫХ СИСТЕМ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ИЗМЕНЕНИЕ ИХ ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ И ПОЗВОЛЯЮЩИЙ ПРОИЗВОДИТЬ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОТКАЗНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУР МНОГОРЕЖИМНЫХ СИСТЕМ

В данном материале рассматривается вопрос расчета интенсивности отказов многорежимных систем. Проведен анализ существующих методов по указанному расчету и показана необходимость в учете динамических свойств функционирования при расчете безотказности многорежимных объектов. Изложена методика расчета или оценки интенсивности отказов многорежимных систем с учетом динамики функционирования определенных совокупностей элементов

многорежимные системы, отказ, структура, сравнительный анализ, безотказность, режимная единица

Введение

При разработке новых образцов вооружения или их доработке (усовершенствовании) важным является вопрос надежности будущего вооружения. Свойство надежности вооружения состоит из свойств безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Каждое из этих свойств можно характеризовать соответствующими показателями и таким образом производить численную оценку этих свойств. Для эксплуатирующего субъекта, безусловно важно получить вооружение с высокими значениями показателей эффективности, надежности, низкой стоимостью образца и малыми затратами (как денежными так и временными) на эксплуатацию. Однако одним из важнейших свойств надежности является безотказность. Придание высоких значений показателей безотказности сильно влияет на эффективность вооружения, организацию эксплуатации и расходы, связанные с ней. Свойство безотказности характеризуется многими показателями, но чаще всего интенсивностью отказов.

1. Анализ известных достижений

При расчёте или оценке интенсивности отказов систем используются различные методы [1,2]. Эти

методы основаны на представлении исследуемых систем или их состояний в виде графической модели, которая определенным образом аналитически описывается, в зависимости от типа метода. В этих подходах, прежде всего, производится анализ системы, выводом которого является четко сформулированное понятие отказа системы. Согласно [3] под отказом объекта (системы) понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, следовательно, для формулирования понятия отказа объекта определяются условия, которые вызывают нарушение работоспособного состояния объекта. Под работоспособным состоянием понимают состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно – технической и (или) конструкторской (проектной) документации или, как в [4] состояние, при котором объект способен выполнять заданные функции. Полагается, что как элементы системы, так и система в целом может находиться в двух состояниях (работоспособном и неработоспособном). Состояние системы полностью определяется состоянием его элементов посредством некоторой функции φ :

$$\chi = \varphi(e_1, e_2, \dots, e_n), \quad (1)$$

где χ - бинарная переменная, характеризующая состояние системы;

e_i - бинарная переменная, характеризующая состояние i - го элемента системы.

Согласно [2] на основе утверждения (1) построены все существующие методы расчета или оценки показателей безотказности систем, т.е. в любом методе, так или иначе, описывается функция φ - зависимость состояния системы от состояния ее элементов. При расчете значения интенсивности отказов системы в качестве исходных данных используют значения интенсивности отказов элементов системы. В большинстве случаев, оценку значений интенсивности отказов различных элементов производят с учетом условий их эксплуатации, т.е. значение интенсивности отказов элементов зависит от многих эксплуатационных факторов, таких как: влажность, температура окружающей среды; рабочей вибрации; нагрузочных характеристик функционирования; и т.д. С помощью таких методов легко производить расчет показателей безотказности систем. Однако они обладают некоторой ограниченностью. Эта ограниченность связана с тем, что существующие методы не учитывают возможного изменения структуры объекта во время функционирования, что свойственно большинству объектов называемых многорежимными. Многорежимным называется объект, множество элементов которого может быть разделено не менее чем на два подмножества элементов, функционирующих в различные моменты времени. К таким объектам относятся те, которые имеют переключатели режима (рода) работы, изменяющие действующую структуру объекта. При переключении режима функционирования изменяется подмножество функционирующих элементов. С помощью указанных методов нет возможности производить сравнительный анализ различных структур многорежимных систем, а также они не учитывают динамики изменения нагрузки на элементы много-

режимных объектов.

Таким образом, целью исследования является способ расчета интенсивности отказов многорежимных систем, с помощью которого была бы возможность производить сравнительную оценку значений интенсивности отказов различных структур и производить учет изменения функционирующей структуры многорежимных систем.

2. Закономерности в структуре многорежимных систем

Представим многорежимный объект (многорежимную систему) в виде множества $U = \{M_i\}$, $i = \overline{1, n}$ (рис. 1), где M_i - i -я режимная единица, под которой будем понимать максимальное, непрерывное подмножество элементов, внутри которого нет режимных ветвлений (режимных дивергенций, режимных конвергенций). А n - количество режимных единиц в системе U .

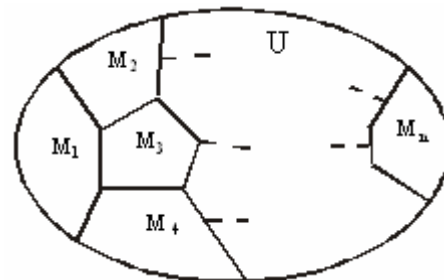


Рис. 1. Обобщенное представление многорежимного объекта

Поскольку рассматриваемая система способна функционировать в нескольких режимах, то целесообразно ввести понятие режимного множества элементов $R_j \in U$ как множества режимных единиц M_i необходимых, для функционирования многорежимного объекта (системы) в j -м режиме:

$$R_j = \{M_i\}, \quad i \in I_j, \quad j = \overline{1, m},$$

где I_j - множество номеров i -х режимных единиц составляющих j -е режимное множество;

m - количество режимов.

Заметим, что режимные множества R_j , $j = \overline{1, m}$ пересекаются между собой:

$$\bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j>i}^m (R_i \cap R_j) = \Psi,$$

где Ψ – не пустое множество представляющее режимные единицы, которые в результате пересечений имели место.

Режимную единицу, которая принадлежит двум и более режимным множествам, и, следовательно, необходима для функционирования системы U в нескольких режимах, будем называть ядерным подмножеством элементов.

Поставим в соответствие каждой режимной единице M_i множество J_i

$$M_i \Leftrightarrow J_i,$$

где множество J_i – множество номеров всех режимов, для функционирования которых необходима совокупность элементов, составляющая режимную единицу M_i .

Следовательно, для простых режимных единиц и ядерных подмножеств элементов будет существовать различие, состоящее в наличии одного или нескольких элементов множества J_i соответственно.

Для наглядности анализа многорежимных систем следует ввести их графическое режимное отображение (далее просто режимное отображение), на котором следует отображать режимные единицы в виде прямоугольников. В зависимости от режимных ветвлений, строятся связи между режимными единицами.

3. Способ расчета интенсивности отказов многорежимных систем

Безотказность совокупности элементов, составляющей режимную единицу M_i , будем характеризовать интенсивностью отказов λ_i .

Если рассмотреть, представленную в виде совокупности режимных единиц, многорежимную сис-

тему с помощью метода структурных схем [1,2], то графическая модель надежности системы будет иметь вид последовательного соединения совокупностей элементов составляющих режимные единицы (рис. 2).

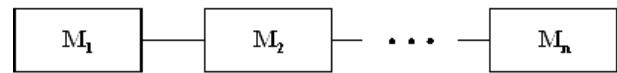


Рис. 2. Обобщенная графическая модель надежности многорежимных объектов

Это очевидно потому, что отказ элементов составляющих режимную единицу, например M_1 , неизбежно повлечет за собой отказ системы, так как система утратит способность функционировать в $j \in J_1$ режимах и, следовательно, утратит способность выполнять все возложенные на нее функции. В предположении независимости отказов групп элементов, составляющих режимные единицы, значение интенсивности отказов системы $\lambda(t)$ можно определить

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

Из этого выражения видно, что если значения λ_i , $i = \overline{1, n}$ от времени не зависят то $\lambda(t) = \lambda$.

Из определения многорежимного объекта следует, что в процессе его функционирования возникают изменения в функционирующей структуре объекта (системы) таким образом, что для решения поставленных перед системой задач одновременно функционирует только определенное множество элементов, составляющих режимное множество. Это режимное множество будем называть функционирующим режимным множеством, т.е. режимным множеством элементов которое необходимо для функционирования системы в этом режиме в определенный момент времени. В связи с этим, в процессе функционирования многорежимной системы, элементы, составляющие различные режимные единицы пребывают под различной нагрузкой, т.е. пре-

бывают под рабочей или под облегченной нагрузкой. Облегченной нагрузкой может быть холостой ход или выключенное состояние. В связи с этим, в качестве входных данных, для расчета или оценки значения интенсивности отказов многорежимных систем целесообразно принять не по одному значению интенсивности отказов каждой группы элементов, составляющих режимные единицы, а по два. Первое из них λ_i вычисляется в условиях рабочей нагрузки для совокупностей элементов, составляющих каждую из режимных единиц, а второе λ_i^* – в условиях облегченной нагрузки.

В этом случае, значение интенсивности отказов $\lambda(t)$ многорежимной системы с независимыми отказами групп элементов, составляющих режимные единицы, определяется сложением двух сумм. Первая из них представляет собой сложение всех λ_i , где $i \in I_j$ а j – номер функционирующего режимного множества. А вторая – сложение всех λ_i^* , где $i \in U$ но $i \notin I_j$ а j – номер функционирующего режимного множества

$$\lambda(t \in T_j) = \sum_{i \in I_j} \lambda_i + \sum_{\substack{i \in U \\ i \notin I_j}} \lambda_i^*, \quad (2)$$

где T_j – множество значений времени функционирования многорежимной системы в j -м режиме.

Отличия значений λ_i^* от значений λ_i возникают вследствие функциональных особенностей объекта и характеризуют степень загруженности незадействованных в функционировании объекта элементов, составляющих соответствующие режимные единицы. Поэтому, в выражении (2) целесообразно компоненты λ_i^* заменить произведениями соответствующих λ_i и коэффициентов $k_i = \frac{\lambda_i^*}{\lambda_i}$, т.е.

$\lambda_i^* = \lambda_i \cdot k_i$. Коэффициенты $k_i, i = \overline{1, n}$, при условии правильного распределения нагрузки на элементы (правильного схемного построения), не зависят от значений $\lambda_i, i = \overline{1, n}$, а зависят лишь от конструктивно-функциональных особенностей схемного построения, относительно совокупностей элементов $M_i, i = \overline{1, n}$, т.е. если каким либо образом изменять значение λ_i , то значение λ_i^* будет изменяться пропорционально ему, с коэффициентом пропорциональности k_i . Коэффициенты $k_i = \frac{\lambda_i^*}{\lambda_i}$ будем называть коэффициентами загруженности совокупностей

элементов составляющих соответствующие режимные единицы M_i . С учетом этого, выражение (2) можно переписать:

$$\lambda(t \in T_j) = \sum_{i \in I_j} \lambda_i + \sum_{\substack{i \in U \\ i \notin I_j}} k_i \lambda_i.$$

Это выражение можно представить в более удобном виде, если ввести в него индикатор принадлежности совокупности элементов, составляющей режимную единицу тому или иному режимному множеству

$$\lambda(t \in T_j) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \chi_{i,j}), \quad \chi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } i \in I_j; \\ k_i & \text{при } i \notin I_j. \end{cases} \quad (3)$$

Продолжительности функционирования многорежимного объекта в том или ином режиме являются случайными величинами $\zeta_j, j = \overline{1, m}$ с функциями распределения $F_j(t) = P\{\zeta_j < t\}$ и, в некоторых случаях, очерёдность режимов при функционировании также имеет случайную природу.

Таким образом, изменение интенсивности отказов многорежимного объекта (системы) можно представить в виде случайного дискретного процесса с непрерывным временем, одна из возможных реализаций которого изображена на рис. 3.

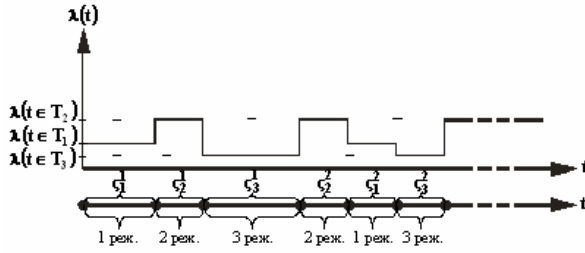


Рис. 3. Изменение значения интенсивности отказов многорежимного объекта во времени

Как видно из рисунка, значение интенсивности отказов системы меняется во времени и принимает дискретные значения, соответствующие мгновенным значениям интенсивности отказов многорежимной системы, вычисленным при функционировании системы в том или ином режиме. Однако в большинстве задач при расчете или оценке показателей безотказности интерес представляет точечная (интегральная) их оценка или расчёт. Поэтому, необходимо определить выражение для математического ожидания интенсивности отказов невозмущаемой многорежимной системы с независимыми отказами групп элементов, составляющих режимные единицы в предположении, что значения интенсивности отказов групп элементов, составляющих режимные единицы, можно считать постоянными во времени величинами

$$M_{\lambda} = \sum_{j=1}^m [\lambda(t \in T_j) \xi_j], \quad (4)$$

где ξ_j – вероятность использования многорежимного объекта (системы) в j -м режиме функционирования в произвольный момент времени или относительная частота использования многорежимного объекта (системы) в j -м режиме.

Заметим, что события, заключающиеся в использовании многорежимной системы в j -х режимах, в рассматриваемом процессе, составляют полную группу, т.е.

$$\sum_{j=1}^m \xi_j = 1$$

Значения ξ_j , в вероятностном смысле и в предположении строгой очередности включения режимов, можно определить из выражения

$$\xi_j = \frac{T_j}{\sum_{k=1}^m T_k}, \quad \text{где } T_j = \int_0^{\infty} \zeta_j dF_j(t).$$

Если использовать статистический материал, то значения ξ_j можно определить из выражения

$$\xi_j = \frac{t_j}{T},$$

где t_j – суммарная длительность функционирования многорежимной системы в j -м режиме за время наблюдения T ;

$T = \sum_{j=1}^m t_j$ – статистически достаточное время наблюдения, в течение которого, система непрерывно функционирует, чередуя режимы.

С учетом (3), выражение (4) можно записать в виде:

$$M_{\lambda} = \sum_{j=1}^m \left[\xi_j \left(\sum_{i=1}^n (\lambda_i \chi_{i,j}) \right) \right], \quad \chi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } i \in I_j; \\ k_i & \text{при } i \notin I_j. \end{cases}$$

Компоненты ξ_j не зависят от i , следовательно, их можно внести под знак второй суммы

$$M_{\lambda} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (\xi_j \lambda_i \chi_{i,j}), \quad \chi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } i \in I_j; \\ k_i & \text{при } i \notin I_j. \end{cases}$$

После смены порядка суммирования и вынесения, независящих от соответствующих переменных суммирования компонент получим следующее выражение:

$$M_{\lambda} = \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \left(\sum_{j=1}^m (\xi_j \chi_{i,j}) \right) \right], \quad \chi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } i \in I_j; \\ k_i & \text{при } i \notin I_j. \end{cases}$$

Следует заметить, что индикатор принадлежности i -й режимной единицы j -му режимному множеству можно определять и с помощью множеств J_i

$$\chi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } j \in J_i; \\ k_i & \text{при } j \notin J_i. \end{cases}$$

Такое определение является более приемлемым потому, что непосредственное суммирование происходит по j . Оно исходит из утверждения, что если $i \in I_j$, то $j \in J_i$, для всех i и j . Очевидное доказательство этого утверждения следует из определения этих двух видов множеств, т.е. если i -я режимная единица принадлежит определенному режимному множеству, то номер этого режимного множества принадлежит множеству номеров режимов, для функционирования которых необходима эта режимная единица. В связи с этим, выражение для математического ожидания интенсивности отказов многорежимных объектов можно сформулировать следующим образом:

$$M_{\lambda} = \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \left(\sum_{j=1}^m (\xi_j \chi_{i,j}) \right) \right], \quad \chi_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{при } j \in J_i; \\ k_i & \text{при } j \notin J_i. \end{cases} \quad (5)$$

Выводы

Таким образом, получено обобщенное расчетное соотношение для математического ожидания интенсивности отказов многорежимной системы, учитывающее изменение их функционирующей структуры во время функционирования. Анализируя это выражение, можно прийти к выводу, что вклад безотказности группы элементов, составляющей определенную режимную единицу, в математическое ожидание интенсивности отказов многорежимной системы зависит от четырех факторов: значения интенсивности отказов λ_i элементов, составляющих режимную единицу M_i ; степени загруженности этой совокупности элементов в тот момент времени, когда $M_i \notin R_j$ – функционирующему режимному множеству; количества режимов, для функционирования

которых необходима эта совокупность элементов, о чём свидетельствует зависимость значения второй суммы от множеств J_i и значений вероятности использования, в произвольный момент времени, многорежимной системы ξ_j в $j \in J_i$ -х режимах, для функционирования которых необходима i -я совокупность элементов M_i .

Выражение (5) можно использовать при расчете или оценке значения интенсивности отказов многорежимных объектов, при сравнительном анализе безотказности различных схмотехнических решений, а также это выражение может служить критерием для оптимального распределения требований к значениям интенсивности отказов элементов многорежимных систем.

Литература

1. Переверзев Е.В., Алпанов А.А., Даниев Ю.К., Новак П.В. Надежность технических систем. – Донецк: Пороги, 2002. – 396с.
2. Гнеденко Б.В. Вопросы математической теории надежности. – М.: Радио и связь, 1983. – 376с.
3. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 27с.
4. Надежность технических систем // Под ред. Ушакова И.А. Справочник – М.: Радио и связь, 1985г. – 606с.

Поступила в редакцию 08.10.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Жихарев В.Я., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков