Стрельников В.П., Лукьяненко О.В., Оношко И.В. (ИММС НАН,Украина)

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВФ-МЕТОДА

Все известные методы расчета показателей надежности, основанные на использовании строго вероятностных моделей распределения отказов (экспоненциального, Вейбулла и др.), допускают только два возможных состояния элементов системы – исправное и неисправное, вероятностное сочетание которых определяет также двухпозиционное состояние системы в целом - работоспособное или неработоспособное. Метод расчета, основанный на использовании вероятностно-физических моделей, отличается от строго вероятностных методов тем, что он рассматривает непрерывное множество состояний элементов и системы с непрерывным временем и называется вероятностно-физическим методом (ВФ-метод).

По результатам исследования определенных параметров, характеризующих техническое состояние системы, можно определить параметр, информирующий о расходовании ресурса системы, и оценив скорость его изменения и зная его предельное значение, можно прогнозировать все необходимые количественные показатели надежности системы, используя вероятностно-физические модели отказов.

Система состоит из n элементов, которые в процессе эксплуатации в результате протекания различных деградационных процессов исчерпывает свой ресурс с какой либо определенной скоростью (обозначим ее a_i), которая может быть оценена через известные средние наработки $T_{эi}$ следующим образом: $a_i = \left(T_{эi}\right)^{-1}$. Совокупность случайных значений накопленных повреждений элементов $A_i = \int_0^t a_i(t)dt$, приводящих к отказу, определяет n-мерный случайный вектор состояния системы $\overline{A} = \left(A_1, A_2, ..., A_n\right)$. Поскольку координаты этого вектора случайным образом меняются в зависимости от времени, он представляет собой вектор-функцию скалярного аргумента $\overline{A} = \overline{A}(t)$. Если положить, что процессы деградации элементов системы независимы и имеют нормированные предельные значения, тогда вероятность безотказной работы исследуемой неизбыточной (последовательной) системы описывается следующим образом.

$$R(t) = \Pr\left(A_1 \langle 1; A_2 \langle 1; ...; A_n \langle 1\right) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t)$$

Данное выражение означает, что области работоспособности системы (при принятых допущениях) соответствует n-мерный многогранник с единичным ребром (куб). И как только вектор-функция достигнет граничной поверхности этого n-мерного куба, система выйдет из строя (наступит отказ).

Известно, что ограничение вектора-функции сводится к ограничению модуля этой функции. Тогда, в качестве границы работоспособной области системы можно принять гиперповерхность с единичным радиусом, который и будет предельным значением определяющего параметра системы. При этом несколько уменьшается область работоспособности системы и тем самым приобретается некоторый запас надежности.
Рассмотренный подход позволяет перейти от многомерного определяющего параметра (n-мерного вектора) к одномерному (модулю вектора) и соответственно – от многомерного распределения вероятностей безотказной работы системы к одномерному:

$$R(t) = \Pr\left\{\mathrm{mod}\,\overline{A} \langle \varPi\right\}.$$

Кинетика принятого обобщенного определяющего параметра обусловлена кинетикой процессов деградации элементов системы. Показано, что наиболее подходящей моделью деградации элементов электронной техники является немонотонный марковский процесс (DN – распределение). В таком случае закон распределения времени безотказной работы системы (плотность распределения времени до отказа) будет иметь следующий вид:

$$f(t)=\frac{\sqrt{\Pi}}{\nu t\sqrt{2\pi a t}}\,e^{-\frac{(at-\Pi)^2}{2\nu^2 \Pi a t}}$$

где a – параметр масштаба, то есть средняя скорость изменения принятого определяющего параметра; ν – параметр формы, то есть коэффициент вариации скорости изменения обобщенного определяющего параметра; n – предельное значение принятого определяющего параметра.

Вместо вышеприведенной модели можно взять любую из известных вероятностно-физических моделей надежности (DM – распределение, нормальное параметрическое или α – распределение). Методология расчета надежности системы при этом остается той же. Выбор модели обусловлен характером протекания деградационных процессов. Для расчета надежности, например, механических систем более подходящей является модель диффузионного распределения для монотонных процессов.

Оценки параметров принятого распределения, соответствующие их физической сути, определяются довольно просто следующим образом. Модуль вектора скорости деградации системы, представляющий собой среднюю скорость изменения принятого определяющего параметра, является оценкой параметра a:

$$a=\left(\sum_{i=1}^{n} a_i^2\right)^{1/2}=\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{T_{эi}^2}\right)^{1/2}.$$

Значение коэффициента вариации скорости изменения обобщенного параметра можно определить таким образом:

$$\nu=\left(\sum_{i=1}^{n} V_{эi}^2/T_{эi}^2\right)^{1/2}\left(\sum_{i=1}^{n} 1/T_{эi}^2\right)^{-1/2}.$$

Предлагаемый метод позволяет производить расчет надежности объектов, имеющих структурные схемы надежности, представляющие собой последовательное, параллельное и всевозможные сочетания последовательного и параллельного соединений составных частей. Таким образом, метод позволяет неоднократно использовать прием декомпозиции исследуемой системы и тем самым осуществлять расчет всех необходимых для инженерной практики показателей безотказности любой по сложности системы.

При последовательном соединении элементов первое достижение граничной гиперповерхности, то есть выход из строя любого из элементов, приводит к отказу системы. Это означает, что параметр $n=1$. Для избыточных структур определяют значение П, исходя из принятых общих соображений (в данном случае П есть число отказов элементов, приводящих к отказу системы). Знание параметров распределения времени до отказа позволяет определить все основные количественные показатели надежности системы.

Путем моделирования на ПЭВМ функционирования разнообразных систем авторами показано, что расчетные оценки показателей надежности систем (нерезервированных и резервированных) на основании предлагаемого метода более точны по сравнению с традиционными методами.