УДК 629.7/621.01

Е. А. Фурманова, О. Г. Бойко, Л. Г. Шаймарданов

МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ, РАСЧЕТ КОТОРЫХ НЕ СВОДИТСЯ К СХЕМЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Разрабатывается метод расчета надежности сложных систем, расчетная схема которых не сводится к схеме последовательно-параллельного соединения элементов. В методе не используется теорема умножения вероятностей.

Ключевые слова: надежность, сложная система, интегральная функция вероятности отказа.

В технике известны сложные системы, модель надежности которых не может быть построена непосредственным применением теоремы умножения вероятностей, как это делается для систем с последовательно-параллельным соединением элементов. При построении расчета для таких систем используется логико-вероятностное исчисление. Подробно методы логико-вероятностного исчисления рассмотрены в монографии [1], в которой использованы некоторые результаты.

В качестве примера из [1], рассмотрим мостиковую систему (рис. 1).

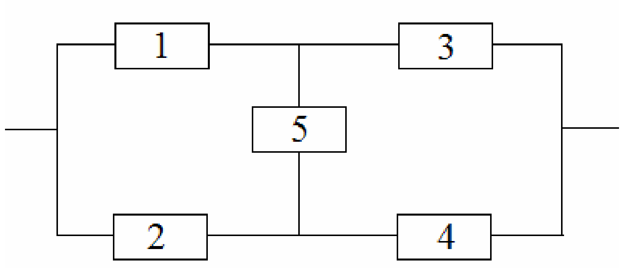

Рис. 1. Структурная схема мостиковой системы

Предполагается, что система откажет, если в ней выйдут из строя элементы 1 и 2, либо 3 и 4, либо 1, 5, 4, либо 2, 5, 3.

Решение задачи расчета надежности мостиковой системы в [1] получено с использованием логико-вероятностного подхода, согласно которому исходная структурная схема (рис. 1) заменяется на эквивалентную (рис. 2).

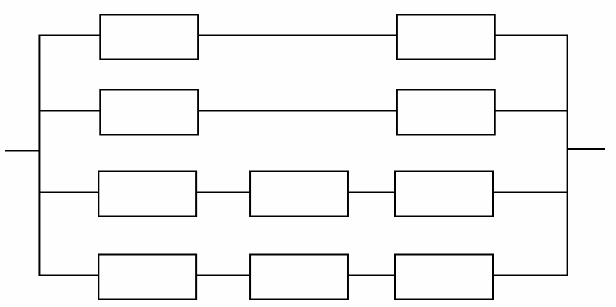

Рис. 2. Логическая схема мостиковой системы, построенная по методу минимальных сечений

Для рассматриваемой системы расчет вероятности отказа Q при традиционном методологическом подходе может быть выполнен и с использованием теоремы умножения вероятностей. Тогда, при условии равенства вероятностей отказов q всех элементов, вероятность отказа системы запишется в виде

$$Q = 2q^2 + 2q^3 + 2q^5 - 5q^4. \qquad (1)$$

Поскольку моделью (1) в [1] не накладываются ограничения на вид функции q для элементов, то в качестве последней примем распределение равномерной плотности вида

$$q(t) = \begin{cases} \omega \cdot t & \text{при} \quad 0 < t < T_{\text{ср}} \\ 1 & \text{при} \quad t \geq T_{\text{ср}} \end{cases}, \qquad (2)$$

где $\omega = \dfrac{1}{T_{\text{ср}}}$ – параметр потока отказов элементов, $T_{\text{ср}}$ – средняя наработка на отказ элемента. Далее в расчетах примем параметр потока отказов одинаковым для всех элементов и равным $\omega = 1 \cdot 10^{-4}$.

Построим по (1) с учетом (2) зависимость изменения вероятности отказа системы от времени и проанализируем ее особенности (рис. 3, пунктирная линия).

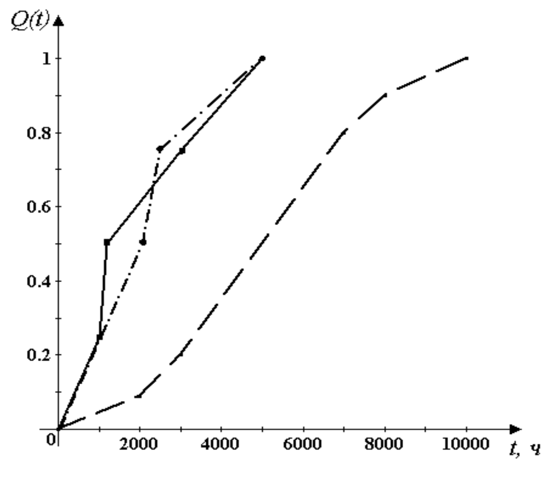

Рис. 3. Зависимость вероятности отказа мостиковой системы из 5 элементов при $\omega = 1 \cdot 10^{-4}$:
- - - – традиционный метод расчета [1]; —— – предлагаемый метод расчета с использованием логико-вероятностного представления; – · – – прямое применение предлагаемого метода

Прежде всего следует заметить, что графически форма зависимости (1) близка к интегральной функции нормального распределения, а следовательно, вероятность отказа системы за единицу времени будет иметь вид гауссовской кривой плотности вероятности. Если вероятность отказа за единицу времени будет описываться гауссовской кривой, то невозможно объяснить, почему она в начале будет возрастать, а затем, достигнув максимума, будет уменьшаться при неизменных структуре системы и вероятности отказа элементов за единицу времени. Второй вопрос состоит в том, что в этом случае вероятность отказа за единицу времени будет определяться неоднозначно. Если, для наглядности, приращение времени принять равным 2 000 ч, то следует, что на отрезках [0, 2000] ч и [8000, 10 000] ч (рис. 3, пунктирная линия) приращение вероятности отказа системы примерно одинаковы и составляют 0,18 (0,2). Но приращение вероятности отказа на отрезке [4000, 6000] ч в 3,5 раза больше.

Ответы на эти и другие вопросы, связанные с правомерностью применения теоремы умножения вероятностей в расчетах надежности, можно найти в работе [2].

Здесь остановимся на вопросах, не отмеченных в [2]. В частности, на вопросе о гладкости зависимости (1) (рис. 3, пунктирная линия). В постановочной части задачи расчета надежности мостиковой системы [1] отмечены сочетания числа элементов, при отказе которых система потеряет работоспособность. Однако отказы элементов – это дискретные события, происходящие в дискретные моменты времени. И в эти дискретные моменты изменяется структура системы, модель (1) никак не отражает. Кроме того, в соответствии с (1), вероятность отказа системы $Q = 1$ осуществляется только при достижении всеми элементами вероятности отказа $q = 1$. Такой вывод в корне противоречит исходным предположениям постановочной части задачи о том, что вся система откажет, если в ней выйдут из строя элементы 1 и 2 либо 3 и 4, либо 1, 5, 4, либо 2, 5, 3 [1].

В работе [3] предложен метод расчета надежности систем, исключающий применение теоремы умножения вероятностей. Метод основан на простом представлении о том, что плотность суммарного потока отказов совокупности n элементов, составляющих систему вне зависимости от схемы их соединения, значительно больше, чем у одного элемента.

Рассмотрим предлагаемый метод. Суммарный параметр потока отказов системы ω_Σ равен сумме параметров потоков отказов элементов составляющих совокупность:

$$\omega_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} \omega_i. \tag{3}$$

Именно ω_Σ определит вероятность первого отказа элемента в рассматриваемой совокупности. При этом заранее неизвестно, какой именно элемент откажет первым, и какое место он занимает в схеме. При распределении равномерной плотности вероятности (2), принятом для вероятности отказов элементов, вероятность первого отказа $q_1(t)$ в системе определится по выражению

$$q_1(t) = t_1 \cdot \sum_{i=1}^{n} \omega_i. \tag{4}$$

Тогда, если задать вероятность $q_1(t) = 1$, то из (4) вычислим время работы системы до первого отказа:

$$t_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \omega_i}. \tag{5}$$

Поскольку элементы в системе соединены определенным образом, то в момент времени t_1, после отказа первого элемента, структура системы изменится. В зависимости от схемы соединения элементов, их число в оставшейся работоспособной части системы изменится на некоторую величину k, где k – число элементов, исключаемых из системы вследствие первого отказа элемента. Тогда с учетом того, что элементы работоспособной части системы уже отработали время t_1, вероятность отказа второго элемента находят по формуле

$$q_2(t) = (t_1 + \Delta t_2) \cdot \sum_{i=1}^{n-k} \omega_i. \tag{6}$$

Далее, задавшись, как и ранее, $q_2(t) = 1$, найдем приращение времени до отказа второго элемента в оставшейся работоспособной части системы:

$$\Delta t_2 = \frac{1 - t_1 \cdot \sum_{i=1}^{n-k} \omega_i}{\sum_{i=1}^{n-k} \omega_i}, \tag{7}$$

тогда время до второго отказа

$$t_2 = t_1 + \Delta t_2.$$

Продолжая подобные операции, определим время t_j, j-го отказа элемента в системе, после которого она потеряет работоспособность.

В зависимости от принятой схемы соединения элементов, отказ каждого i-го $(1 < i < j)$ элемента приводит к изменению вероятности отказа системы на вполне определенную величину ΔQ_i. Предлагаемый метод обеспечивает возможность поставить в соответствие каждому отказу элемента в определенный момент времени t_i конкретное значение вероятности отказа системы $Q_i(t)$.

Для наглядности на рис. 3 приведены результаты расчета этой же мостиковой системы по предлагаемому методу без использования теоремы умножения вероятностей, но с применением расчетной схемы, приведенной на рис. 2, построенной по логико-вероятностному методу (сплошная линия) и прямым применением предлагаемого метода к исходной расчетной схеме, приведенной на рис. 1 (штрих-пунктирная линия).

Точки излома на графиках (рис. 3, сплошная и штрих-пунктирная линии) соответствуют моментам времени отказов элементов, а число изломов – числу параллельно включенных ветвей логической схемы. Промежуточные отрезки между точками отказов элементов линейны, поскольку на этих промежутках структура системы остается неизменной.

Расхождение графиков (рис. 3, сплошная и штрих-пунктирная линии) не существенное.

В монографии [1] справедливо отмечается, что расчеты на надежность потенциально опасных сложных систем, отказы которых сопряжены с большими экономическими потерями, не могут быть сопоставлены со статистическими оценками, полученными как при испытаниях таких систем, так и в процессах их серийной эксплуатации. Испытания сложных систем чрезвычайно дороги, а по длительности сопоставимы со временем эксплуатации систем. По понятным причинам статистика катастроф самолетов и атомных электростанций крайне скудна для того, чтобы ее можно было использовать для получения статистических оценок надежности систем. Тем более, что катастрофы крайне редко связаны с отказами систем.

В связи с этим правомерность использования тех либо иных методов расчета надежности сложных систем может быть оценена только по корректности использования фундаментальных положений математики и по непротиворечивости результатов расчетов надежности исходным данным и феноменологическим представлениям о характере изменения вероятности их отказа.

Библиографические ссылки

1. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007.

2. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : монография / Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий ; РАН. М., 2009.

3. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Проблемы и перспективы методов расчета надежности сложных функциональных систем // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011» : материалы VI междунар. науч.-техн. конф. ; Каз. гос. технич. ун-т. Казань, 2011. Т 1. С. 24–30.

E. A. Furmanova, O. G. Boyko, L. G. Shaimardanov

METHOD OF RELIABILITY ESTIMATION OF COMPLICATED SYSTEMS , CALCULATION OF WHICH CAN NOT BE REDUCED TO A SERIAL-PARALLEL ELEMENT CONNECTION SCHEME

The authors develop a calculation method for complicated systems reliability estimation. The calculation scheme of these systems is not reduced to a serial-parallel elements connection scheme. The probabilities multiplication theorem is not used in this method.

Key words: reliability, complicated system breakdown probability integral function, breakdown stream parameter.

УДК629.78.05

Р. А. Хасанова

АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассматривается автоматизация создания испытательной документации бортового комплекса управления на этапе электрических испытаний. Проведен сравнительный анализ программных средств автоматизации, предлагаемых рынком на сегодняшний день.

Ключевые слова: автоматизация, жизненный цикл изделия, модели бизнес-систем, информационное пространство, наземные испытания.

В последнее время тема автоматизации документооборота стала как никогда актуальной. Компании, достигшие достаточной степени организационной зрелости и осознания протекающих в них процессов, пытаются использовать средства автоматизации документооборота для дальнейшего улучшения своей деятельности.

В космической отрасли названная проблема касается унифицирования документации, сопровождающей разные этапы стендовых и комплексных наземных испытаний. Чтобы не снижать темпы технического прогресса, нужно максимально автоматизировать процессы жизненного цикла (ЖЦ) изделия. Существует техническая проблема, решение которой позволит обеспечить дальнейшее развитие космической отрасли, в частности, расширить область применения полученных ранее результатов испытаний и эксплуатации КА, снизить трудовые затраты и повысить эффективность процессов проектирования и выпуска технической документации. Для решения проблемы