

4. Методы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов космических аппаратов / К.А. Занин; под ред. В.В. Ефанов, К.М. Пичхадзе // Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Том 1. – Москва: Издательство МАИ-Принт, 2013. – С. 261–335.

5. Куренков, В.И. Основы проектирования космических аппаратов оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика: учебное пособие / В.И. Куренков. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 461 с.

6. Маламед, Е. Р. Конструирование оптических приборов космического базирования: учебное пособие / Е. Р. Маламед. – СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 291 с.

УДК 528.837:629.78. УДК 621.003.

Кучеров А.С., Чиклин П.В.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Актуальной является проблема анализа надежности сложных технических систем, к которым, в частности, относятся бортовые системы космических аппаратов.

Тщательному анализу причин отказов и определению мероприятий, наиболее эффективных для их устранения, способствует построение дерева отказов [1].

Дерево отказов лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов; при анализе причины его возникновения отказ рассматривается как результат последовательностей и комбинаций нарушений и неисправностей, и таким образом дерево отказов представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей – от первопричины к следствию [2, 3].

На рис. 1 показано дерево отказов одной из бортовых систем малого космического аппарата (МКА) «Аист-2Т» – системы обеспечения теплового режима (СОТР).

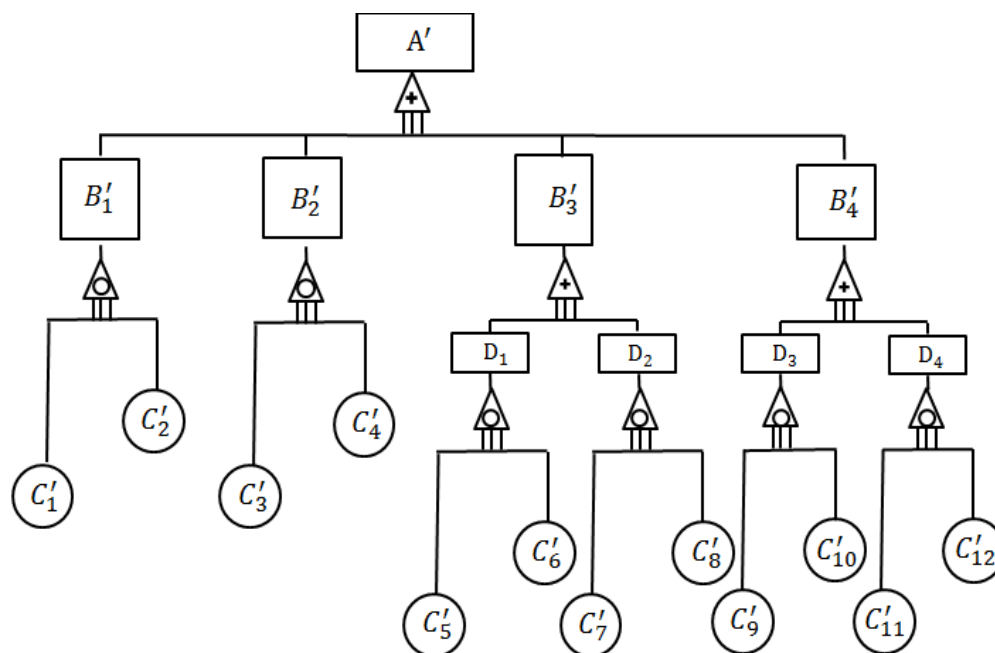


Рис. 1. Дерево отказов СОТР МКА «Аист-2Т»

На рисунке использованы следующие обозначения случайных событий.

На рисунке A' – отказ СОТР; B'_1 – отказ плёночного электронагревателя (ПЭН); B'_2 – отказ термометра; B'_3 – отказ трубы тепловой бортовой аппаратуры (БА); B'_4 – отказ контура тепловой трубы (КТТ); C'_1 – отсоединение токопроводящих проводов от резистивного слоя одного ПЭН; C'_2 – отсоединение токопроводящих проводов от резистивного слоя двух ПЭН; C'_3 – нарушение целостности электрических цепей, приводящее к отказу одного термометра; C'_4 – нарушение целостности электрических цепей, приводящее к отказу двух термометров; C'_5 – утечка теплоносителя из внутренней полости одной тепловой трубы бортовой аппаратуры (ТТБА); C'_6 – утечка теплоносителя из внутренней полости двух ТТБА; C'_7 – засорение ТТБА вследствие наличия посторонних частиц во внутренней полости одной ТТБА; C'_8 – засорение ТТБА вследствие наличия посторонних частиц во внутренней полости двух ТТБА; C'_9 – утечка теплоносителя из внутренней полости одной КТТ; C'_{10} – утечка теплоносителя из внутренней полости двух КТТ; C'_{11} – отсоединение конденсатора от теплообменника, испарителя от теплообменника одной КТТ; C'_{12} – отсоединение конденсатора от теплообменника, испарителя от теплообменника двух КТТ.

Использование дерева отказов позволяет записать следующую логическую функцию отказа системы обеспечения теплового режима:

$$A' = B'_1 \vee B'_2 \vee B'_3 \vee B'_4;$$

где $B'_1 = C'_1 \wedge C'_2$; $B'_2 = C'_3 \wedge C'_4$; $B'_3 = D_1 \vee D_2 = C'_5 C'_6 \vee C'_7 C'_8$;

$$B'_4 = D_3 \vee D_4 = C'_9 C'_{10} \vee C'_{11} C'_{12}$$

Сделав соответствующие подстановки, получим следующую логическую функцию отказа СОТР в дизъюнктивной нормальной форме [1, 2]:

$$\begin{aligned} A' &= C'_1 C'_2 \vee C'_3 C'_4 \vee (C'_5 C'_6 \vee C'_7 C'_8) \vee (C'_9 C'_{10} \vee C'_{11} C'_{12}) = \\ &= C'_1 C'_2 \vee C'_3 C'_4 \vee C'_5 C'_6 \vee C'_7 C'_8 \vee C'_9 C'_{10} \vee C'_{11} C'_{12} \end{aligned}$$

В системе *MATLAB* была реализована программа, приводящая логическую функцию отказа к совершенной дизъюнктивной нормальной форме и вероятностной форме.

Для расчета вероятности отказа системы были использованы следующие вероятности исходных (базовых) событий:

$$P(C'_1) = 2 \cdot 10^{-4}; P(C'_2) = 4 \cdot 10^{-8}; P(C'_3) = 0,003245; P(C'_4) = 0,00001;$$

$$P(C'_5) = 0,00001; P(C'_6) = 10^{-10}; P(C'_7) = 0,00001; P(C'_8) = 10^{-10};$$

$$P(C'_9) = 0,00001; P(C'_{10}) = 10^{-10}; P(C'_{11}) = 0,00001; P(C'_{12}) = 10^{-10}$$

Было получено значение вероятности отказа СОТР $3,2458 \cdot 10^{-8}$.

Для оценки влияния надежности элементов на надежность системы был выполнен расчет значимостей базовых событий отказов элементов, как частных производных от вероятности отказа системы по вероятностям отказа элементов.

Результаты расчета, в порядке убывания значимостей, приведены в табл. 1.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что наиболее значимыми для обеспечения работоспособности СОТР являются нарушение целостности электрических цепей, приводящее к отказу двух термометров, и отсоединение токопроводящих проводов от резистивного слоя двух ПЭН.

На ранних стадиях разработки изделий ракетно-космической техники данных для оценки вероятностей безотказной работы элементов бортовых систем может оказаться недостаточно.

В этом случае могут быть использованы экспертные оценки. Формализовать такое оценивание можно с использованием аппарата нечёткой логики. Для этой цели определим неизвестные значения вероятностей базовых событий как нечёткие числа с трапециевидной функцией принадлежности (рис. 2).

Табл. 1. Значимости базовых событий отказов элементов СОТР

| №события | Содержание события | Значимость |
|----------|---|------------------------|
| 4 | Нарушение целостности электрических цепей, приводящее к отказу двух термометров | $3,245 \cdot 10^{-03}$ |
| 2 | Отсоединение токопроводящих проводов от резистивного слоя двух ПЭН | $2,000 \cdot 10^{-04}$ |
| 3 | Нарушение целостности электрических цепей, приводящее к отказу одного термометра | $1,000 \cdot 10^{-05}$ |
| 6 | Утечка теплоносителя из внутренних полостей двух ТТБА | $1,000 \cdot 10^{-05}$ |
| 8 | Засорение ТТБА вследствие наличия посторонних частиц во внутренних полостях двух ТТБА | $1,000 \cdot 10^{-05}$ |
| 10 | Утечка теплоносителя из внутренних полостей двух КТТ | $1,000 \cdot 10^{-05}$ |
| 12 | Отсоединение конденсатора от теплообменника, испарителя от теплообменника двух КТТ | $1,000 \cdot 10^{-05}$ |
| 1 | Отсоединение токопроводящих проводов от резистивного слоя одного ПЭН | $4,000 \cdot 10^{-08}$ |
| 5 | Утечка теплоносителя из внутренней полости одной ТТБА | $1,000 \cdot 10^{-10}$ |
| 7 | Засорение ТТБА вследствие наличия посторонних частиц во внутренней полости одной ТТБА | $1,000 \cdot 10^{-10}$ |
| 9 | Утечка теплоносителя из внутренней полости одной КТТ | $1,000 \cdot 10^{-10}$ |
| 11 | Отсоединение конденсатора от теплообменника, испарителя от теплообменника одной КТТ | $1,000 \cdot 10^{-10}$ |

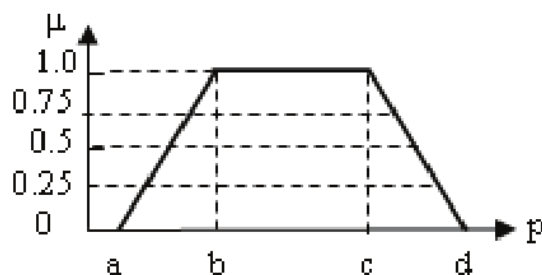


Рис. 2. Трапециевидная функция принадлежности нечёткого числа

Параметры функций принадлежности для различных базовых событий приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры функций принадлежности для базовых событий

| Событие | a | b | c | d |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| C'_1 | $1,5 \cdot 10^{-4}$ | $2,0 \cdot 10^{-4}$ | $2,5 \cdot 10^{-4}$ | $3,0 \cdot 10^{-4}$ |
| C'_2 | $3,5 \cdot 10^{-8}$ | $4,0 \cdot 10^{-8}$ | $4,5 \cdot 10^{-8}$ | $5,0 \cdot 10^{-8}$ |
| C'_3 | $3,0 \cdot 10^{-3}$ | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | $3,5 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-3}$ |
| C'_4 | $0,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
| C'_5 | $0,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
| C'_6 | $0,5 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-9}$ | $1,5 \cdot 10^{-9}$ | $2,0 \cdot 10^{-9}$ |
| C'_7 | $0,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
| C'_8 | $0,5 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-9}$ | $1,5 \cdot 10^{-9}$ | $2,0 \cdot 10^{-9}$ |
| C'_9 | $0,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
| C'_{10} | $0,5 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-9}$ | $1,5 \cdot 10^{-9}$ | $2,0 \cdot 10^{-9}$ |
| C'_{11} | $0,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
| C'_{12} | $0,5 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-9}$ | $1,5 \cdot 10^{-9}$ | $2,0 \cdot 10^{-9}$ |

Рассчитанная функция принадлежности нечёткого числа – вероятности отказа СОТР показана на рис. 3.

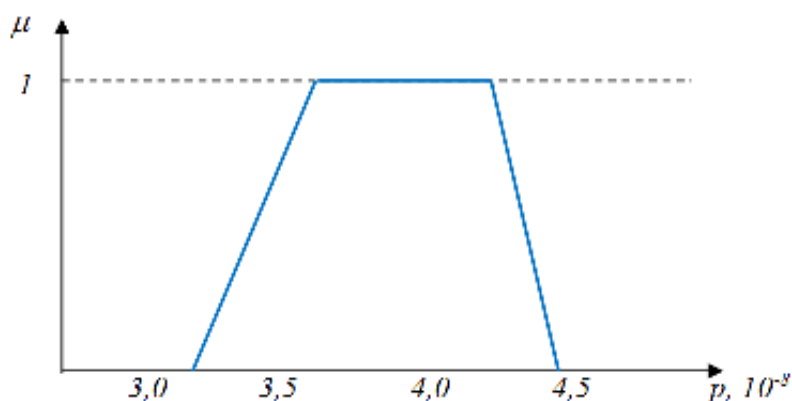


Рис. 3. Функция принадлежности для вероятности отказа СОТР

Таким образом, носителем нечёткого множества полученной оценки, то есть пессимистической оценки значения вероятности отказа, является интервал значений $[3,2; 4,5] \cdot 10^{-8}$.

Ядром нечёткого множества полученной оценки, то есть уверенной оценкой значения вероятности отказа, является интервал значений $[3,6; 4,3] \cdot 10^{-8}$.

Предложенный в работе метод оценки вероятности отказа сложной системы может быть использован для анализа надежности изделий ракетно-космической техники на ранних стадиях разработки.

Библиографический список

1. Куренков, В.И. Методы расчёта и ракетно-космических комплексов: учеб. пособие / В.И. Куренков, В.А. Капитонов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 320 с.

2. Рябинин, И.А., Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно-сложных систем / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981.– 264 с.

3. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надёжности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 318 с.