

РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ РОССИЙСКОГО ПОЗИЦИОНЕРА СИПАРТ ПС2

М.О. Зилонов, А.Д. Шевченко (ООО «ПНФ ЛГ автоматика»)

Кратко рассмотрены требования стандарта ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012, определяющего необходимость расчета вероятности отказа технических изделий и систем. Приведен ориентировочный расчет интенсивности отказов позиционера «Сипарт ПС2», выпускаемого компанией «ПНФ ЛГ автоматика» более 10 лет.

Ключевые слова: надежность, интенсивность отказов, интеллектуальный позиционер, клапан, испытания.

Исторически развитие теории надежности берет свое начало с задачи обеспечения надежности ракетных комплексов стратегического назначения при постановке их на боевое дежурство. В дальнейшем высокая стоимость этих средств "политического сдерживания" заставила задуматься над продлением срока службы ракетных комплексов. Отсюда возникла необходимость диагностики этой сложной технической системы для восстановления ее элементов при продлении срока службы системы.

В настоящее время не подлежит сомнению необходимость оценки показателей надежности сложных технических систем и их элементов, которые зачастую для их производителя также являются сложными системами, содержащими сотни элементов. С этой точки зрения, введение стандарта ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 для определения вероятности отказа технических изделий и систем является положительным фактором. Стандарт унифицирует употребляемую терминологию и задает единообразный подход к расчету показателей уровня надежности.

Главным достоинством ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 является максимальная простота расчета вероятности отказа системы, когда задано основное (последовательное) соединение элементов в системе, а вероятность отказа системы вычисляют по соотношению $Q(t) = \sum_{i=1}^m Q_i(t)$.

В стандарте ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 выделены четыре уровня полноты функциональной безопасности, отличающиеся, в первую очередь, значением вероятности отказа технологических элементов $Q(t)$, интенсивностью отказов $\lambda(t)$ и другими дополнительными показателями:

- уровень SIL1 ($0,01 < Q(t) \leq 0,1$; $10^{-6} < \lambda(t) < 10^{-5}$);
- уровень SIL2 ($0,001 < Q(t) \leq 0,01$; $10^{-7} < \lambda(t) < 10^{-6}$);
- уровень SIL3 ($0,0001 < Q(t) \leq 0,001$; $10^{-8} < \lambda(t) < 10^{-7}$);
- уровень SIL4 ($Q(t) \leq 0,0001$; $10^{-9} < \lambda(t) < 10^{-8}$).

Основные дополнительные показатели — это число опасных и безопасных отказов, соотношение между которыми также характеризует уровень функциональной безопасности. В стандарте ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 регламентируются время наработки на отказ, составляющее ≤ 8760 ч (календарный год), и время восстановления ≤ 8 ч для изделия, уровень безопасности которого декларируется.

В Европейском стандарте IEC 61508 выделены *случайные и систематические* отказы. Случайные отказы определяются путем испытаний с применением простейших положений теории вероятностей (все собы-

тия отказов образуют полную группу несовместных событий, распределение вероятности безотказной работы является экспоненциальным и т.п.). Систематические отказы характеризуются как не определяемые количественными оценками.

В стандарте ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 есть указание на то, что методы определения функциональной безопасности могут быть количественными и качественными. Из текста стандарта неясно, что понимается под качественным показателем надежности. В теории надежности качественная оценка надежности обычно осуществляется по графу состояний системы или схеме расчета ее надежности.

В технике время общей наработки изделий составляет до 10...12 лет, а для клапанов — 20...25 лет. Как известно, чем меньше время наработки на отказ, тем больше значение вероятности безотказной работы и, соответственно, меньше значение вероятности отказа.

Хотя в стандарте ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 ограничивается время восстановления изделия, однако все простейшие по своему содержанию примеры приведены для основного соединения нерезервированных невосстанавливаемых элементов. По-видимому, составители этого стандарта молчаливо полагают все или большинство технических изделий невосстанавливаемыми. Следствием этого является очень высокое требование к значению интенсивности отказов декларируемых изделий, характеризуемое нижним пределом $\lambda(t) = (10^{-9} \dots 10^{-12})$ 1/ч.

Такое значение интенсивности отказа очень далеко от реальных значений интенсивности отказа технических изделий, являющихся сложными системами, которые включают десятки или сотни элементов. Кроме того, в эксплуатационной практике технические изделия подвержены влиянию многих внешних воздействий (климатические факторы, вибрации, ударные нагрузки, уровень обслуживания и т.д.). Обе эти причины серьезно увеличивают значение интенсивности отказа технических систем. Указанное требование можно удовлетворить лишь при резервировании электронных или механических компонентов изделий, что приведет к существенному удорожанию производимых технических изделий.

В комплект клапана входят три основных элемента: арматура, МИМ (пневматический привод) и позиционер с обратной связью по положению штока затвора арматуры, которая чаще всего является механической.

В ООО «ПНФ ЛГ автоматика» были выполнены определительные испытания системы «арматура + мем-

бранный исполнительный механизм (МИМ)». Для расчета вероятности отказа клапана необходимо знать также интенсивность отказов или параметр потока отказов позиционера.

Клапаны часто комплектуются интеллектуальными позиционерами, такими как «Сипарт ПС2». Необходимо выполнить хотя бы ориентировочный расчет интенсивности отказов позиционера «Сипарт ПС2». Позиционер содержит жидкокристаллический индикатор, плату с полупроводниковыми элементами и пьезоэлектрическими приводами, пневмоусилитель, механическую обратную связь по положению затвора арматуры и у него есть программное обеспечение.

Механическая обратная связь по положению штока затвора арматуры в позиционере обычно является коромысло-ползунным механизмом. Такой механизм применяется в механических приборах для преобразования поступательного движения в качающее движение коромысла и содержит небольшое число хорошо отработанных элементов. Возникающие в обратной связи при перемещении штока затвора усилия являются незначительными. По аналогии с механизмом передачи движения манометра с трубчатой пружиной полагаем, что параметр потока отказов механической обратной связи $\leq 1,8 \cdot 10^{-6}$ 1/ч [3].

Выполним расчет интенсивности отказов пьезоэлектрического привода. Для биморфных пьезоэлементов интенсивность отказа определяется соотношением [1]:

$$\lambda(t) = \lambda_s(t) + \lambda_m(t);$$

где интенсивность отказа, определяемая значением напряжения пробоя монолитного пьезокерамического элемента, $\lambda_m(t)$ — интенсивность отказа, которая зависит от изгиба монолитного элемента при колебании.

При использовании биморфного пьезоэлемента, для которого изгиб пьезоэлемента не зависит от изгиба механических элементов и электрических контактов, полагаем, что частота колебаний $f = 0,5$ Гц, а число колебаний, изгибающих пьезоэлемент, равно $\lambda_m(N) = 10^9$ 1/колебание. Тогда

$$\lambda_m(t) = 3,6 \cdot 10^3 \cdot f \cdot \lambda_m(N) = 3,6 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^9 = 0,2 \cdot 10^{-6} 1/ч;$$

$$\lambda_s(t) \approx 1 \cdot 10^{-6} 1/ч.$$

Таким образом, интенсивность отказа монолитного элемента будет равна:

$$\lambda(t) \approx 1,2 \cdot 10^{-6} 1/ч.$$

Обычно в пьезоэлектрических приводах поступательного движения (линейных ПЭД) используется до 50 и более монолитных элементов. Считаем, что таких элементов в ПЭД пьезоклапанов позиционера «Сипарт ПС2» 10 ед. Тогда общая интенсивность отказов линейного ПЭД достигнет значения $\lambda_{опэд}(t) \approx 12 \cdot 10^{-6} 1/ч$.

Интенсивность отказа во время работы ПЭД определяется формулой [3]

$$\lambda_{пэд}^{раб.}(t) = \lambda_{опэд}(t) \cdot a_1 \cdot a_3 = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 6,05 \cdot 0,1 = 7,27 \cdot 10^{-6} 1/ч.$$

Интенсивность отказа ПЭД при простое равна [2]:

$$\lambda_{пэд}^{пр.}(t) = \lambda_{опэд}(t) \cdot a_1 \cdot a_3 = 36 \cdot 10^{-6} \cdot 6,05 \cdot 10^{-2} = 0,73 \cdot 10^{-6} 1/ч$$

Здесь a_1 — коэффициент, учитывающий условия работы, степень защиты и обслуживания изделия; a_3 — коэффициент, задающий соотношение интенсивностей отказов комплектующих изделий при работе и хранении (в нормальных условиях), a_4 — коэффициент, характеризующий уход параметров электромеханического элемента [3].

Средняя интенсивность отказа ПЭД за период эксплуатации системы «арматура КМР+МИМ+позиционер Сипарт ПС2» будет равна:

$$\lambda_{пэд}^{ср.}(t) = \frac{\lambda_{пэд}^{раб.}(t) \cdot t_{раб.} + \lambda_{пэд}^{пр.}(t) \cdot t_{пр.}}{t_{раб.} + t_{пр.}} =$$

$$= \frac{7,27 \cdot 10^{-6} \cdot 2160 + 0,73 \cdot 10^{-6} \cdot 69840}{72000} = 0,93 \cdot 10^{-6} 1/ч$$

В позиционере «Сипарт ПС2» используются два ПЭД, и их общая интенсивность отказа при непрерывной работе равна $14,54 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Для элементов различной номенклатуры общая интенсивность отказа определяется по формуле:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \cdot \lambda_i,$$

где N_i — число элементов i — го типа; r — число типов элементов.

В таблице представлена информация о числе элементов на основной плате «Сипарт ПС2» и их интенсивности отказов.

Таким образом, интенсивность отказов платы позиционера «Сипарт ПС2» равна $18,6 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Далее выполним оценку надежности программного обеспечения позиционера «Сипарт ПС2». Для выполнения расчета воспользуемся методом Холстеда [4]. Согласно этому методу для любой программы можно определить следующие величины:

- число различных операций n_1 , например, *IF*, *DO*, *PRINT* и т. п.;
- общее число всех операндов n_2 (переменных и констант);
- общее число всех операций N_1 ;
- общее число всех операндов N_2 ;

Тогда словарь программы есть $n = n_1 + n_2$, а длина реализации составляет $N = N_1 + N_2$.

При расчете вероятности отказа программного обеспечения позиционера «Сипарт ПС2» будем полагать, что $n_1 = 12$; $n_2 = 70$. В общее число всех операндов включены следующие величины:

- три измеряемые величины (задание позиционеру, сигнал обратной связи, информационный сигнал порта HART);
- две расчетные величины среднего положения хода штока клапана вверх и вниз;
- 15 расчетных величин, по которым диагностируется состояние клапана;

Таблица. Исходная информация о числе элементов на основной плате и их интенсивности отказов [3]

№№ п/п	Наименование элементов	Число элементов, ед.	$\lambda_i \cdot 10^6$, 1/ч	$\lambda_{\Sigma} \cdot 10^6$, 1/ч
1.	ИМС	10	0,1000	1,0000
2.	Диоды	15	0,0500	0,0300
4.	Транзисторы	10	0,0200	0,7500
5.	Резисторы	28	0,0050	0,1400
6.	Конденсаторы	4	0,0100	0,0400
7.	Стабилитроны	5	0,0500	0,2500
8.	ПЭД	2	7,2700	14,5400
9.	Коммутационные гнезда	3	0,0200	0,0600
10.	Жидкокристаллический индикатор	1	2,0000	2,0000
11.	Соединение пайкой	388	0,0001	0,0388
12.	Переменный резистор	1	0,0400	0,0400

— 20 координат времени для всех измеряемых и расчетных величин;

— 30 постоянных величин, используемых для расчета.

В этом случае длина программы равна:

$$N = n_1 \cdot \log_2 n_1 + n_2 \cdot \log_2 n_2 = 472,$$

а объем программы $V = N * \log_2 n = 3001$ бит.

Минимальный потенциальный объем выполняемого алгоритма составит

$$V^* = (n_2^* + 2) \cdot \log_2 (n_2^* + 2) = 226 \text{ бит},$$

где n_2^* — минимальное число независимых входных/выходных величин, равное в данном расчете 40 ед.

Уровень программы L определяется через отношение потенциального объема к объему программы:

$$L = V^*/V = 226/3001 = 0,075.$$

Уровень языка l позволяет оценить преимущество языка более высокого уровня по сравнению со своим предшественником и определяется формулой: $l = L * V^* = 17$.

Известно, что при разработке сложных программ трудоемкость их создания и число выявленных при отладке ошибок существенно возрастают. При этом полагают, что число переданных ошибок пропорционально объему программы. В общем виде соотношение для числа ошибок в программе таково:

$$V^* = (n_2^* + 2) \cdot \log_2 (n_2^* + 2) = 226,$$

$$B = (V^* / V_0^*)^2 = 89.$$

Здесь $V_0^* = 24$ для $n_2 = 6$ является базовым значением для потенциального объема.

Таким образом, максимальное число ошибок в программе — 89 ед. Позиционеры «Сипарт ПС2» эксплуатируются более 10 лет и в их программном обеспечении исправлено большинство ошибок.

Полагаем, что:

- в программе осталось две ошибки, то есть неправильная информация хранится в двух битах;
- программа выполняется за 2 с, а время наработки за год составляет 7200 ч или 25920000 с; число выполнений программы за год будет равно 12960000 ед.

Тогда при одноразовом выполнении программы возможны три гипотезы: программа выполняется безошибочно,

при выполнении программы используется неправильная информация одного или неправильная информация двух битов. Определим вероятности возникновения событий реализации этих гипотез при однократном исполнении программы.

Объем программы равен 3001 биту, длина минимального алгоритма составляет 226 битов. Число возможных способов выполнить алгоритмы длиной $m = 226$ битов в объеме программы $n = 3001$ бит равно числу сочетаний C_n^m . Число возможных способов реализации гипотез $l = 0, 1, 2$ при максимальном числе битов с неправильной информацией $k = 2$, будет равно числу сочетаний C_k^l . Число сочетаний безошибочного выполнения программы — C_{n-k}^{m-l} . Искомая вероятность выполнения сформулированных гипотез будет иметь вид [5]:

$$p = C_k^l \cdot C_{n-k}^{m-l} / C_n^m.$$

Вероятность безошибочного выполнения программы составляет $p_0 = 0,855$, вероятность выполнения программы с одной ошибкой — $p_1 = 0,139$, а вероятность выполнения программы с двумя ошибками равна $p_2 = 0,006$. Для расчета вероятности отказа при большом числе циклов выполнения программы удобно пользоваться локальной теоремой Лапласа:

$$Q_n(k) = \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{2\pi} \sqrt{npq}}, \quad x = \frac{k - np}{\sqrt{npq}},$$

где q — вероятность отказа, p — вероятность безотказной работы.

При $q = 0,145$; $p = 0,855$; $n = 12960000$ очевидно, что даже при очень большом значении k , которое является событием отказа (ошибочного выполнения программы), вероятность отказа стремится к нулю.

Итак, интенсивность отказов позиционера «Сипарт ПС2» с учетом интенсивности отказов пневмоусилителя ($1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/ч [3]), интенсивности отказов механической обратной связи ($1,8 \cdot 10^{-6}$ 1/ч [3]), оценки надежности программного обеспечения равна $21,4 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Список литературы

1. Джагутов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. Л.: Машиностроение, Ленингр. Отделение. 1986. 256 с.
2. Половко А.М. Основы теории надежности. Учебник для вузов. М.: Наука. 1964. 446 с.
3. Шавыкин Н.А., Петрухин Б.П., Жидомирова Е.М. Методика оценки безотказности технических средств. М.: Институт проблем управления РАН, 1997. 79 с.
4. Баялеников Б.Н., Гусева Ю.Г., Никандров А.В., Полонников Р.И. Надежность программного обеспечения. Уч. пособие. М.: Институт повышения квалификации Минрадиопрома СССР. 1991. 63 с.
5. Острейковский В.А. Теория надежности. Учебник для вузов. М.: Высшая школа. 2003. 463 с.

Зилов Михаил Олегович — канд. техн. наук, генеральный директор, **Шевченко Александр Дмитриевич** — руководитель отдела электроннеавтоматики ООО «ПНФ ЛГ автоматика». Контактный телефон (495) 788-68-21. E-mail: info@klapan.ru