Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 58 www.mai.ru/science/trudy/

УДК 621.3.019.3

Модель надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции

В.В. Бородин, А.М. Петраков

Аннотация

В статье рассматривается модель надежности обслуживаемых элементов, эксплуатирующихся на орбитальных космических станциях. Модель учитывает возможность периодической регулировки или профилактики элемента, в результате которой устраняются последствия деградации элемента. Представлена математическая модель надежности такого элемента и получены асимптотические законы надежности обсуживаемого элемента.

Ключевые слова

орбитальные станции; надежность; переменная интенсивность отказов; профилактика; восстановление.

Введение и постановка задачи

Орбитальные космические станции содержат большое число электронных и электромеханических устройств. Отказ любого устройства приводит к отказу или снижению эффективности функционирования всей станции. По этой причине вопросам обеспечения надежности постоянно уделяется большое внимание.

Для анализа и прогнозирования надежности широкое распространение получила экспоненциальная модель надежности элементов [1]. Характерной чертой этой модели является постоянная интенсивность отказов. С одной стороны такая модель позволяет определить показатели надежности широкого класса систем, а с другой имеются достаточные основания полагать, что, по крайней мере, электронные компоненты, работающие в стационарных условиях, характеризуются именно таким законом надежности.

Вместе с тем необходимо отметить, что экспоненциальная модель имеет ряд очень существенных ограничений. Прежде всего, из этой модели следует, что надежность системы может быть повышена исключительно за счет резервирования ее компонент. Это может быть как структурное (индивидуальное, коллективное, функциональное) резервирование, так и временное резервирование. Но в любом случае необходим избыточный ресурс для обеспечения заданного уровня надежности. Второе ограничение связано с тем, что реальные элементы, входящие в состав орбитальной станции, характеризуются изменяющейся во времени интенсивностью отказов. Сказывается влияние внешней среды, разнородность оборудования, наличие объемной программной составляющей в составе системы [2].

Таким образом, надежность элементов и устройств орбитальной станции в общем случае описывается функцией распределения с переменной интенсивностью отказов. Такая функция надежности описывает так называемые постепенные отказы [3,4,5], характерной чертой которых является деградация элементов, т.е. постепенное ухудшение; снижение или утрата положительных качеств элементов. Постепенные изменения характерны для механических, электромеханических и программных подсистем (в частности, «утечка памяти», перестройка индексов БД, накапливание программных ошибок) и для части электронных компонент.

Использование функций надежности общего вида, конечно, усложняет анализ систем с резервированием. Однако существенным достоинством таких моделей является то, что они позволяют анализировать влияние на надежность элемента профилактических и регламентных работ. Профилактические работы включают в себя настройку, регулировку, при необходимости ремонт оборудования. Во многих случаях за счет проведения профилактических работ, параметры системы могут быть изменены, и подсистема перейдет в исходное «новое» состояние. Таким образом, повышение надежности (наряду с резервированием) может быть обеспечено за счет проведения профилактических работ.

В статье предлагается математическая модель надежности элемента с учетом проведения профилактических работ. На основании представленной модели изучается влияние на надежность характер изменения интенсивности отказов и периода проведения профилактических работ. Кроме того, получены асимптотические оценки для надежности обслуживаемого элемента.

Модель надежности элемента

Искомой характеристикой обслуживаемого элемента является функция распределения времени до отказа. В качестве частного показателя надежности будет использоваться среднее время до отказа обслуживаемого элемента.

Профилактические работы приводят к изменению надежности элемента. Важным является вопрос о том, какова надежность элемента после проведения профилактики.

Мы исходим из предположения о том, что после проведения профилактики элемент переходит в состояние нового элемента и его надежность описывается той же функцией надежности, что и для нового элемента [4]. Обоснованием такой модели состоит в следующем.

1. Старение элемента, изменение его интенсивности отказов со временем вызывается некими физическими процессами, происходящими в элементе. Профилактические работы приводят к тому, что соответствующие процессы возвращаются в исходное состояние и начинаются как бы с нуля.

2. Каждый элемент уже в процессе производства не исключает определенного числа потенциальных отказов, которые в процессе эксплуатации могут в случайное время привести к отказу элемента, а могут и не привести. Профилактика позволяет на ранних стадиях обнаружить начальные проявления таких отказов и во время их исправить. В этом случае модель надежности становится такой же, как и модель надежности программного обеспечения, для которого тестирование приводит к росту среднего времени между отказами за счет исправления отказов, выявленных в ходе теста.

Таким образом, если исходить из приведенных положений, надежность элемента не уменьшается при проведении профилактических работ.

Обозначим через F(t) – функцию распределения времени до отказа исходного (необслуживаемого) элемента. Среднее время до отказа необслуживаемого элемента обозначим через To. Пусть проведение необходимых профилактических работ осуществляется через случайный интервал времени, имеющий функцию распределения G(t). Обозначим через τ среднее время между профилактическими работами. Длительность профилактических работ мала по сравнению с интервалом между профилактическими работами и в расчетах не учитывается.

Поведение элемента описывается случайным дискретным процессом. Элемент может находиться в следующих состояниях: «состояние1»- состояние работоспособности перед проведением первой профилактики, «состояние 2»- состояние работоспособности перед проведением второй профилактики, … и одно состояние отказа. Из каждого состояния работоспособности элемент может перейти или в состояние отказа (если отказ произошел между профилактическими работами) или в следующее новое состояние работоспособности. Граф переходов между состояниями приведен на рисунке.

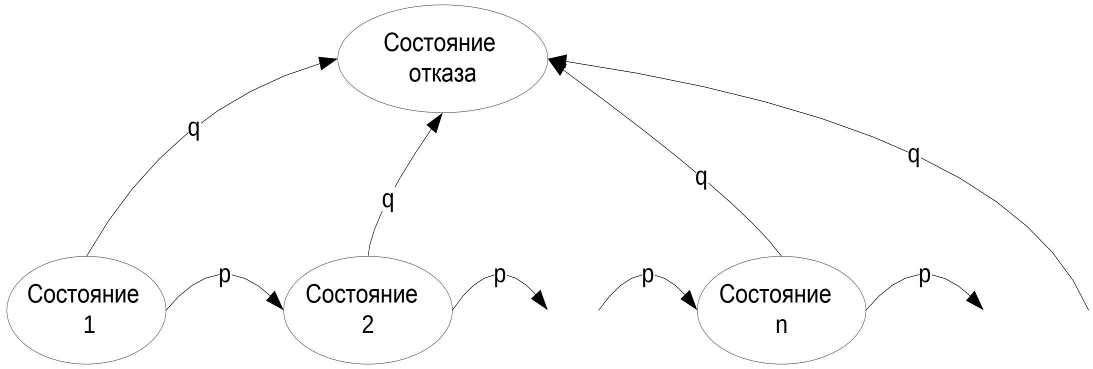

Рисунок. Граф переходов

В каждом состоянии работоспособности элемент находится случайное время, равное минимальному значению между временем наступления профилактических работ и времени до отказа элемента. Следовательно, функция распределения времени нахождения в состоянии работоспособности есть

$$\Psi(t) = 1 - (1-F(t))*(1-G(t)) = 1- \overline{F}(t)*\overline{G}(t) \quad (1),$$

где для краткости черта над функцией обозначает дополнение этой функции до единицы, например:

$$\overline{F}(t) = 1-F(t) \quad (2)$$

. Среднее время нахождения в состоянии работоспособности обозначим через

$$\theta = \int_0^\infty \overline{\Psi}(t)dt \qquad (3).$$

Поскольку функция Ψ(t) в общем случае не является экспоненциальной, случайный процесс является полумарковским.

Искомым показателем надежности обслуживаемого элемента является функция распределения времени до перехода в состояние отказа. Обозначим искомую функцию через $\varPhi(\mathrm{t})$. Для определения $\varPhi(\mathrm{t})$ введем следующие определения.

Вероятность перехода в состояние отказа есть

$$\mathrm{q} = \int_0^\infty \overline{\mathrm{G}}(\mathrm{t})\mathrm{dF}(\mathrm{t}) \qquad (4).$$

Вероятность перехода в следующее работоспособное состояние есть

p=1-q (5).

Обозначим через $\tilde{\psi}(s)$ преобразование Лапласа функции Ψ(t). Тогда преобразование Лапласа $\tilde{\varPhi}(\mathrm{s})$ функции перехода в состояние отказа будет удовлетворять следующему уравнению:

$$\tilde{\varPhi}(s) = q * \tilde{\psi}(\mathrm{s}) + \mathrm{q} * \mathrm{p} * \tilde{\psi}^2(\mathrm{s}) + \ldots + \mathrm{q} * \mathrm{p}^{\mathrm{n}} * \tilde{\psi}^n(\mathrm{s}) + \ldots \qquad (6).$$

Поскольку правая часть уравнения образует геометрическую прогрессию, окончательно можно записать:

$$\tilde{\varPhi}(\mathrm{s}) = \frac{\mathrm{q} * \tilde{\psi}(\mathrm{s})}{1 - \mathrm{p} * \tilde{\psi}(\mathrm{s})} \qquad (7)$$

Полученное выражение определяет преобразование Лапласа функции распределения времени до отказа обслуживаемого элемента.

Анализ модели надежности

Проведем анализ полученного выражения.

Среднее время T до отказа обслуживаемого элемента равно:

$$\mathrm{T} = -\frac{\mathrm{d}\tilde{\Phi}(0)}{\mathrm{d}s} = -q\frac{\tilde{\Psi}'(0)(1-p\tilde{\Psi}) + p\tilde{\Psi}\tilde{\Psi}'}{(1-p)^2} = \frac{\theta}{q} \qquad (8)$$

Второй момент функции Φ равен:

$$\mathrm{T}^2 + D^2 = \frac{\mathrm{d}^2\tilde{\Phi}(0)}{\mathrm{d}s^2} = q\frac{\Psi''(1-p\tilde{\Psi})^2 + 2*p\tilde{\Psi}'(1-\tilde{\Psi}p)p\tilde{\Psi}'}{(1-\tilde{\Psi}p)^4} = \frac{q\theta^2(1+\gamma_\Psi)+2p\theta^2}{q^2} \quad (9)$$

Следовательно, коэффициент формы γ_Φ равен:

$$\gamma_\Phi = (\mathrm{D}^2+\mathrm{T}^2)/\mathrm{T}^2 - 1 = p + q\ \gamma_\Psi \quad (10)$$

где γ_Ψ – коэффициент формы функции Ψ.

Анализ последнего выражения показывает, что коэффициент формы функции Φ может принимать значения как больше 1, так и меньше 1. Однако при малых вероятностях q коэффициент формы функции Φ мало зависит от коэффициента формы исходного распределения времени до отказа и близок к 1.

Определим асимптотическое значение функции Φ(t) при t→ ∞ в предположении, что вероятность q мала. Разложим функцию Ψ(s) в ряд по степеням s:

$$\tilde{\Phi}(\mathrm{s}) = \frac{\mathrm{q}*\tilde{\psi}(\mathrm{s})}{1\text{-}\mathrm{p}*\tilde{\psi}(\mathrm{s})} \to \frac{q*\tilde{\Psi}(s)}{1-p*(1-s*\theta+...)} = \frac{q}{q-s*\theta} = \frac{1}{1-s*T_э} \Rightarrow 1-e^{-t/T} \quad (11)$$

Таким образом, асимптотически при малых значениях вероятности q перехода в состояние отказа функция распределения времени до отказа обслуживаемого элемента является экспоненциальной с параметром 1/T.

Полученный результат косвенно объясняет использование экспоненциальных распределений на практике. Поскольку большинство элементов орбитальной станции являются в той или иной мере обслуживаемыми, итоговая функция надежности такого элемента стремится к экспоненциальной.

Определим теперь влияние на среднее время T дисперсии σ закона распределения времени между проведением регламентных работ G(t, σ). Положим, что при изменении дисперсии закона G(t, σ) среднее время между профилактическими работами не изменяется:

$$\frac{d\tau}{d\sigma} = \int_0^\infty (1-G(t,\sigma))dt = 0 \quad (12)$$

Согласно (8) имеем:

$$\mathrm{T} = \theta / \mathrm{q} \quad (13)$$

Дифференцируя по переменной σ, получим:

$$\frac{dT}{d\sigma} = \frac{q * \theta' - \theta * q'}{q^2} \tag{14}$$

Находим производные величин q и θ, используя соответствующие определения:

$$\theta' = -\int_0^\infty \overline{F}(t) G'(t) dt \tag{15}$$

$$q' = -\int_0^\infty G'(t) dF(t) \tag{16}$$

Как указывалось выше, функции надежности F(t) элементов в общем случае не являются экспоненциальными и относятся к классу стареющих функций, интенсивность отказов которых со временем не уменьшается. Для этих функций распределения характерным является то, что плотность распределения имеет один максимум [1,2]. С учетом (2), отсюда непосредственно следует, что θ’ <0, а q’ >0. Следовательно, получаем следующий результат:

$$\frac{dT}{d\sigma} < 0 \tag{17}$$

Таким образом, с уменьшением дисперсии периода между профилактическими работами, средняя наработка на отказ увеличивается. В частности, максимальная наработка будет достигаться при постоянном периоде между профилактическими работами.

Полученные выражения позволяют определить степень изменения надежности элемента при проведении профилактических работ. Расчеты по приведенным формулам показывают, что влияние профилактических работ на увеличение среднего времени до отказа элемента наблюдается при условии τ/To < 0.4. При этом профилактика позволяет увеличить среднее время до отказа в 5 и более раз.

Необходимо отметить также, что с уменьшением дисперсии времени до отказа элемента эффективность профилактических работ увеличивается.

Краткие выводы

В статье предложена математическая модель надежности обслуживаемого элемента. Модель представляет собой полумарковский процесс. Получено преобразование Лапласа функции распределения времени до отказа элемента. Приведен асимптотическое выражение времени до отказа обслуживаемого элемента оптимальное значение периода профилактических работ мало зависит от параметров законов надежности элемента.

Библиографический список

1. Барзилович Е.Ю., Беляев Ю.К., Каштанов В.А. и др. Вопросы математической теории надежности /Под ред. Б.В. Гнеденко. - М.: Радио и связь, 1983. - 376с.
2. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. - М.: Сов. радио, 1969. - 488с.
3. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход.- М.: Радио и связь, 1988. - 434с.
4. ГОСТ Р 27.004-2009 Надежность в технике. Модели отказов
5. Данилин Н.С., Гусев Л.И., Загоровский Ю.И. Обеспечение качества РЭА методами диагностики и прогнозирования.–М.: Издательство стандартов, 1983.– 224с.

Сведения об авторах

БОРОДИН Вячеслав Васильевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-41-02; e-mail: doc_bor1@mai.ru

ПЕТРАКОВ Александр Михайлович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-41-02; e-mail: nio4@mai.ru