

УДК 629.7.017

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЯ АВИОНИКИ С «ХОЛОДНЫМ» РЕЗЕРВОМ

О.А. Кузнецова

Построена математическая модель оценки безотказности изделия авионики, представленного в виде нагруженного дублирования с дополнительным «холодным» резервом. Модель учитывает неполный контроль работоспособности входящих устройств и время задержки во включении «холодного» устройства. Выполнен сравнительный анализ вариантов структурного резервирования.

Ключевые слова: надежность, безотказность, «холодный» резерв, контроль работоспособности.

Введение

Учитывая требования по отказобезопасности гражданской авиации в части недопущения возникновения на борту самолета сложной ситуации, показатель отказобезопасности аппаратуры самолета (вероятность отказа за 1 ч полета) должен быть не выше 10^{-5} . Для обеспечения указанного требования, учитывая современные показатели безотказности авионики, в проектных решениях структур изделий необходимо предусматривать не менее чем двукратное резервирование. Структурное резервирование в простейшем варианте может быть реализовано в виде постоянно включенной группы изделий, резервирующих друг друга по выполняемым функциям, либо с применением «холодного» резерва. В обоих вариантах резервирования равной кратности резервированные группы состоят из одного основного и двух резервирующих изделий, отличающихся тем, что в одной из групп второе резервное изделие до момента возникновения первого отказа находится в выключенном состоянии, т.е. используется в режиме «холодного» резерва (рис. 1). Применение избыточности как способа повышения надежности имеет широкое применение при проектировании сложных технических систем [1–4]. Учитывая, что за время полета ремонт возникших отказов авионики не может быть выполнен сразу после обнаружения, на первый взгляд, для рассматриваемой резервированной группы с «холодным» резервом необходимо было бы воспользоваться моделью оценки надежности невосстанавливаемых систем из справочников [1, 2]. Но эта модель позволяет оценить надежность системы без учета того, что у основного устройства, помимо «холодного» резерва, имеется нагруженный резерв. При попытке заменить группу с нагруженным резервом на нерезервированное устройство с аналогичным показателем безотказности возникает трудность в использовании предлагаемой модели, так как интенсивности отказов входящих устройств становятся неравными (что противоречит исходным условиям применения модели [1, 2]). Наличие же задержки во включении «холодного» резерва ведет к еще большему затруднению, так как в этом случае предлагается перейти к рассмотрению восстанавливаемой системы без резерва, у которой время восстановления равно времени переключения на резерв. Учитывая изложенные недостатки имеющейся модели, для анализа применения «холодного» резерва возникла необходимость построения более точной модели оценки вероятности отказа группы с «холодным» резервом, учитывающей время задержки включения в работу «холодного» резерва и полноту контроля работоспособности устройств в резервных группах, так как включение «хо-

лодного» резерва в работу осуществляется только в том случае, если возникший в нагруженных устройствах отказ обнаружен средствами контроля.

Рассматриваемые варианты структурного резервирования

Первый вариант структурного построения резерва (рис. 1, а) состоит из дублированной группы идентичных изделий с неполным контролем работоспособности и дополнительного изделия, используемого в режиме «холодного» резерва. Для включения «холодного» резерва в работу требуется время подготовки, равное Δt . Второй вариант структурного построения (рис. 1, б) состоит из группы двукратного резервирования идентичных изделий с неполным контролем работоспособности.

В дублированной группе первое устройство функционирует приоритетно, второе выполняет функции управления после контролируемого отказа первого. До отказа приоритетного изделия второе находится во включенном состоянии. После возникновения отказа в одном из включенных изделий и обнаружения его средствами контроля подается сигнал о включении изделия, находящегося в ненагруженном «холодном» резерве. Контроль работоспособности изделий, как правило, основывается на результатах [3]:

- контроля отдельного устройства собственными встроенными программно-аппаратными средствами, полнота контроля при этом ограничивается возможностями внутренних программных и аппаратных средств;
- функционального контроля – контроля на уровне изделия в целом при включении специальных режимов контроля или при непосредственном рабочем функционировании;
- органолептического контроля со стороны экипажа или обслуживающего персонала. Результаты данного контроля могут повысить надежность только в том случае, если переключение между резервом может осуществляться оператором.

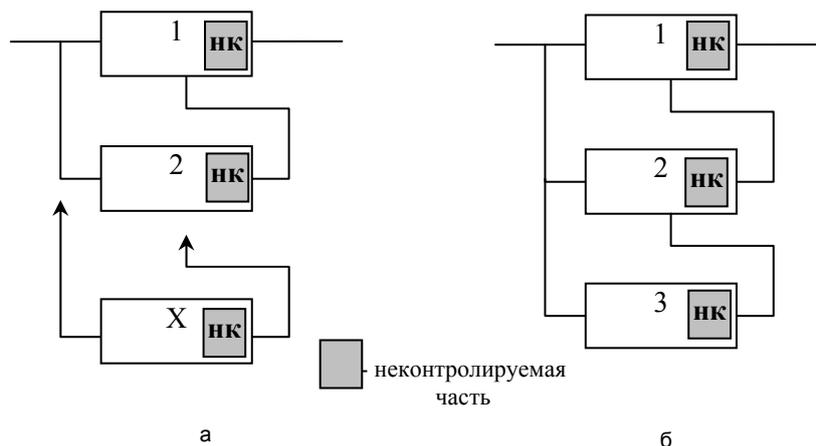


Рис. 1. Рассматриваемые варианты структурного резервирования: нагруженное дублирование с дополнительным «холодным» резервом (а); нагруженное двукратное резервирование (б). 1 – первое нагруженное изделие; 2 – второе нагруженное изделие; 3 – третье нагруженное изделие, X – «холодный» резерв

Построение модели расчета безотказности

Первая модель. Для формализации вероятности отказа рассматриваемой структуры с «холодным» резервом все возможные состояния отказа представлены схематично в виде временных диаграмм на рис. 2–5.

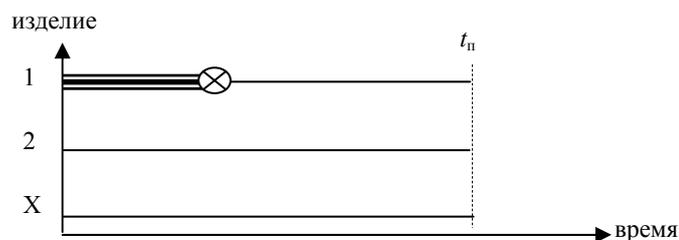


Рис. 2. Временная диаграмма, изображающая отказ основного изделия в неконтролируемой части

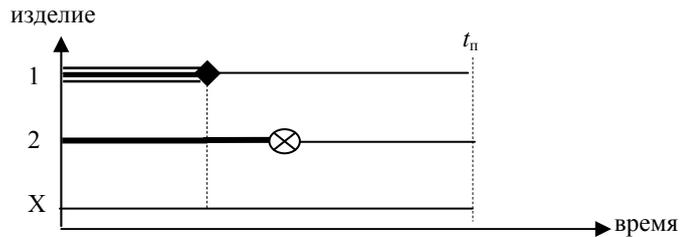


Рис. 3. Временная диаграмма, изображающая отказ в неконтролируемой части резервного изделия и контролируемый отказ основного изделия

Рис. 2 отображает случай с отказом основного, приоритетного изделия в неконтролируемой части: из-за неполного контроля отказов переход на резерв не осуществится, и, хотя резерв может в это время быть в работоспособном состоянии, группа будет отказавшей. Похожая ситуация представлена на рис. 3, но теперь отказ произошел в неконтролируемой части второго изделия. При этом отказ второго изделия скажется на отказе всей группы только после того, как второе изделие приняло или должно было принять функции управления (т.е. после контролируемого отказа первого изделия).

Ситуации, представленные на рис. 4, ведут к отказу резервированной группы из-за недостаточности времени между первым и вторым отказом для включения «холодного» резерва.

На рис. 5 представлены ситуации, когда за время до окончания полета произойдут отказы всех трех изделий резервированной группы в следующей последовательности: контролируемый отказ первого изделия, затем контролируемый отказ второго и включенного «холодного» резерва (рис. 5, а), или контролируемый отказ второго изделия, затем контролируемый отказ первого и отказ включенного «холодного» резерва (рис. 5, б).

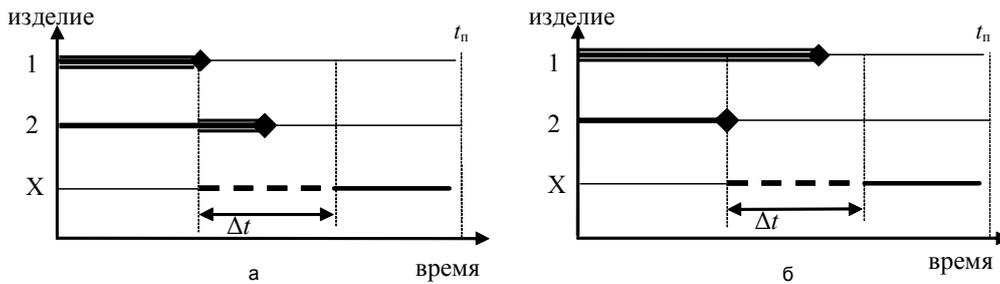


Рис. 4. Временные диаграммы, изображающие отказ резервного изделия после контролируемого отказа основного изделия за время, меньшее Δt (а), и отказ основного изделия после контролируемого отказа резервного изделия за время, меньшее Δt (б)

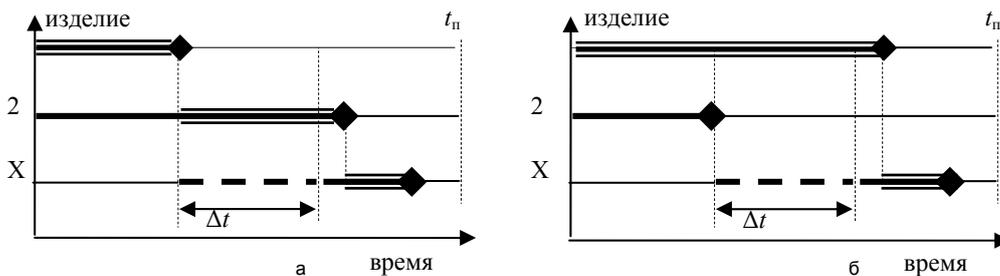


Рис. 5. Временные диаграммы, изображающие отказ включенного «холодного» резерва после контролируемого отказа первого, а затем и контролируемого отказа второго изделия (а), а также после контролируемого отказа второго, а затем и контролируемого отказа первого изделия (б)

Формализация вероятности отказа за время полета резервированной группы, возможные состояния отказов которой представлены на рис. 2–5, при условии, что в полет группа отправляется с полным резервом, а вероятность безотказной работы переключающих элементов и элементов, включающих «холодное» изделие, равна 1 (для периода нормальной эксплуатации) имеет вид суммы вероятностей:

$$Q_{cx,x}(t_n) = Q_{cx2}(t_n) + Q_{cx3}(t_n) + Q_{cx4a}(t_n) + Q_{cx4б}(t_n) + Q_{cx5a}(t_n) + Q_{cx5б}(t_n). \quad (1)$$

Здесь $Q_{cx2}(t_n)$, $Q_{cx3}(t_n)$, $Q_{cx4a}(t_n)$, $Q_{cx4б}(t_n)$, $Q_{cx5a}(t_n)$, $Q_{cx5б}(t_n)$ – вероятности возникновения ситуаций, схематично представленных на рис. 2–5 соответственно:

$$Q_{cx2}(t_n) = Q_{1нк}(t_n)P_{1к}(t_n), \quad (2)$$

$$Q_{cx3}(t_n) = P_{1нк}(t_n)Q_{1к}(t_n)Q_{2нк}(t_n)P_{2к}(t_n), \quad (3)$$

$$Q_{cx4a}(t_n) = \int_0^{t_n} P_{1нк}(\tau)P_{2нк}(\tau + \Delta t) \frac{d[Q_{1к}(\tau)]^{\tau+\Delta t}}{d\tau} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \frac{dQ_{2к}(f)}{df} df \quad d\tau, \quad (4)$$

$$Q_{cx4б}(t_n) = \int_0^{t_n} P_{2нк}(\tau)P_{1нк}(\tau + \Delta t) \frac{d[Q_{2к}(\tau)]^{\tau+\Delta t}}{d\tau} \int_{\tau}^{\tau+\Delta t} \frac{dQ_{1к}(f)}{df} df \quad d\tau, \quad (5)$$

$$Q_{cx5a}(t_n) = \int_0^{t_n-\Delta t} Q_x(t_n - \tau)P_{1нк}(\tau)P_{2нк}(\tau + \Delta t) \frac{d[Q_{1к}(\tau)]^{\tau+\Delta t}}{d\tau} \int_{\tau+\Delta t}^{t_n} \frac{dQ_{2к}(f)}{df} df \quad d\tau, \quad (6)$$

$$Q_{cx5б}(t_n) = \int_0^{t_n-\Delta t} Q_x(t_n - \tau)P_{2нк}(\tau)P_{1нк}(\tau + \Delta t) \frac{d[Q_{2к}(\tau)]^{\tau+\Delta t}}{d\tau} \int_{\tau+\Delta t}^{t_n} \frac{dQ_{1к}(f)}{df} df \quad d\tau. \quad (7)$$

$P_i(t)$, $P_{ик}(t)$, $P_{инк}(t)$ – вероятность безотказной работы i -го изделия, контролируемой части и неконтролируемой части i -го изделия соответственно за время t . Индекс $i = 1, 2, 3, x$ используется для обозначения в резервированных структурах изделий в соответствии с рис. 1, а.

$Q_i(t)$, $Q_{ик}(t)$, $Q_{инк}(t)$ – вероятность отказа i -го изделия, отказа в контролируемой и неконтролируемой частях соответственно за время t .

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i t), \quad Q_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i t),$$

$$P_{ик}(t) = \exp(-\omega_i \lambda_i t), \quad Q_{ик}(t) = 1 - \exp(-\omega_i \lambda_i t),$$

$$P_{инк}(t) = \exp(-[1 - \omega_i] \lambda_i t), \quad Q_{инк}(t) = 1 - \exp(-[1 - \omega_i] \lambda_i t),$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го изделия; ω_i – полнота контроля i -го изделия.

Вторая модель. Для аналогичной структуры, но с включенным резервом (рис. 1, б), формула расчета вероятности отказа, учитывающая полноту контроля работоспособного состояния изделий, имеет вид [4]:

$$Q_{cx,н}(t_n) = Q_{1нк}(t_n)P_{1к}(t_n) + Q_{1к}(t_n)P_{1нк}(t_n)Q_{2нк}(t_n)P_{2к}(t_n) + Q_{1к}(t_n)P_{1нк}(t_n)Q_{2к}(t_n)P_{1нк}(t_n)Q_3(t_n). \quad (8)$$

Анализ полученных математических моделей

Для примера по формулам (1)–(8) рассчитаны и на рис. 6 представлены графики зависимостей вероятностей отказов сравниваемых структур от времени полета t_n .

Для расчета и построения графика на рис. 6 использовались следующие данные: $\lambda_i = 250 \times 10^{-6} 1/ч$; $\omega_i = 0,99$, $\Delta t = 0$.

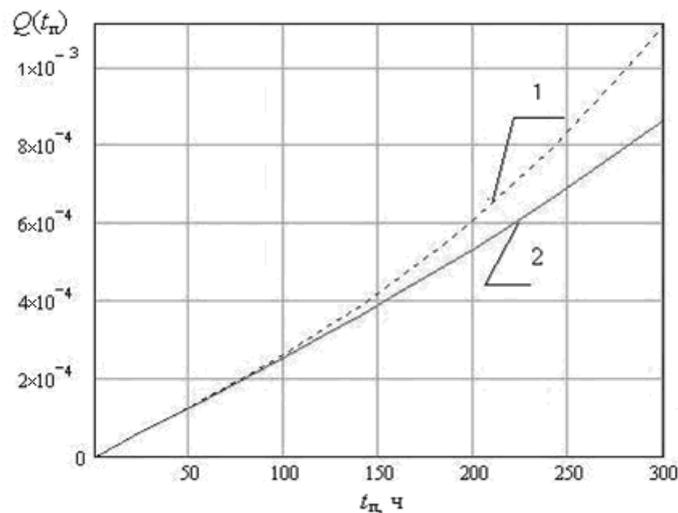


Рис. 6. Графики зависимости вероятностей отказов сравниваемых структур от времени полета t_n :
 1 – вероятность отказа нагруженного двукратного резервирования (рис. 1, б, модель 2);
 2 – вероятность отказа нагруженного дублирования с дополнительным «холодным» резервом (рис. 1, а, модель 1)

Согласно полученным результатам для изделия в двух вариантах построения на времени полета более 50 ч наблюдается постепенное расхождение кривых 1 и 2, при этом растет скорость ухудшения надежности изделия во втором варианте исполнения – с нагруженными резервами.

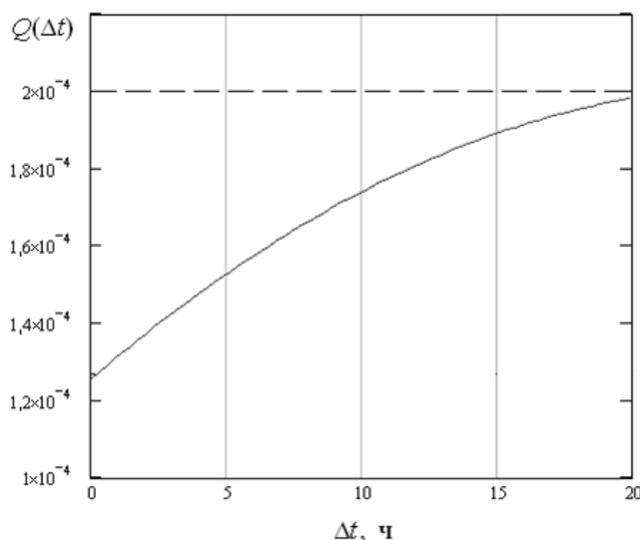


Рис. 7. Влияние значения времени задержки включения «холодного» резерва – Δt на вероятность отказа изделия, построенного с «холодным» резервом $Q(\Delta t)$

На рис. 7 представлена зависимость вероятности отказа изделия с «холодным» резервом от времени задержки во включении Δt (при $t_{\text{п}} = 50$ ч). Пунктиром на рисунке отмечено значение вероятности отказа обычной дублированной группы, к которому стремится значение вероятности отказа изделия с «холодным» резервом при увеличении времени Δt , т.е. с ростом Δt эффективность введенного «холодного» резерва полностью исчезает.

Заключение

Построена математическая модель оценки вероятности отказа изделия авионики, представленного в виде дублированной группы с дополнительным «холодным» резервом, учитывающая время задержки включения в работу «холодного» резерва и полноту контроля работоспособности входящих устройств.

Построенная модель позволит на начальных этапах разработки изделия авионики выполнить сравнительную оценку надежности возможных вариантов построения и принять решение о необходимом виде резервирования изделия, позволяющем обеспечить требования по надежности и отказобезопасности.

Литература

1. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
2. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
3. Кузнецова О.А. Оценка надежности структурно избыточных комплексов авионики с учетом среднего времени между восстановлениями при отказах // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – № 3. – С. 65–70.
4. Кузнецова О.А., Гатчин Ю.А., Лобов В.В. Оценка надежности структурно избыточных изделий при проектировании сложных технических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1 (59). – С. 44–52.

Кузнецова Ольга Александровна – ФГУП СПб ОКБ «Электроавтоматика», начальник подразделения, аспирант, kuzola@ya.ru