

СПОСОБ ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

В.Л. Якимов (Санкт-Петербург)

Одним из возможных путей повышения уровня автономности космических аппаратов (КА) является обеспечение высокой отказоустойчивости их бортовых систем, в том числе за счет развития бортовых и наземных средств диагностирования и восстановления работоспособности бортовой аппаратуры (БА) [1, 2]. Существует связь достоверности диагностирования БА с длительностью интервала автономного функционирования КА и задача рационального распределения функций между наземными и бортовыми средствами контроля технического состояния (ТС) и диагностирования БА КА [2]. При этом средства диагностирования, входящие в состав наземного сегмента системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) управления КА, используются для проведения плано-периодического углубленного анализа ТС КА, а периодичность проведения такого анализа численно совпадает с интервалом автономного функционирования КА. Ввиду сложности рассматриваемых процессов, наиболее приемлемым способом для оценки указанных временных интервалов видится подход на основе имитационного моделирования.

Аналитическая модель потока отказов на борту КА

Рассмотрим поток отказов на борту КА «Ресурс-ДК1» за период, равный 2,5 года летной эксплуатации, в течение которого произошло $N=29$ отказов, в том числе 7 «тяжелых» [1]. Под «тяжелым» отказом понимается нештатная ситуация (НС) для парирования которой необходимо задействовать средства наземного сегмента СИТО и при обнаружении которой осуществляется автоматический перевод КА в специальный режим работы – неориентированный полет (НП). В режиме НП отсутствует риск негативного развития НС [1]. На рис. 1 представлены зависимости, характеризующие суточную интенсивность отказов БА КА за время летной эксплуатации [1]. В результате анализа были выявлены следующие закономерности: а) низкочастотный тренд характеризует «желаемую» для данной конструкции КА зависимость интенсивности отказов БА от номера отказа в условиях отсутствия негативного развития НС; б) анализ высокочастотной составляющей показывает, что приращения суточной интенсивности отказов можно разделить на положительные, отрицательные и близкие к нулю; в) возникновение зависимых отказов сопровождается появлением следующих подряд положительных приращений суточной интенсивности отказов, причем их уровень с течением времени уменьшается, что изначально закладывается в конструкцию КА на этапе проектирования; г) значительные отрицательные приращения суточной интенсивности отказов коррелируют с интервалами времени нахождения КА в режиме НП и взаимодействия с наземным сегментом СИТО, причем значение суточной интенсивности отказов в окрестности этих участков уменьшается до уровня низкочастотного тренда; д) незначительные отрицательные и нулевые приращения суточной интенсивности отказов можно связать с работой бортовых средств при диагностировании БА и восстановлении ее работоспособности. На этапе приработки математические зависимости, аппроксимирующие тренд $\lambda_{c,=} (k)$ (рис. 1, а, кривая 2) и изменения значений положительных приращений суточной интенсивности отказов $d\lambda_{c,+} (k)$ (рис. 1, б, кривая 1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{c,=} (k) &= 3.6 \cdot 10^{-2} + 9 \cdot 10^{-3} k - 1.3 \cdot 10^{-3} k^2 + 1.5 \cdot 10^{-4} k^3 - 0 \cdot 10^{-5} k^4 + 3 \cdot 10^{-7} k^5 - 3.3 \cdot 10^{-9} k^6, \\ d\lambda_{c,+} (k) &= 1.8 \cdot 10^{-2} - 2.1 \cdot 10^{-3} k + 9 \cdot 10^{-5} k^2 - 0 \cdot 10^{-6} k^3, k \in [1, 2] \end{aligned} \quad (1)$$

где k – номер отказа БА КА. На этапе нормальной эксплуатации для оценки значений

$\lambda_{c,=}(k)$ и $d\lambda_{c,+}(k)$ можно использовать следующие выражения:

$$\lambda_{\bar{n},=}(k) = 0.038, d\lambda_{c,+}(k) = 0.0013. \quad (2)$$

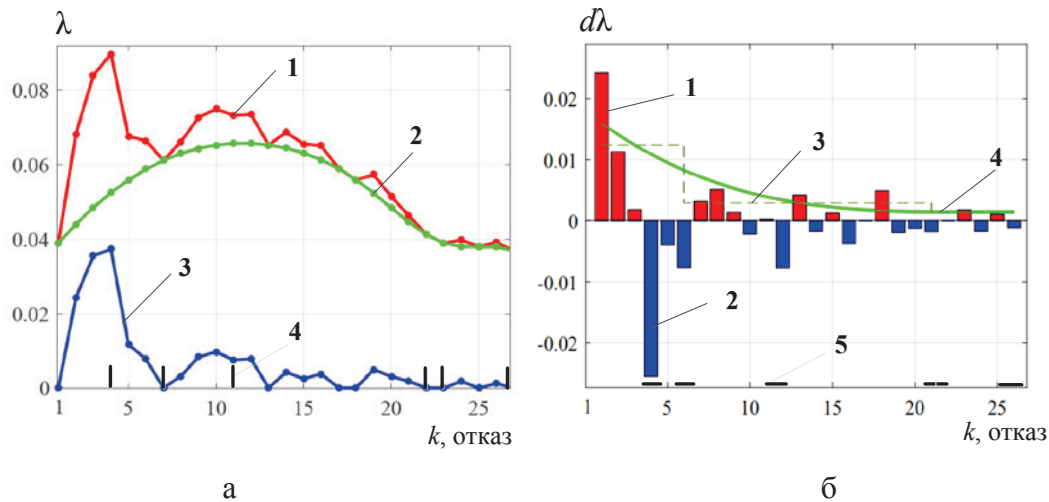


Рис. 1. Зависимости: а – суточные интенсивности отказов от номера отказа (1), низкочастотного тренда (2), высокочастотных изменений (3) и участки с «тяжелыми отказами» (4); б – положительных (кривая 1) и отрицательных (2) приращений суточной интенсивности отказов от номера отказа, аппроксимир. функций (3 и 4) и участки с «тяжелыми отказами» (5)

На основе выявленных закономерностей, а также выражений (1) и (2) могут быть реализованы достаточно общие аналитические модели развития НС на борту КА.

Имитационная модель процесса диагностирования автоматических КА

Для построения модели была использована функциональная схема процесса диагностирования автоматических КА и разработанный на ее основе граф состояний [2]. На рис. 2 представлено отображение модели в среде AnyLogic [3]. Число текущих состояний, образующих множество $S=(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{11})$, определяется логикой и уровнем описания процесса диагностирования БА КА при возникновении НС. Переходы между состояниями описываются вероятностями $P_{q,r}$ перехода из текущего состояния q в состояние r и характеризуются задержкой модельного времени на величину $T_{q,r}$, $q=0 \dots 8, r=1 \dots 11$. Исходным состоянием является состояние S_0 , соответствующее воздействию НС на БА КА, находящуюся в работоспособном состоянии. В модели можно выделить 4 уровня обработки информации о НС: первый уровень отвечает за оперативный контроль ТС БА КА с использованием бортовых средств (состояние S_0 , переходы $P_{0,1}, P_{0,2}, P_{0,3}$), второй – за распознавание НС в БА КА и локализацию неисправности с использованием бортовых средств (состояния S_1-S_3 , переходы $P_{1,9}, P_{1,10}, P_{2,4}, P_{2,5}, P_{2,8}, P_{3,6}, P_{3,7}, P_{3,8}$), третий – за восстановление работоспособности БА КА (состояния S_4-S_7 , переходы $P_{4,8}, P_{4,11}, P_{5,9}, P_{5,10}, P_{6,11}, P_{6,8}, P_{7,9}, P_{7,10}$), четвертый – за контроль ТС БА с использованием средств наземного сегмента СИТО (состояние S_8 , переходы $P_{8,9}, P_{8,11}$). Состояния S_9, S_{10}, S_{11} являются поглощающими и характеризуют следующие состояния БА КА: S_9 – БА КА находится в неработоспособном состоянии; S_{10} – БА КА находится в частично работоспособном состоянии (ЧРС); S_{11} – БА КА находится в работоспособном состоянии. Произведение вероятностей правильного обнаружения НС $P_{0,2}$ и правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС $P_{2,4}$ может быть использовано в качестве показателя достоверности диагностирования с использованием

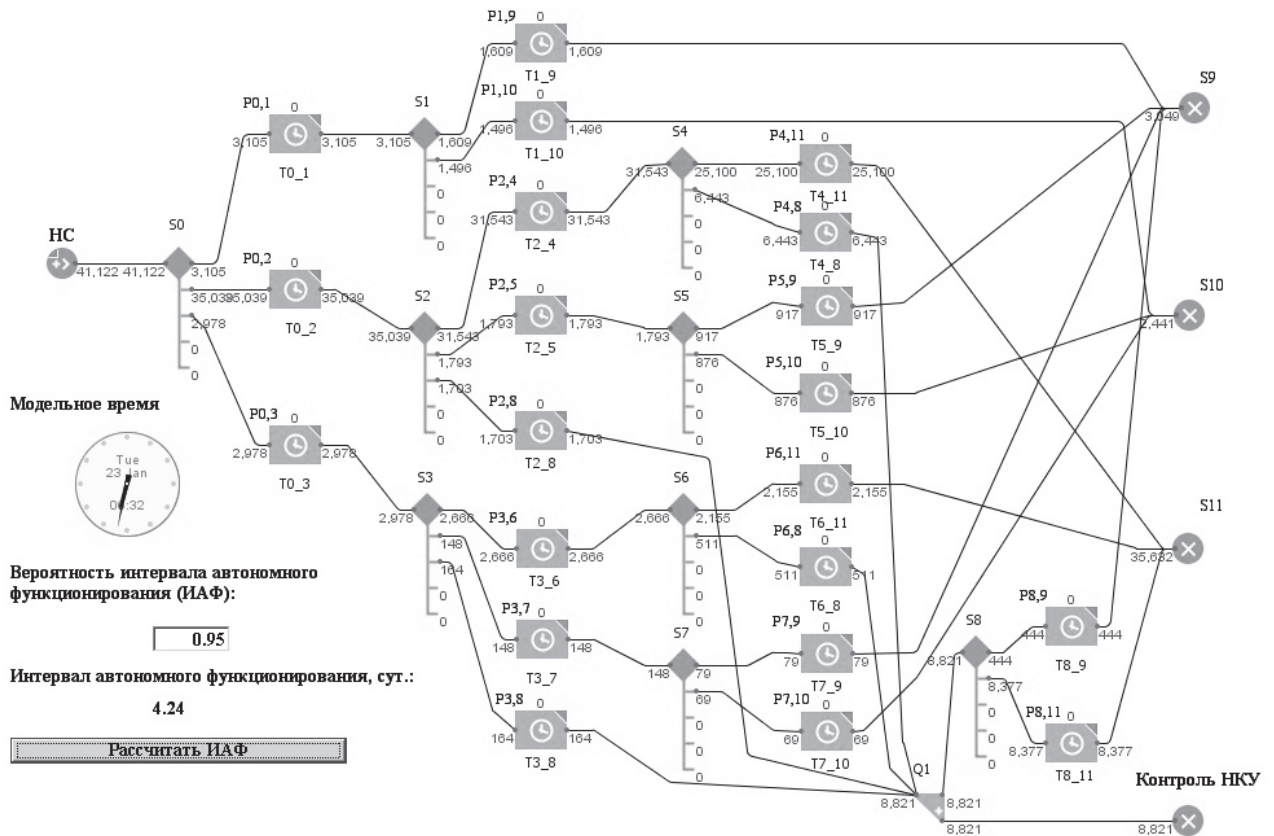


Рис. 2. Отображение имитационной модели в среде AnyLogic

бортовых средств: $D_1 = P_{0,2} P_{2,4}$, а вероятность правильного обнаружения НС и диагностирования БА при углубленном анализе ее ТС средствами наземного сегмента СИТО $P_{8,11}$ – в качестве показателя достоверности диагностирования с использованием наземных средств: $D_2 = P_{8,11}$. На вход модели поступает простейший поток заявок с интенсивностью λ , имитирующих НС и порождающих события, распространяющиеся в модели от состояния к состоянию. В результате обработки каждой заявки система попадает в одно из поглощающих состояний S_9 , S_{10} или S_{11} . Все процессы в модели синхронизированы, а их длительность определяется модельным временем. В модель включен набор правил, определяющих изменения характеристик потока отказов и привязанных к соответствующим переходам между состояниями. В начальный момент времени интенсивность отказов принимает значение $\lambda(1) = \lambda_{c,=}(1)$ в соответствии с выражением (1) или (2) для $k=1$, а остальные параметры – значения согласно техническому описанию и знаниям экспертов. Далее, в зависимости от направления распространения заявки в модели, осуществляется изменение интенсивности отказов следующим образом:

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \lambda(k) + d\lambda_{c,+}(k) & S_0 \rightarrow S_9, S_0, d\lambda_{c,+}(k) = \varphi(k) \\ \lambda(k) & S_0 \rightarrow S_1, \\ \lambda_{c,=}(k) & S_8 \rightarrow S_1, \lambda_{c,=}(k) = f(k) \end{cases} \quad (3)$$

где $d\lambda_{c,+}(k)$, $\lambda_{c,=}(k)$, $\varphi(k)$, $f(k)$ – параметры и функции, определяемые в соответствии с (1) или (2), в зависимости от этапа эксплуатации (приработки или нормальной эксплуатации БА КА); k – номер отказа БА КА (заявки). При этом необходимо учитывать, что на этапе приработки БА КА значение k меняется циклически от 1 до 22. При достижении состояния S_8 фиксируется время обращения к наземному сегменту СИТО $t_b(j)$ и вычисляется интервал времени между

обращениями $T_A(j)$: $T_A(j) = t_a(j) - t_a(j-1) - T_A(j)$ где $t_b(j)$, $t_b(j-1)$ – модельное время двух последовательных обращений к наземному сегменту СИТО, $T_D(j)$ – время диагностирования БА КА средствами наземного сегмента СИТО, j – номер обращения. При этом $T_D(j) = T_{8,11}(j)$ – при правильном обнаружении НС и восстановлении работоспособного состояния БА; $T_D(j) = T_{8,9}(j)$ – при необнаружении НС и невозможности восстановления работоспособного состояния БА. Накопив статистику значений величины $T_A(j)$ по результатам множества экспериментов, можно построить функцию плотности вероятности ее распределения и оценить значение интервала автономного функционирования КА \hat{T}_A гарантированно достигаемого с заданной вероятностью P_A , а также периодичность контроля ТС и диагностирования БА КА с использованием средств наземного сегмента СИТО, определяемую временным интервалом $T_k : T_k = \hat{T}_A | P(T_A(j) \geq \hat{T}_A) = P_A$. Вероятность P_A – вероятность того, что на интервале времени от 0 до \hat{T}_A не произойдет «тяжелых» отказов и задействования средств наземного сегмента СИТО для контроля ТС и диагностирования БА КА.

Разработанная модель обладает новизной в части совмещения дискретно-событийного подхода к имитационному моделированию процесса диагностирования БА и оригинальных аналитических выражений для описания изменений интенсивности потока отказов на борту КА.

Результаты моделирования

Имитационное моделирование проводилось для исходных данных, соответствующих эксплуатационно-техническим характеристикам КА «Ресурс-ДК1», а также имеющимся экспертным оценкам [1]. Задавались: вероятность $P_A = 0,95$, параметры средств диагностирования $P_{0,2}$, $P_{2,4}$, $P_{8,11}$, остальные элементы $P_{q,r}$ и $T_{q,r}$. На входе модели формировалось более 40000 НС. По результатам экспериментов оценивалось значение требуемой периодичности диагностирования T_k . На рис. 3, а представлены сглаженные графики зависимостей величины T_k от достоверности автономного диагностирования БА D_1 при различной достоверности внешнего диагностирования: высокой ($D_2 = 1$, кривая 1), средней ($D_2 = 0,75$, кривая 2), низкой ($D_2 = 0,1$, кривая 3) для этапа приработки БА КА. На рис. 3, б представлены сглаженные графики зависимостей $T_k(D_1)$, полученные при достоверности внешнего диагностирования ($D_2 = 1$) для этапа нормальной эксплуатации (кривая 1) и этапа приработки БА КА (кривая 2).

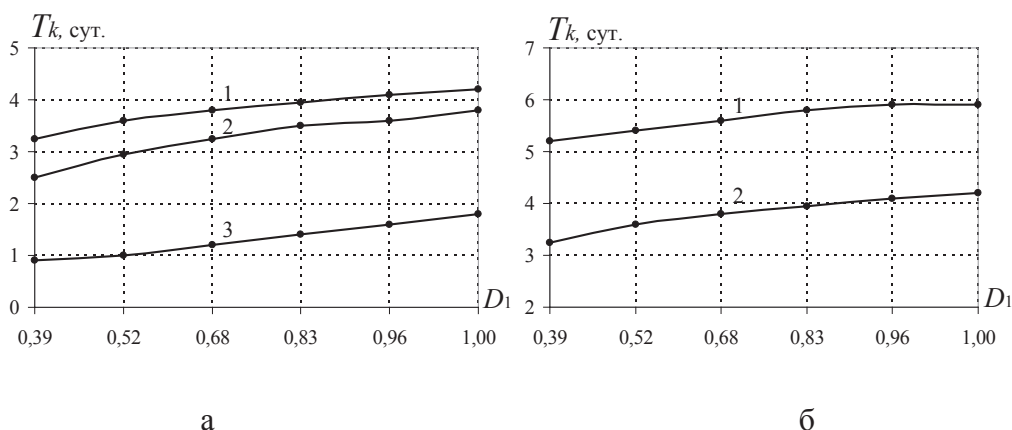


Рис. 3. Зависимости периодичности внешнего диагностирования БА от достоверности автономного диагностирования: а – на этапе приработки БА при различной достоверности внешнего диагностирования; б – на различных этапах эксплуатации при фиксированной достоверности внешнего диагностирования

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

а) для зависимостей $T_k(D_1)$ характерен степенной рост – при высоких значениях D_2 и экспоненциальный рост – при низких значениях D_2 , что свидетельствует о значимости наземного сегмента СИТО для диагностирования КА и парирования НС;

б) увеличение достоверности автономного и внешнего диагностирования позволяет уменьшить периодичность контроля ТС и диагностирования БА наземными средствами (увеличить T_k), причем на этапе приработки БА внешний контроль необходимо осуществлять чаще, чем на этапе нормальной эксплуатации;

в) полученные зависимости имеют практическое значение для планирования внешнего контроля ТС и диагностирования БА при управлении автоматическими КА;

г) для снижения последствий негативного развития НС и повышения отказоустойчивости БА необходимо увеличивать достоверность бортовых средств диагностирования и периодически проводить углубленный анализ ТС КА с использованием наземных средств.

Литература

1. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Сологуб А.Н., Макаров В. П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. М.:Машиностроение, 2010. 384 с.
2. Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 34 –43.
3. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6 // AnyLogic North America. 2013. 612 p.