

Г.Н. МАЛЫЦЕВ, А.В. НАЗАРОВ, В.Л. ЯКИМОВ  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

---

*Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели.*

**Аннотация.** Рассмотрены особенности функционирования космических аппаратов с высоким уровнем автономности как объектов технического диагностирования. Полагается, что бортовые средства контроля и диагностирования функционируют автономно и обращаются к наземным средствам только при невозможности решить задачи распознавания нештатных ситуаций и восстановления работоспособного состояния бортовой аппаратуры. Процесс диагностирования бортовой аппаратуры описывается с помощью графа состояний, учитывающего особенности обнаружения нештатных ситуаций бортовыми и наземными средствами. Разработанная имитационная модель позволяет учитывать накопление последствий отказов бортовой аппаратуры вследствие воздействия факторов внешней среды ближнего космоса и изменение интенсивности их возникновения. Представлены результаты имитационного моделирования процесса диагностирования космических аппаратов совместно бортовыми и наземными средствами системы информационно-телеметрического обеспечения. Показана важность наземного сегмента системы информационно-телеметрического обеспечения управления космических аппаратов при проведении плано-периодического углубленного анализа их технического состояния. По результатам имитационного моделирования проведен анализ влияния достоверности диагностирования бортовой аппаратуры на уровень автономности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

**Ключевые слова:** космический аппарат, автономное функционирование, бортовая аппаратура, техническое состояние, диагностирование.

---

**1. Введение.** Диагностирование технического состояния (ТС) космических аппаратов (КА), как сложных технических систем, является составной частью информационно-телеметрического обеспечения управления КА и направлено на поддержку высокого уровня их эксплуатационной надежности в полете [1-3]. Реализация диагностирования и восстановления работоспособности бортовой аппаратуры (БА) КА преимущественно бортовыми средствами является современной тенденцией развития системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) и непосредственно связана с повышением уровня автономности функционирования КА [3-5]. Очевидно, что с расширением возможностей бортовых средств диагностирования по выявлению нештатных ситуаций (НС) и их парированию будет увеличиваться время автономного функционирования КА. В то же время возможности наземного сегмента СИТО при решении задач контроля ТС и диагностирования БА КА объективно гораздо шире, чем

возможности бортового сегмента СИТО. Отсюда следует взаимосвязь достоверности диагностирования БА с длительностью интервала автономного функционирования КА и задача рационального распределения функций между наземными и бортовыми средствами по контролю ТС и диагностированию БА КА с высоким уровнем автономности функционирования. Представленные в статье результаты демонстрируют важность наземного сегмента СИТО для проведения планово-периодического углубленного анализа ТС БА КА с высоким уровнем автономности. В дальнейшем изложении под диагностированием БА будем понимать процесс распознавания НС и определения причины ее возникновения средствами бортового и наземного сегментов СИТО, реализуемый по результатам контроля ТС КА. Для исследования процессов функционирования сложных технических систем, в том числе КА, в настоящее время широкое распространение получили методы имитационного моделирования [6-12]. Достаточно подробно вопросы моделирования систем диагностирования сложных технических объектов рассмотрены в [9, 13]. Отличительными особенностями представленными в статье результатов являются: реализация дискретно-событийного подхода для имитационного моделирования процессов диагностирования КА с высоким уровнем автономности функционирования в наземном и бортовом сегментах СИТО управления КА; рассмотрение влияния характеристик бортовых и наземных средств контроля ТС и диагностирования БА на интервал надежного автономного функционирования и автономность КА; разработка новых достаточно общих динамических моделей развития НС в БА для различных этапов эксплуатации КА.

**2. Анализ космических аппаратов с высоким уровнем автономности как объектов технического диагностирования.** Применительно к автоматическим (непилотируемым) КА понятие автономности можно сформулировать как способность КА и его бортового комплекса управления (БКУ) к самостоятельному функционированию и выполнению полетных операций без информационного взаимодействия с наземным комплексом управления (НКУ). Автономность характеризуется различными уровнями и зависит, прежде всего, от функциональных возможностей БКУ, выполняющего в части информационно-телеметрического обеспечения управления КА функции бортового сегмента СИТО. При этом вводится понятие интервала автономного функционирования КА как интервала времени, в течение которого КА может функционировать без информационного взаимодействия с НКУ [14].

Вопросы функционирования существующей СИТО управления КА достаточно подробно рассмотрены в [1, 3, 15, 16]. Анализ данных источников показал, что для КА с высоким уровнем автономности

функционирования, как объектов технического диагностирования, можно выделить ряд особенностей (таблица 1).

Таблица 1. Особенности КА с различным уровнем автономности как объектов диагностирования

КА с высоким уровнем автономности	КА с низким уровнем автономности
Интервал автономного функционирования КА – несколько суток.	Интервал автономного функционирования КА – менее суток.
Обеспечивается высокая надежность КА и предъявляются требования ГОСТ к отсутствию развития последствий отказов БА.	Требования к высокой надежности КА и отсутствию развития последствий отказов БА не столь высоки.
Реализуются принципы физического и программного комплексирования бортовых средств и программного управления бортовыми системами, что позволяет отказаться от дополнительной контролирующей аппаратуры на борту.	Принципы физического и программного комплексирования бортовых средств, а также программного управления бортовыми системами реализуются не всегда.
Уменьшение объема телеметрической информации (ТМИ), передаваемой с КА в НКУ в штатном режиме функционирования.	В НКУ по возможности передается полный поток ТМИ.
Нахождение КА в частично работоспособном состоянии (ЧРС) в период автономного функционирования является допустимым.	Нахождение КА в ЧРС в период автономного функционирования является недопустимым.
Задачи контроля ТС и диагностирования БА преимущественно решаются с использованием бортовых средств, а при «тяжелых» отказах – с использованием средств НКУ.	Все задачи контроля ТС и диагностирования БА решаются с использованием средств НКУ.
Выполнение БКУ и НКУ широкого перечня функций по восстановлению работоспособности БА путем автономного управления переключением резервных комплектов и режимами работы БА.	Парирование отказов и восстановление работоспособности БА осуществляется только с использованием средств НКУ путем радиуправления переключением резервных комплектов и режимами работы БА.
Парирование отказов в НКУ путем коррекции программ функционирования и управления БА, программы телеизмерений, эксплуатационной документации.	
Расширенный состав моделей и методов в бортовых средствах диагностирования КА.	Использование в средствах диагностирования НКУ классических методов допускового контроля и тестирования БА.
Существенная необходимость проведения плано-периодического углубленного анализа ТС БА с использованием средств НКУ.	Необходимость проведения углубленного анализа ТС БА с использованием средств НКУ не существенна.

Диагностирование автономных КА с использованием средств НКУ осуществляется как в целях профилактики по выходу КА из режима автономного функционирования, так и при возникновении «тяжелых» отказов на борту КА [3]. Под «тяжелым» отказом понимается НС, для парирования которой необходимо задействовать средства диагностирования и управления НКУ. Сложность таких НС проявляется в трудности их распознавания при отсутствии в перечне рассмотренных в эксплуатационно-технической документации НС, а также в трудности их парирования и восстановления работоспособности средствами БКУ. При обнаружении «тяжелых» отказов обычно осуществляется автоматический перевод КА в специальный режим работы — неориентированный полет, в котором отсутствует риск негативного развития НС [3].

В ряде случаев НС предусматриваются эксплуатационно-технической документацией на КА и средства НКУ. При этом КА может находиться в ЧРС, в котором он способен выполнять функциональные задачи по предназначению с допустимыми ограничениями [17]. Учет ЧРС имеет важное значение при диагностировании БА КА с высоким уровнем автономности функционирования. Увеличение числа разрешенных ЧРС — одна из возможностей увеличить интервал автономного функционирования и повысить автономность КА. При этом формирование множества ЧРС представляет собой отдельную задачу, требующую индивидуального подхода для каждого типа КА.

Отказы БА обладают различной критичностью и, как правило, приводят к различным последствиям на борту КА. Кроме того, при проектировании сложных технических систем, в том числе КА, не всегда удается обеспечить отсутствие негативного развития НС, особенно при воздействии различных неучтенных факторов, в том числе внешней среды [18]. В таблице 2 представлена классификация НС, имевших место на практике при эксплуатации КА с высоким уровнем автономности, и показано их возможное влияние на показатель надежности БА КА — интенсивность потока отказов  $\lambda$  — с учетом возможностей наземных и бортовых средств СИТО. На основе сведений из таблицы 2 и имеющихся статистических данных о НС на борту реального КА уточним закономерности изменения интенсивности потока отказов БА. Для этого рассмотрим зависимость во времени суточной интенсивности потока отказов КА «Ресурс-ДК1» за период, равный 2.5 года летной эксплуатации, в течение которого произошло 29 отказов, в том числе 7 «тяжелых» [3]. На рисунке 1 представлены построенные по экспериментальным статистическим данным зависимости, характеризующие суточную интенсивность отказов БА за время летной эксплуатации КА [3]. Суммарная зависимость (кривая 1) может быть представлена как совокупность низкочастотного тренда (кривая 2) и высокочастотной составляющей (кривая 3). Кривая 4 соответствует участкам, на которых наблюдались «тяжелые» отказы.

Таблица 2. Влияние средств СИТО на характеристики потока отказов БА КА с высоким уровнем автономности

Тип НС		Действия по устранению НС и ее последствий	Задействованные средства СИТО		Влияние НС на $\lambda$	
			Бортовые	Наземные		
Неустраняемые НС		Внесение ограничений на целевое применение БА по назначению.		+	Уменьшение $\lambda$	
Парированные НС		Структурное резервирование БА.	+	+	$\lambda = \text{const}$	
		Повторное выполнение операций.	+	+		
		Перезапуск системы из «контрольных точек».	+	+		
		Срабатывание бортовых устройств защиты и автоматики.	+			
		Коррекция программ функционирования и управления БА, специального программного обеспечения БА, программы телеизмерений, эксплуат. документации в процессе летной эксплуатации.			+	Уменьшение $\lambda$
		Допущение ЧРС БА.	+			Увеличение $\lambda$
Функциональное резервирование БА.			+			
Другие НС	Пропущенные и неправильно распознанные на борту НС, самоустраняющиеся отказы и сбои.	Возможны любые перечисленные действия по результатам детального анализа НС.		+	$\lambda = \text{const}$	

Первоначальный рост низкочастотной составляющей суточной интенсивности отказов связан с приработкой изделия. Далее значение суточной интенсивности отказов уменьшается и достигает некоторого установившегося значения. Этап износа изделия приведенные зависимости не

охватывают. Низкочастотный тренд (кривая 2) характеризует «желаемую» для данного КА зависимость интенсивности отказов БА от номера отказа в условиях отсутствия воздействия факторов внешней среды и негативного развития НС. Анализ высокочастотной составляющей показывает, что в начале летной эксплуатации высока вероятность негативного развития НС на борту КА и возникновения зависимых отказов, что сопровождается увеличением интенсивности отказов на борту КА. С течением времени эксплуатации количество зависимых отказов БА КА уменьшается, а количество случайных отказов — возрастает.

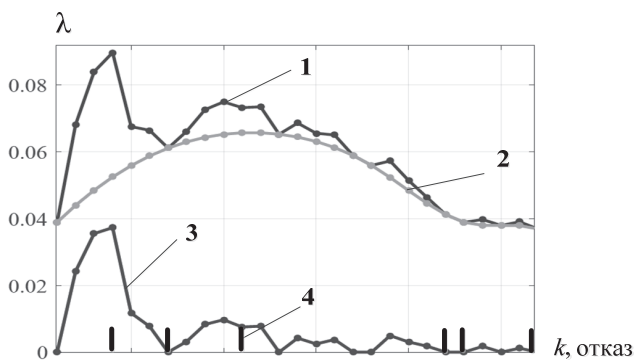


Рис. 1. Зависимости: суточной интенсивности отказов от номера отказа за время летной эксплуатации КА (кривая 1), низкочастотного тренда данной зависимости (кривая 2), высокочастотных изменений данной зависимости (кривая 3), участки, соответствующие «тяжелым отказам» (кривая 4)

На рисунке 2 приведены зависимости положительных (кривая 1) и отрицательных (кривая 2) приращений суточной интенсивности отказов БА за время летной эксплуатации КА, ступенчатой (кривая 3) и гладкой (кривая 4) аппроксимирующих функций этих зависимостей, а также участки, соответствующие «тяжелым» отказам (кривая 5). Из представленных данных видно, что приращения суточной интенсивности отказов могут быть положительными, отрицательными и близкими к нулю. Уровень положительных приращений суточной интенсивности отказов с течением времени уменьшается, причем, для зависимых отказов характерно уменьшение приращения  $d\lambda$  от отказа к отказу. Подобное поведение закладывается на этапе проектирования КА с целью обеспечения их устойчивости к воздействию отказов БА. Средние значения положительных приращений суточной интенсивности отказов можно аппроксимировать ступенчатой или гладкой функцией (кривые 3 и 4). Зна-

чительные отрицательные приращения суточной интенсивности отказов коррелируют с интервалами времени нахождения КА в режиме неориентированного полета и взаимодействия с НКУ следующим образом: значение суточной интенсивности отказов в окрестности этих участков уменьшается до уровня низкочастотного тренда, иногда с небольшим запаздыванием. Особенно это характерно для этапа приработки КА. Последнюю зависимость совместно характеризуют кривая 4 на рисунке 1 и кривая 5 на рисунке 2.

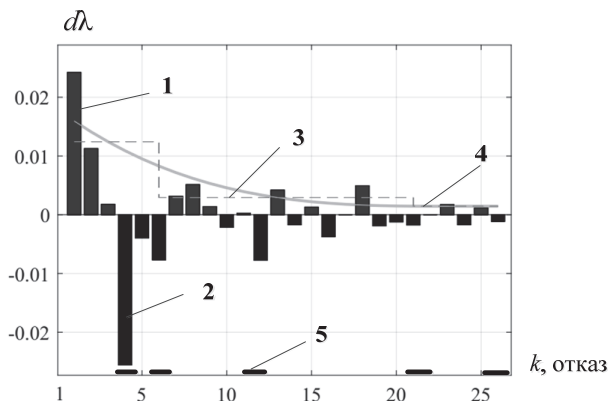


Рис. 2. Зависимости: положительных (кривая 1) и отрицательных (кривая 2) приращений суточной интенсивности отказов от номера отказа за время летной эксплуатации, ступенчатой (кривая 3) и гладкой (кривая 4) аппроксимирующих функций, а также участки, соответствующие «тяжелым отказам» (кривая 5)

Незначительные отрицательные, а также нулевые приращения интенсивности отказов (кривая 2), можно связать с работой бортовых средств диагностирования БА и восстановления ее работоспособного состояния при возникновении НС на борту КА.

Для рассмотренного примера математические зависимости, аппроксимирующие тренд  $\lambda_{c,=}(k)$  (рисунок 1, кривая 2) и изменения значений положительных приращений суточной интенсивности отказов  $d\lambda_{c,+}(k)$  (рисунок 2, кривая 4) на этапе приработки имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{c,=}(k) &= 3,06 * 10^{-2} + 9 * 10^{-3} k - 1,3 * 10^{-3} k^2 + 1,5 * 10^{-4} k^3 - 10^{-5} k^4 + \\ &+ 3 * 10^{-7} k^5 - 3,3 * 10^{-9} k^6, \\ d\lambda_{c,+}(k) &= 1,8 * 10^{-2} - 2,1 * 10^{-3} k + 9 * 10^{-5} k^2 - 10^{-6} k^3, \quad k \in [1, 22], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $k$  — номер отказа БА КА.

Для установившегося режима на этапе нормальной эксплуатации для оценки значений  $\lambda_{c,=}(k)$  и  $d\lambda_{c,+}(k)$  можно использовать следующие выражения:

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

Выявленные закономерности, а также выражения (1) и (2) предлагается положить в основу модели развития отказов БА КА.

Анализ данных, представленных в таблицах 1 и 2, а также рассмотренных экспериментальных статистических данных об отказах БА КА, позволяет сделать вывод о более широких возможностях парирования НС бортовыми и наземными средствами СИТО и оказания тем самым влияния на параметры потока отказов БА при управлении КА с высоким уровнем автономности в сравнении с управлением КА с низким уровнем автономности. При этом задача диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности в НКУ в целях профилактики по выходу из режима автономного функционирования или при отработке «тяжелых» отказов видится более сложной и имеющей большую степень неопределенности.

**3. Формализация процесса диагностирования КА с высоким уровнем автономности функционирования.** Согласно требованиям современных стандартов, средства контроля и диагностики сложных технических систем должны строиться на основе открытой модульной архитектуры и включать в свой состав модули (подсистемы) сбора информации, контроля и диагностирования ТС [19]. Модуль сбора информации обеспечивает сбор данных о параметрах технической системы, по которым проводится контроль ее ТС и диагностирование. Модуль контроля ТС осуществляет сравнение значений контролируемых параметров со значениями допусков и формирует сигнал оповещения при превышении соответствующих границ. Модуль диагностирования использует экспертные правила и вычислительные процедуры для определения текущего состояния диагностируемой системы и выявления возможных неисправностей [19].

В структуре СИТО автономный контроль ТС и диагностирование БА КА реализуется БКУ, использующим возможности бортовой информационно-телеметрической системы, датчиковой аппаратуры и встроенных средств контроля ТС [3]. Своевременно выявленные на борту КА неисправности могут быть устранены полностью или частично путем реализации процедур восстановления работоспособности БА, приведенных в таблице 2. При неблагоприятных условиях пропуски неисправностей и/или их недостоверное распознавание могут привести к увеличению интенсивности потока отказов, росту неопределенности значений параметров ТС, снижению достоверности контроля ТС и процедур поиска мест и



причин неисправностей [17]. Развитие технологий автономного диагностирования БА КА бортовыми средствами является одним из ключевых вопросов создания перспективных комплексов управления КА [20]. Однако с учетом того, что средства наземного сегмента СИТО обладают более широкими возможностями по решению задач диагностирования и управления ТС БА, чем бортовые средства, при создании КА с высоким уровнем автономности функционирования предусмотрено периодическое взаимодействие последних с НКУ с целью проведения углубленного анализа ТС БА. Положительный практический опыт реализации подобного контроля в целях профилактики НС на борту сложных аэрокосмических объектов имеется, например, за рубежом [21].

Рассмотрим организацию процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности функционирования [3]. На рисунке 3 представлена функциональная схема процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности с использованием наземных и бортовых средств СИТО.

Средства НКУ управляют ТС и целевым функционированием КА, а также входят в подсистему контроля ТС и диагностирования БА наземного сегмента СИТО. На схеме подробно выделены модули бортовой подсистемы контроля ТС и диагностирования БА бортового сегмента СИТО, принимаемые ими решения и результирующие состояния штатного и нештатного функционирования БА. Нештатные ситуации обнаруживаются в процессе контроля ТС БА. На практике при проведении контроля ТС БА существует необходимость не только в определении ее работоспособности, но и в соотнесении ее неработоспособного состояния к множеству известных НС [1]. Кроме того, в результате НС БА может оказаться в ЧРС. В соответствии с приведенной функциональной схемой процесса диагностирования БА КА бортовыми средствами контроля ТС и диагностирования БА непрерывно осуществляется решение следующих задач: 1) контроль ТС БА; 2) в случае принятия решения о НС функционирования БА — перевод КА в специальный режим работы, в котором риск развития негативных последствий отказов минимален; 3) распознавание НС функционирования БА и локализация неисправности; 4) восстановление работоспособного состояния БА.

Работу модуля контроля ТС БА характеризуют следующие три выходные реакции: правильное обнаружение НС, пропуск НС и ложное обнаружение НС. В последнем случае модулем контроля ТС принимается решение о НС, хотя БА КА находится в ЧРС. Еще одним возможным результатом контроля ТС является правильное необнаружение НС (правильное обнаружение ЧРС). Однако вероятностью этой выходной реакции можно пренебречь, что вызвано следующими причинами.

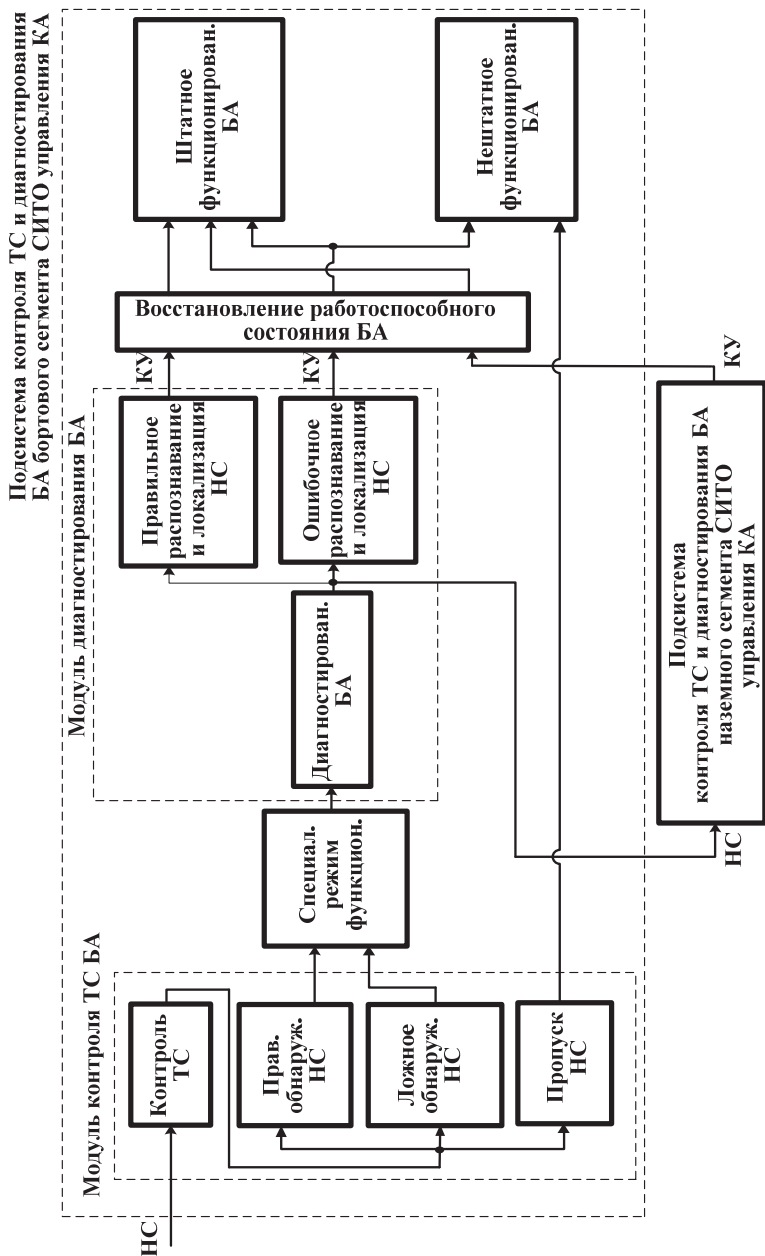


Рис. 3. Функциональная схема процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности функционирования

Во-первых, контролируемые параметры в ЧРС имеют значения, близкие к предельно допустимым, в гораздо большей степени соответствующие НС, чем работоспособному состоянию. Во-вторых, существенное пересечение множества ЧРС в пространстве контролируемых параметров между собой и по отношению к множеству НС не позволяют с высокой достоверностью решить задачу их оперативного обнаружения в модуле контроля ТС БА. При этом количество возможных ЧРС значительно больше, чем рассмотренных НС, что усугубляет проблему их обнаружения с заданной достоверностью. Как следствие, на модуль контроля ТС БА нецелесообразно возлагать функцию обнаружения ЧРС БА. В то же время частичная работоспособность БА или ошибка определения класса НС могут быть выявлены на этапе диагностирования, что требует учета выходной реакции ложного обнаружения НС, как это показано на функциональной схеме процесса диагностирования БА КА.

После решения задачи обнаружения НС начинается процесс диагностирования БА с использованием бортовых средств, в ходе которого осуществляется распознавание НС и локализация неисправности, а также оценка работоспособности БА в ЧРС. Работу модуля диагностирования БА характеризуют выходные реакции правильной или ошибочного распознавания и локализации НС. При невозможности решить задачи распознавания НС и восстановления работоспособного состояния БА бортовыми средствами, восстановление ее работоспособного состояния осуществляется после планового или инициируемого бортовыми средствами обращения к наземному сегменту СИТО. Такое обращение, как правило, происходит при обнаружении серьезных («тяжелых») отказов, вероятность возникновения которых гораздо ниже и для устранения которых возможностей бортовых средств диагностирования недостаточно. На практике количество таких «тяжелых» отказов часто соответствует правилу Парето и составляет порядка 20% от их общего количества [3]. Восстановление работоспособности БА средствами НКУ осуществляется путем выдачи различных управляющих воздействий — команд управления (КУ).

Функциональная схема на рисунке 3 отражает вопросы парирования не только аппаратных отказов, но и НС, обусловленных некорректной работой специального программного обеспечения, в том числе встроенного в БА КА. Следует отметить важную роль встроенных средств самодиагностики БА, позволяющих оценить ее ТС и сигнализировать как об аппаратных отказах, так и ошибках в работе специального программного обеспечения БА. При этом основную роль выполняет БКУ, осуществляющий парирование таких НС путем перезагрузки соответствующих модулей БА или всей системы из заданных «контрольных точек»,

соответствующих последнему работоспособному состоянию, а также путем переключения неисправных комплектов БА на резервные. Средства НКУ привлекаются в случае «тяжелых» ситуаций, связанных с ошибками, допущенными на этапе разработки программного обеспечения, как для переключения резервных комплектов БА, так и перезагрузки специального программного обеспечения на борту КА. Следует отметить, что в НКУ сообщения об аппаратных отказах и ошибках в работе программного обеспечения, в том числе встроенного в БА, рассматриваются как единый поток НС, так как результатом таких НС является неработоспособное состояние БА. При этом рассмотренная на рисунке 3 функциональная схема направлена как на повышение отказоустойчивости аппаратной части, так и повышение надежности специального программного обеспечения БА КА. Основное отличие данной функциональной схемы для КА с низким уровнем автономности будет заключаться в отсутствии бортового сегмента СИТО управления КА и перераспределении функций контроля ТС и диагностирования БА КА на средства НКУ.

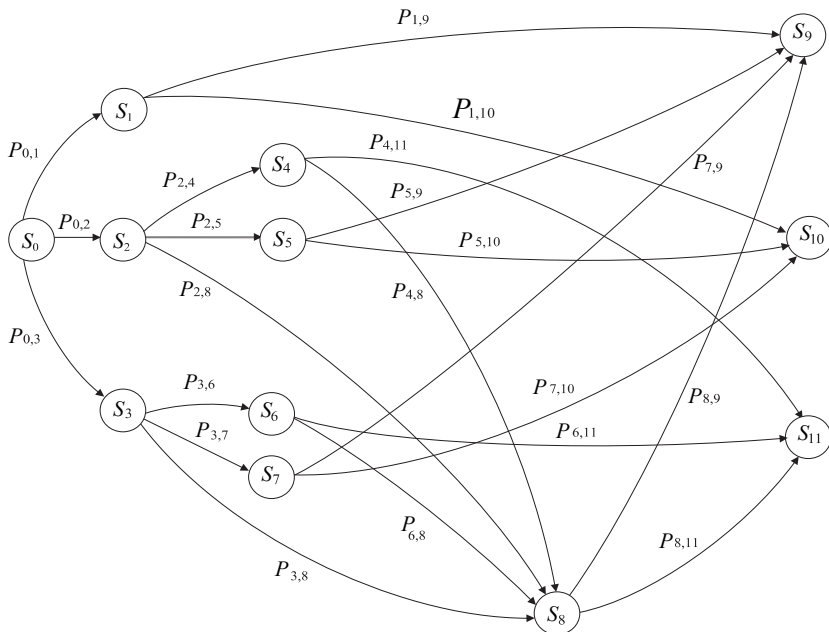


Рис. 4. Граф состояний процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности функционирования

Функциональной схеме процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности, приведенной на рисунке 3, соответствует граф состояний, представленный на рисунке 4. Число текущих состояний графа, образующих множество  $S=(S_0, S_1, S_2, \dots, S_{11})$ , определяется логикой и уровнем описания процесса диагностирования БА КА при возникновении НС. Интенсивности переходов между состояниями определяются вероятностными и временными характеристиками соответствующих процессов контроля ТС и диагностирования БА КА.

Исходным состоянием графа является состояние  $S_0$ , соответствующее воздействию НС на БА КА, находящуюся в работоспособном состоянии, ТС которой контролируется бортовой подсистемой контроля ТС и диагностирования БА.

Работу бортовой подсистемы контроля ТС и диагностирования БА характеризуют следующие текущие состояния:

$S_1$  — контроль ТС системы проведен, имеет место пропуск НС;

$S_2$  — контроль ТС проведен, НС правильно обнаружена, осуществляется переход в специальный режим работы и распознавание правильно обнаруженной НС;

$S_3$  — контроль ТС проведен, имеет место ложное обнаружение НС, осуществляется переход в специальный режим работы и распознавание ложно обнаруженной НС;

$S_4$  — НС правильно обнаружена, в результате диагностирования распознавание НС выполнено правильно, реализуется правильная процедура восстановления работоспособности БА;

$S_5$  — НС правильно обнаружена, в результате диагностирования распознавание НС выполнено неправильно, реализуется неправильная процедура восстановления работоспособности БА;

$S_6$  — имеет место ложное обнаружение НС, но в результате диагностирования распознавание НС выполнено правильно, реализуется правильная процедура восстановления работоспособности БА;

$S_7$  — имеет место ложное обнаружение НС, в результате диагностирования распознавание НС выполнено неправильно, реализуется неправильная процедура восстановления работоспособности БА.

Работу подсистемы контроля ТС и диагностирования БА наземного сегмента СИТО характеризует состояние  $S_8$ , соответствующее обращению КА к НКУ после правильного или ложного обнаружения НС и выполнению контроля ТС и диагностированию БА средствами наземного сегмента СИТО.

Состояния  $S_9, S_{10}, S_{11}$  являются поглощающими и характеризуют следующие состояния БА КА:

$S_9$  — БА КА находится в неработоспособном состоянии вследствие пропуска НС и невыполнения бортовыми средствами и средствами наземного сегмента СИТО процедур восстановления работоспособного состояния БА;

$S_{10}$  — БА КА находится в ЧРС и способна выполнять задачи по функциональному предназначению с ограничениями вследствие некорректности НС к правильности выполнения бортовыми средствами процедур восстановления работоспособности БА;

$S_{11}$  — БА КА находится в работоспособном состоянии благодаря работе бортовых и наземных средств диагностирования и выполнению после обнаружения НС правильных процедур восстановления работоспособного состояния БА.

Полагается, что наземный сегмент СИТО, обладающий более широкими функциональными возможностями диагностирования, чем бортовая подсистема контроля ТС и диагностирования БА, при правильном обнаружении НС осуществляет локализацию неисправности и восстановление работоспособного состояния БА в результате формирования соответствующих КУ. Если же НС не обнаружена средствами диагностирования наземного сегмента СИТО, то возможность восстановления работоспособного состояния БА КА отсутствует.

Переходы между состояниями описываются вероятностями  $P_{q,r}$  перехода из текущего состояния  $q$  в состояние  $r$ . Вероятности  $P_{q,r}$  образуют матрицу вероятностей переходов  $\mathbf{P}$ :  $P_{q,r} \in \mathbf{P}$ . В рассматриваемом случае матрица  $\mathbf{P}$  имеет размерность  $11 \times 9$ . Нулевые значения элементов матрицы  $\mathbf{P}$  соответствуют отсутствию переходов между соответствующими состояниями. Для графа состояний, приведенного на рисунке 4,  $q = 0 \dots 8, r = 1 \dots 11$ , матрица переходов имеет следующий вид:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{0,1} & P_{0,2} & P_{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1,9} & P_{1,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{2,4} & P_{2,5} & 0 & 0 & P_{2,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{3,6} & P_{3,7} & P_{3,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{4,8} & 0 & 0 & P_{4,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5,9} & P_{5,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{6,8} & 0 & 0 & P_{6,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7,9} & P_{7,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{8,9} & 0 & P_{8,11} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Все указанные вероятности можно свести в 4 группы, характеризующие уровни обработки диагностической информации о НС. Первый уровень отвечает за оперативный контроль ТС БА КА с использованием бортовых средств и характеризуется вероятностями:

$P_{0,1}$  — пропуска НС;  $P_{0,2}$  — правильного обнаружения НС;  $P_{0,3}$  — ложного обнаружения НС. Второй уровень отвечает за распознавание НС в БА КА и локализацию неисправности с использованием бортовых средств диагностирования и характеризуется вероятностями:  $P_{2,4}$  — правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС;  $P_{2,5}$  — ошибочного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС;  $P_{3,6}$  — правильного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС;  $P_{3,7}$  — ошибочного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС;  $P_{2,8}$ ,  $P_{3,8}$  — обращения к наземному сегменту СИТО после правильного или ложного обнаружения НС соответственно при наличии значительной неопределенности в значениях контролируемых параметров, не позволяющей задействовать бортовые средства диагностирования БА КА. Третий уровень отвечает за восстановление работоспособности БА КА и характеризуется вероятностями:  $P_{1,9}$ ,  $P_{1,10}$  — перехода БА в неработоспособное состояние и ЧРС соответственно в результате пропуска НС;  $P_{4,11}$ ,  $P_{6,11}$  — восстановления работоспособности БА с использованием бортовых средств диагностирования после правильного или ложного обнаружения НС соответственно;  $P_{4,8}$ ,  $P_{6,8}$  — обращения к наземному сегменту СИТО после правильного или ложного обнаружения НС соответственно, вследствие невозможности восстановить работоспособность БА бортовыми средствами (случай «тяжелых» отказов);  $P_{5,9}$ ,  $P_{7,9}$  — перехода БА в неработоспособное состояние вследствие неправильного диагностирования НС и реализации неправильных процедур восстановления работоспособности БА после правильного или ложного обнаружения НС соответственно;  $P_{5,10}$ ,  $P_{7,10}$  — перехода БА в ЧРС после неправильного диагностирования НС и реализации неправильных процедур восстановления работоспособности БА вследствие не критичности НС к правильности выполнения бортовыми средствами процедур восстановления работоспособности БА после правильного или ложного обнаружения НС соответственно. Четвертый уровень отвечает за контроль ТС БА с использованием наземного сегмента СИТО и характеризуется вероятностями:  $P_{8,9}$  — не обнаружения НС в БА при углубленном анализе ее ТС средствами наземного сегмента СИТО;  $P_{8,11}$  — 90-5+ — правильного обнаружения НС и диагностирования БА при углубленном анализе ее ТС средствами наземного сегмента СИТО.

На основе принятых допущений о характере ЧРС БА можно полагать, что вероятность правильного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС  $P_{3,6}$  меньше, чем вероятность правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС  $P_{2,4}$ :  $P_{3,6} < P_{2,4}$ . Также можно полагать, что при пропуске НС, ложном обнаружении НС, ошибочном распознавании и локализации неисправностей вероятность перехода системы в неработоспособное состояние выше, чем в ЧРС:  $P_{1,10} < P_{1,9}$ ,  $P_{5,10} < P_{5,9}$ ,  $P_{7,10} < P_{7,9}$ . Вероятности переходов для всех состояний, кроме поглощающих, образуют полную группу событий:  $P_{0,1} + P_{0,2} + P_{0,3} = 1$ ,  $P_{1,9} + P_{1,10} = 1$ ,  $P_{2,4} + P_{2,5} + P_{2,8} = 1$ ,  $P_{3,6} + P_{3,7} + P_{3,8} = 1$ ,  $P_{4,8} + P_{4,11} = 1$ ,  $P_{5,9} + P_{5,10} = 1$ ,  $P_{6,8} + P_{6,11} = 1$ ,  $P_{7,9} + P_{7,10} = 1$ ,  $P_{8,9} + P_{8,11} = 1$ . В исходном состоянии вероятности  $P_{0,2}$ ,  $P_{2,4}$  и  $P_{3,6}$  имеют заданные значения. Произведение вероятностей  $P_{0,2}$  и  $P_{2,4}$  может быть использовано в качестве показателя достоверности бортовой подсистемы контроля ТС и диагностирования БА КА:  $D_1 = P_{0,2} P_{2,4}$ . Вероятность  $P_{8,11}$  может быть использована в качестве показателя достоверности средств контроля ТС и диагностирования БА наземного сегмента СИТО управления КА:  $D_2 = P_{8,11}$ . Результирующая вероятность  $P_{11}$  попадания системы в поглощающее состояние  $S_{11}$ , соответствующее работоспособному состоянию и штатному функционированию БА КА после выполнения цикла процедур контроля ТС, диагностирования и восстановления работоспособности БА КА, зависит как от значений показателей достоверности  $D_1$  и  $D_2$ , так и от значений других вероятностей, описывающих переходы в рассматриваемом графе состояний.

Трудность разделения переменных и получения аналитической зависимости вероятности работоспособного состояния БА КА от показателей достоверности внутреннего и внешнего диагностирования  $P_{11}(D_1, D_2)$  приводит к необходимости использования методов имитационного моделирования для исследования процессов диагностирования БА КА.

На основе графа состояний, приведенного на рисунке 4, была разработана имитационная дискретно-событийная модель процесса диагностирования БА КА с высоким уровнем автономности. Модель реализована в среде AnyLogic [6]. Основная причина, по которой выбран данный отечественный программный продукт, заключается в том, что AnyLogic обладает расширенными возможностями в области объектно-ориентированного программирования и позволяет разработчику, по сути, создать собственную среду моделирования для заданной предметной области, а также дает возможность совмещать различные подходы к моделированию.

На вход модели поступает поток заявок, имитирующих НС, которые порождают различные события, распространяющиеся в модели от со-



стояния к состоянию. В начальный момент времени БА находится в состоянии  $S_0$ . В последующие моменты времени БА подвергается воздействию имитируемых НС, возникающих с интенсивностью  $\lambda_0$ . Каждая НС порождает распространяющуюся в модели заявку на обработку НС бортовыми средствами контроля ТС и диагностирования БА. В результате обработки этой заявки система попадает в одно из поглощающих состояний  $S_9$ ,  $S_{10}$  или  $S_{11}$ . Интервал автономного функционирования КА является случайной величиной и определяется как интервал времени между событиями обращения к наземному сегменту СИТО. Все процессы в модели синхронизированы, а их длительность определяется модельным временем. При переходах из текущего состояния  $q$  в состояние  $r$  происходит задержка модельного времени на величину  $T_{q,r}$ . Задержки  $T_{q,r}$  образуют матрицу задержек  $\mathbf{T}$ ,  $T_{q,r} \in \mathbf{T}$ . Для графа состояний, приведенного на рисунке 4,  $q = 0 \dots 8$ ,  $r = 1 \dots 11$ , матрица задержек имеет следующий вид:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{0,1} & T_{0,2} & T_{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{1,9} & T_{1,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{2,4} & T_{2,5} & 0 & 0 & T_{2,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{3,6} & T_{3,7} & T_{3,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{4,8} & 0 & 0 & T_{4,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{5,9} & T_{5,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{6,8} & 0 & 0 & T_{6,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{7,9} & T_{7,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{8,9} & 0 & T_{8,11} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матрица  $\mathbf{T}$  имеет такую же размерность и структуру, как и матрица  $\mathbf{P}$ . Нулевые значения элементов матрицы  $\mathbf{T}$  соответствуют отсутствию переходов между соответствующими состояниями, а нулевая длительность переходов между состояниями исключается.

Несмотря на достаточно общее определение параметров модели  $T_{q,r}$  и  $P_{q,r}$ , все они сводятся к конкретным техническим характеристикам и сведениям из нормативных документов. Например, параметры бортового сегмента рассмотренной функциональной схемы — бортового диагностического комплекса — достаточно точно определяются при проектировании КА, приводятся в документации на КА и при необходимости уточняются по результатам наземных автономных и комплексных испытаний бортовых систем, летных испытаний и летной эксплуатации КА, при моделировании НС на стенде Главного конструктора КА. Возможные неточности в определении некоторых параметров  $T_{q,r}$  нивелируются их незначительным вкладом в конечный результат и возможностью среды моделирования AnyLogic задавать интервальные оценки значений  $T_{q,r}$  с использованием различных законов распределения. Следует отметить, что

показатели достоверности контроля ТС и диагностирования БА бортовым  $D_1$  и наземным  $D_2$  сегментами СИТО, которые оказывают наибольшее влияние на конечный результат, при моделировании не являются константами, а варьируются в широком диапазоне значений с целью получения выходных зависимостей.

В модель включен набор правил, в соответствии с которыми происходят изменения характеристик потока отказов за счет программного изменения параметров соответствующего компонента имитационной модели (источника заявок) во времени. Обычно данный набор правил, в соответствии с известными методами FTA и FMEA, связывается с деревом отказов объекта диагностирования, в рассматриваемом случае – БА КА [22-24]. В нашем случае набор этих правил привязывается к графу состояний, представленному на рисунке 4. В начальный момент времени значение интенсивности отказов принимает значение  $\lambda(1)=\lambda_{c,=(1)}$  в соответствии с выражением (1) или (2) для  $k=1$ , а значения параметров системы диагностирования — согласно техническому описанию. Далее, в зависимости от направления распространения заявки в модели, осуществляется изменение интенсивности отказов следующим образом:

$$\lambda(k+1) = \begin{cases} \lambda(k) + d\lambda_{c,+}(k), S_0 \rightarrow S_9, S_{10}, d\lambda_{c,+}(k) = \varphi(k), \\ \lambda(k), S_0 \rightarrow S_{11}, \\ \lambda_{c,=(k)}, S_8 \rightarrow S_{11}, \lambda_{c,=(k)} = f(k), \end{cases} \quad (5)$$

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 НС (заявки в графе). При этом необходимо учитывать, что на этапе приработки БА КА  $k \in [1, 22]$ .

При достижении состояния  $S_8$  фиксируется время обращения к наземному сегменту СИТО  $t_B(j)$  и вычисляется время автономного функционирования КА  $T_A(j)$ :

$$T_A(j) = t_B(j) - t_B(j-1) - T_D(j), \quad (6)$$

где  $t_B(j)$ ,  $t_B(j-1)$  — модельное время двух последовательных обращений к наземному сегменту СИТО,  $T_D(j)$  — время диагностирования БА КА средству наземного сегмента СИТО,  $j$  — номер обращения. При таком определении величина  $T_A(j)$  представляет собой интервал времени между  $j$ -ым и  $(j-1)$ -ым обращениями к наземному сегменту СИТО. Величина  $T_D(j)$  определяется следующим образом:  $T_D(j)=T_{8,11}(j)$  при пра-

вильном обнаружении НС и восстановлении работоспособного состояния БА,  $T_d(j)=T_{8,9}(j)$  при не обнаружении НС и невозможности восстановления работоспособного состояния БА.

Выявление зависимости интервала автономного функционирования КА от параметров модели осуществляется по ансамблю реализаций, полученных в результате имитационного моделирования. 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  $P_A$ :

$$\hat{T}_A \left( P(T_A(j) \geq \hat{T}_A) = P_A \right), \quad (7)$$

а также получить зависимости этой величины от параметров модели. В данном случае, вероятность  $P_A$  — вероятность того, что на интервале времени от 0 до  $\hat{T}_A$  не произойдет «тяжелых» НС и задействования средств НКУ для диагностирования и восстановления работоспособности БА.

В предложенной модели существует возможность калибровки ее параметров на основе сравнения статистических характеристик полученного модельного потока отказов со статистическими характеристиками реального потока отказов, как на борту исследуемого КА, так и на борту однотипных КА. Для верификации модели можно использовать доверительный интервал, полученный с заданной доверительной вероятностью на значения  $\hat{T}_A$ , характерные для выборки современных КА.

Представленная модель обладает оригинальностью и новизной в части совмещения дискретно-событийной имитационной модели процесса диагностирования БА и аналитической модели развития НС на борту КА с высоким уровнем автономности.

**4. Результаты имитационного моделирования процесса диагностирования бортовой аппаратуры космического аппарата.** Имитационное моделирование процесса диагностирования БА проводилось для исходных данных, соответствующих эксплуатационно-техническим характеристикам КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) «Ресурс-ДК1» [3]. Задавалась суточная интенсивность возникновения отказов и параметры бортовых модулей контроля ТС и диагностирования БА  $P_{0,2}$ ,  $P_{2,4}$ ,  $P_{8,11}$ . На входе модели было сформировано более 40000 событий — НС (неисправностей), время между которыми было распределено по экспоненциальному закону. Первоначально рассматривался этап приработки БА КА.

При этом изменение интенсивности отказов осуществлялось в соответствии с моделью (5) и выражением (1). По полученным в результате имитационного моделирования реализациям  $T_A(j)$  определялся интервал автономного функционирования КА  $\hat{T}_A$  в соответствии с (7). На рисунке 5 представлены построенные по ансамблю реализаций и сглаженные графики зависимостей интервала автономного функционирования КА  $\hat{T}_A$  от достоверности автономного диагностирования БА  $D_1$ . Зависимости  $\hat{T}_A(D_1)$  соответствуют оценке интервала автономного функционирования с вероятностью достижения  $P_A=0.95$  и различной достоверности внешнего диагностирования. Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования ( $D_2=1$ ), кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования ( $D_2=0.75$ ), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование не осуществляется ( $D_2=0.1$ ).

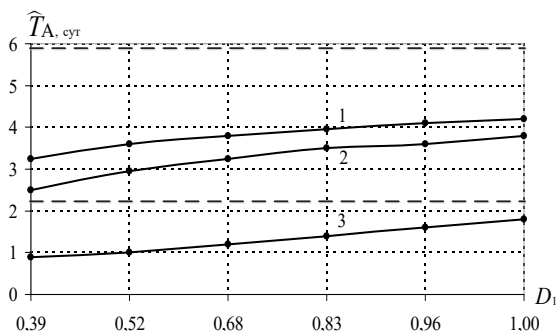


Рис. 5. Зависимости интервала автономного функционирования КА от достоверности автономного диагностирования на этапе приработки БА при различной достоверности внешнего диагностирования

Аналогичные исследования проводились для этапа нормальной эксплуатации КА. При этом изменение интенсивности отказов осуществлялось в соответствии с моделью (5) и выражением (2). На рисунке 6 представлены зависимости, полученные для двух случаев: этапа нормальной эксплуатации (кривая 1) и этапа приработки БА КА (кривая 2). Зависимости  $\hat{T}_A(D_1)$  соответствуют оценке интервала автономного функционирования с вероятностью достижения  $P_A=0.95$  при высокой достоверности внешнего диагностирования ( $D_2=1$ ). При больших значениях  $D_2$  полученные зависимости аппроксимируются степенным, а при малых значениях  $D_2$  — экспоненциальным законом.

На рисунках 5 и 6 пунктиром отмечен диапазон значений  $\hat{T}_A$ , использованный для верификации модели. Очевидно, что кривая 3 на рисунке 5 не попадает в данный диапазон, так как соответствует маловероятной ситуации.

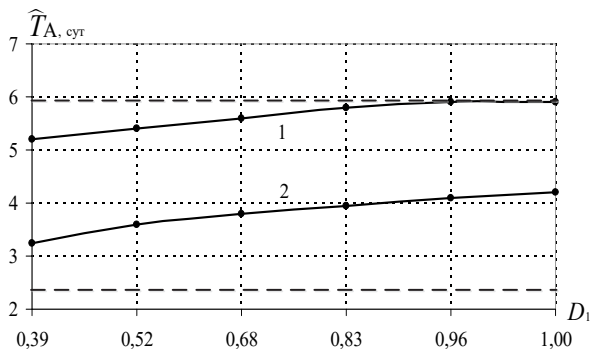


Рис. 6. Зависимости интервала автономного функционирования КА от достоверности автономного диагностирования на различных этапах эксплуатации при фиксированной достоверности внешнего диагностирования

С увеличением показателя достоверности автономного диагностирования с использованием бортовых средств  $D_1=P_{0,2}P_{2,4}$ , эффект накопления последствий отказов БА проявляется в меньшей степени, что позволяет увеличить интервал автономного функционирования КА. При этом на этапе приработки БА контроль ТС с использованием средств наземного сегмента СИТО необходимо осуществлять чаще, чем на этапе нормальной эксплуатации. Представленные результаты и разработанная имитационная модель могут иметь практическое значение для планирования внешнего контроля ТС БА КА с использованием средств наземного сегмента СИТО и определения начального значения периодичности проведения углубленного анализа ТС БА, которое может корректироваться на этапе летной эксплуатации КА в зависимости от количества «тяжелых» отказов на борту.

В работе [14] получена зависимость, аппроксимирующая значение уровня автономности функционирования КА ДЗЗ в соответствии с пятибальной классификационной шкалой NASA:

$$A = \left( \frac{C_y}{C_n} \right)^{-0.0657} \left( \frac{t_y}{\hat{T}_A} \right)^{-0.0842}, \quad (8)$$

где  $C_y$  — пропускная способность канала связи с НКУ;  $C_n$  — пропускная способность канала передачи специальной информации;  $t_y$  — время, затраченное на управление КА средствами НКУ в течение выполнения целевых задач. Используя зависимости, представленные на рисунке 5, а также характеристики каналов передачи информации для КА «Ресурс-ДК1», определим влияние показателей  $D_1$  и  $D_2$  на уровень автономности КА. Результаты анализа представлены на рисунке 7 в виде зависимостей уровня автономности  $A$  от показателя достоверности  $D_1$  бортового сегмента СИТО при различных значениях  $D_2$ . Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования ( $D_2=1$ ), кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования ( $D_2=0.75$ ), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование не осуществляется ( $D_2=0.1$ ).

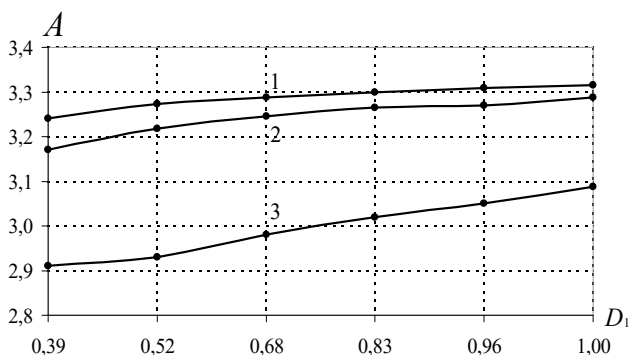


Рис. 7. Зависимости уровня автономности КА от достоверности автономного диагностирования ТС на этапе приработки при различной достоверности внешнего диагностирования

Данные зависимости позволяют сделать вывод о влиянии характеристик средств диагностирования СИТО на уровень автономности КА и его изменение в пределах 8% пятибальной шкалы уровня автоматизации аэрокосмических средств по классификации NASA. Полученная величина приобретает значимый вес на фоне изменений уровня автономности КА двух последующих друг за другом поколений, приближенно равных 10–24% этой же шкалы [14].

**5. Заключение.** Повышение уровня автономности является в настоящее время актуальной задачей при создании перспективных КА различного назначения (не только КА ДЗЗ), о чем свидетельствует экспоненциальный рост уровня автономности аэрокосмических средств, наблюдаемый в последние десятилетия как у нас в стране, так и за рубежом [14]. Одним из способов достижения высокой автономности

функционирования КА является повышение отказоустойчивости БА. В реальных условиях функционирования БА КА пропуски отказов и ошибки распознавания неисправностей при низкой достоверности автономного диагностирования могут привести к росту интенсивности отказов, эффекту накопления последствий неисправностей и отказов в БА, а также сокращению интервала автономного функционирования КА. Это утверждение относится к широкому классу сложных технических систем с высоким уровнем автономности. Для снижения последствий такого развития ситуации необходимо повышать достоверность бортовых (автономных) средств диагностирования и периодически проводить углубленный анализ ТС КА с использованием средств диагностирования наземного сегмента СИТО. Представленные результаты качественно подтверждают данное утверждение, а рассмотренный в статье подход может быть использован как для определения значений системных показателей КА с высоким уровнем автономности функционирования, так и для обоснования требований, предъявляемых к средствам контроля ТС и диагностирования БА.

### Литература

1. *Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полетами. Ч.1 // М.: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2009. 476 с.
2. *Малкин В.С.* Техническая диагностика // М.: Академия. 2013. 272 с.
3. *Кириллин 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.
4. *Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Сологуб А.Н.* Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2009. Том 11. № 3. С. 165–176.
5. *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.
6. *Borshchev A.* The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6 // AnyLogic North America. 2013. 612 p.
7. *Охмилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В.* Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. 2014. № 11(57). С. 7–15.
8. *Мостовой Я.А.* Имитационная математическая модель внешней среды в жизненном цикле бортового программного обеспечения управления космической платформой // Компьютерная оптика. 2012. № 3(36). С. 412–418.
9. *Назаров А.В.* Метод структурно-параметрической адаптации многоуровневых систем обработки информации с использованием локальных функционалов качества // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 25–33.
10. *Кириллин А.Н. и др.* Влияние надежности бортовых систем космических аппаратов ДЗЗ на показатели периодичности съемки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4(42). С. 170–180.
11. *Лохматкин В.В., Куренков В.И.* Прогнозирование производительности съемки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с учетом надежности бортовых систем // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2013. Том 15. №4(2). С. 465–472.

12. *Абрамешин А.Е., Жаднов В.В.* Моделирование интенсивности отказов интегральных схем бортовой космической аппаратуры из-за воздействия электростатических разрядов // Технологии ЭМС. 2014. № 2(49). С. 27–34.
13. *Мозгалецкий А.В., Койда А.Н.* Вопросы проектирования систем диагностирования // Л.: Энергоатомиздат. 1985. 112 с.
14. *Мальцев Г.Н., Якимов В.Л.* Современные подходы к определению уровня автономности космических аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2. С. 34–43.
15. ГОСТ Р 56526–2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования // М.: Стандартинформ. 2015. 46 с.
16. *Лобан А.В.* Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов // Москва–Берлин: Директ-Медиа. 2015. 146 с.
17. *Ларин В.П., Шелест Д.К.* Формирование информационного обеспечения надежности бортовой аппаратуры на стадии проектирования // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 93–97.
18. ГОСТ 27.310–95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения // М.: Издательство стандартов. 2001. 23 с.
19. *Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М.* Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 3. С. 21–43.
20. *Мальцев Г.Н., Стогов Г.В., Терехов А.В.* Перспективы создания комплексов управления космическими аппаратами на базе ключевых технологий // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 2–5.
21. *Меньшиков В.А.* Полигонные испытания. Ч. II // М.: КОСМО. 1999. 237 с.
22. *Jenab K., Pineau J.* Failure mode and effect analysis on safety critical components of space travel // Management Science Letters. 2015. vol. 5. pp. 669–678.
23. *Baig A., Ruzli R., Buang A.* Reliability analysis using fault tree analysis: a review // International Journal of Chemical Engineering and Applications. 2013. vol. 4. no. 3. pp. 169–173.
24. *Takahashi M., Kosaka R., Nanba R.* A Study of Fault Tree Analysis for Control Program in Space System // Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2015. pp. 301–306.

**Мальцев Георгий Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики имени К.Э.Циолковского, профессор кафедры космических радиотехнических систем, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах, космические радиотехнические комплексы управления, сбора и передачи информации. Число научных публикаций — 250. georgy\_maltsev@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-95-32.

**Назаров Андрей Вячеславович** — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры космической радиолокации и радионавигации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: распознавание образов, нейросетевые технологии, моделирование распределенных систем, обработка сигналов в оптико-электронных информационных системах. Число научных публикаций — 100. naz-av@mail.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-95-33.

**Якимов Виктор Леонидович** — к-т техн. наук, доцент, докторант, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: моделирование сложных систем, нейросетевые технологии, техническая диагностика. Число научных публикаций — 40. yakim78@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)347-95-36.



G.N. MALTSEV, A.V. NAZAROV, V.L. YAKIMOV  
**THE STUDY OF THE DIAGNOSING OF AUTOMATIC  
 SPACECRAFT ON-BOARD EQUIPMENT USING A DISCRETE-  
 EVENT SIMULATION MODEL**

---

*Maltsev G.N., Nazarov A.V., Yakimov V.L. The Study of the Diagnosing of Automatic Sacecraft on-Board Equipment Using a Discrete-Event Simulation Model.*

**Abstract.** Features of functioning of spacecraft with a high level of autonomy as objects of technical diagnosis are considered. It is assumed that on-board monitoring and diagnostic functions are autonomous and refer to ground facilities when it is impossible to solve problems of recognition of abnormal situations and restore the operational state of on-board equipment. Diagnosing of on-board equipment is described using a state graph that takes into account the peculiarities of the abnormal situations detection by airborne and ground-based means. The developed simulation model allows taking into account the accumulation of consequences of onboard equipment failures due to the influence of the environmental factors of near space and the change in the intensity of their occurrence. The results of simulation modeling of spacecraft diagnosing by means of on-board and terrestrial means of the information telemetry system are presented. The importance of a terrestrial segment of the information telemetry system for the spacecraft control during the periodical and in-depth analysis of their technical condition is shown. The impact of reliability of onboard equipment diagnosis on the autonomy level of Earth remote sensing spacecraft by the simulation results is analyzed.

**Keywords:** spacecraft, autonomous functioning, on-board equipment, technical state, diagnosis.

---

**Maltsev Georgy Nikolaevich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, honored scientist of the Russian Federation, full member of the Tseolkovsky academy of cosmonautics, professor of the space radio engineering systems department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: processing of signals in radio engineering and optico-electronic information systems, space radio-technical complexes for control, collection and transmission of information. The number of publications — 250. georgy\_maltsev@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-32.

**Nazarov Andrey Vyacheslavovich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of space radiolocation and a radio navigation department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: pattern recognition, neural nets, modeling of distributed systems, signal processing in optical-electronic information systems. The number of publications — 100. naz-av@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 347-95-33.

**Yakimov Victor Leonidovich** — Ph.D., associate professor, doctoral student, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: simulation of difficult systems, neural network technologies, technical diagnostics. The number of publications — 40. yakim78@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-36.

### References

1. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Liubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami. Ch.II* [Mission control. Part. 1]. Moscow: MGTU imeni N. E. Baumana Publ. 2009. 476 p. (In Russ.).
2. Malkin V.S. *Tekhnicheskaja diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Akademiia Publ. 2013. 272 p. (In Russ.).
3. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Sologub A.N., Makarov V.P. *Metody obespecheniia*

*zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh KA zondirovaniia Zemli: matematicheskie modeli, komp'iuternye tekhnologii* [Methods to ensure the survivability of low-orbit spacecraft sensing of the Earth: mathematical models, computer technology]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 2010. 384 p. (In Russ.).

4. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sologub A.N. [The concept of automatic space vehicles survivability autonomous control for Earth remote sensing in anomalous situations]. *Vestnik Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Samara state aerospace university*. 2009. vol. 11. no. 3. pp. 165–176. (In Russ.).
5. Maltsev G.N., Nazarov A.V., Yakimov V.L. [The simulation modeling of complex technical system diagnosing process with autonomy high level of functioning]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2016. vol. 4. pp. 34–43. (In Russ.).
6. Borshchev A. The big book of simulation modeling: multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America. 2013. 612 p.
7. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V. [The concept of complex objects proactive management: theoretical and technological basis]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 2014. vol. 11(57). pp. 7–15. (In Russ.).
8. Mostovoy Ya.A. [Simulation mathematical model of the external environment in the life cycle of the on-board software for controlling the space platform]. *Komp'iuternaia optika – Computer optics*. 2012. vol. 3 (36). pp. 412–418. (In Russ.).
9. Nazarov A.V. [The method of structural-parametric adaptation of multi-level information processing systems using local quality functionals]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2014. vol. 5. pp. 25–33. (In Russ.).
10. Kirillin A.N. et al. [Influence of onboard systems reliability of Earth remote sensing spacecrafts on the survey periodicity indicators]. *Vestnik Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Samara state aerospace university*. 2013. vol. 4(42). pp. 170–180. (In Russ.).
11. Lokhmatkin V.V., Kurenkov V.I. [Forecasting the productivity of Earth remote sensing spacecrafts surveying taking into account of onboard systems reliability]. *Vestnik Samarskogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk – Bulletin of the Samara state aerospace university*. 2013. vol. 15. no. 4(2). pp. 465–472. (In Russ.).
12. Abrameshin A.E., Zhadnov V.V. [Modeling the failure rate of on-board space equipment integrated circuits due to the impact of electrostatic discharges]. *Tekhnologii EMS – Technologies of electromagnetic compatibility*. 2014. vol. 2(49). pp. 27–34. (In Russ.).
13. Mozgalevskii A. V., Koida A.N. *Voprosy proektirovaniia sistem diagnostirovaniia*. [The problems of designing diagnostic systems]. Leningrad: Energoatomizdat Publ. 1985. 112 p. (In Russ.).
14. Maltsev G.N., Yakimov V.L. [Modern approaches to determining the spacecrafts autonomy level]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2017. vol. 2. pp. 34–43. (In Russ.).
15. GOST R 56526–2015. [Requirements for the reliability and safety of space systems, complexes and automatic spacecraft of a single (small-scale) production with long periods of active existence]. Moscow: Standartov Publ. 2015. 46 p. (In Russ.).
16. Loban A.V. *Informatsionnaia tekhnologiia raspredelenogo diagnostirovaniia kosmicheskikh apparatov* [Information technology of distributed spacecraft diagnostic]. Moscow–Berlin: Direkt-Media Publ. 2015. 146 p. (In Russ.).
17. Larin V.P., Shelest D.K. [Formation of information support for the reliability of on-board equipment at the design stage]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2012. vol. 4. pp. 93–97. (In Russ.).
18. GOST 27.310–95. [Analysis of Types, Consequences and Criticality of Failures. The Main Provisions]. Moscow: Standartov Publ. 2001. 23 p. (In Russ.).

19. Talalaev A.A., Fralenko V.P., Khachumov V.M. [Review of standards and the conceptual design of tools for spacecraft monitoring, control and diagnostics]. *Programmnye Sistemy: teoriya i prilozheniya – Software systems: theory and applications*. 2015. vol. 6. pp. 21–43. (In Russ.).
20. Maltsev G.N., Stogov G.V., Terekhov A.V. [The prospects of spacecraft control complexes creation based on core technology]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and control systems*. 2006. vol. 5. pp. 2–5. (In Russ.).
21. Men'shikov V.A. *Poligonnye ispytaniia. Ch.II*. [Ground Testing. Part II]. Moscow: KOSMO Publ. 1999. 237 p. (In Russ.).
22. Jenab K., Pineau J. Failure mode and effect analysis on safety critical components of space travel. *Management Science Letters*. 2015. vol. 5. pp. 669–678.
23. Baig A., Ruzli R., Buang A. Reliability analysis using fault tree analysis: a review. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013. vol. 4. no. 3. pp. 169–173.
24. Takahashi M., Kosaka R., Nanba R. A Study of Fault Tree Analysis for Control Program in Space System. Proc. of 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2015. pp. 301–306.