

В. Е. Патраев, И. В. Трифанов

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Представлен анализ и оценка основных показателей качества и надежности современных отечественных космических аппаратов связи. Даны рекомендации по повышению надежности при эксплуатации на основе повышения требований к электрорадиоизделиям КА длительного функционирования.

Ключевые слова: космический аппарат, надежность, срок активного существования, электрорадиоизделия.

В связи с рядом отказов и существенных неисправностей, отмеченных с 1997 г. на ряде современных зарубежных космических аппаратов (КА), аналитики считают, что нерешенные проблемы надежности являются реальным фактором, влияющим на развитие спутниковой отрасли. В проведенном компанией Frost&Sullivan [1] анализе отказов в модулях всех запущенных КА, созданных на базе спутниковых платформ (табл. 1) определены платформы с лучшими показателями надежности, а также делается заключение, что отказы отмечены преимущественно в конструкциях платформ, а не полезных грузов.

По оценкам Futron Corp. за период с 1996 по 2008 гг. на 43 эксплуатируемых спутниках отмечено 47 существенных неисправностей и отказов, при этом 74 % из них произошли за последние 5 лет. Отмечается, что по общей статистике только 25 % неисправностей в последнее время приходится на полезную нагрузку, а остальные отказы относятся к спутниковым платформам, которые, как правило, являются унифицированными или рекуррентными с других программ т. е. более отработанными, при этом новые по характеру неисправности во многом свя-

заны как с повышением энерговооруженности отдельных каналов связи, так и всего спутника в целом, а также усложнением бортовых систем и электроники.

Анализ показателей качества отечественных КА связи. Проблемы надежности зарубежных КА при эксплуатации могут, видимо, частично коррелироваться с подобными проблемами современных космических аппаратов отечественной разработки.

В [2; 3] рассмотрены некоторые статистические срезы, характеризующие качество и вытекающие из сравнительного анализа неисправностей КА связи типа «Экспресс-А», «Экспресс-АМ», условно относящихся к одному модельному ряду КА-аналогов герметичного исполнения разработки ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Технические характеристики и наработки данных космических аппаратов приведены в табл. 2.

Проведенный анализ количества неисправностей на один КА при эксплуатации по признакам деления показывает, что преобладают неисправности КА, либо не классифицированные, либо связанные с отказами электрорадиоизделий (ЭРИ).

Таблица 1

Отказы зарубежных КА связи в период 1998–2001 гг.

Наименование спутниковой платформы	Фирма-изготовитель	Запущенные спутники	Количество отказов и получение страховки	Процент отказов
BSS-376	Boeng	55	6	11
A-2100	Lockheed Martin	23	3	13
LS-1300	Space System Loral	41	8	20
BSS-601	Boeng	62	14	23
Spacebus 3000	Alcatel	18	5	28
Eurustar E2000	EADS Astrium	19	6	32
BSS-702	Boeng	8	6	75

Таблица 2

Технические характеристики и наработки космических аппаратов

Индекс КА и номер	Дата пуска	Гарантийный срок активного существования (ресурс), лет	САС фактические, мес.			
			на 01.12.06	на 01.12.07	на 01.12.08	на 01.12.09
Экспресс-А № 2	12.03.00	5 (7)	81,7	93,7	105,7	117,7
Экспресс-А № 3	24.06.00	5 (7)	78,2	90,2	102,2	114,2
Экспресс-А № 4	10.06.02	5 (7)	54,4	66,4	78,4	90,4
Экспресс-АМ № 22	29.12.03	10,25 (12)	35,5	47,5	59,5	71,5
Экспресс-АМ № 1	30.10.04	«—»	25,3	37,3	49,3	61,3
Экспресс-АМ № 2	30.03.05	«—»	20,2	32,2	44,2	56,2
Экспресс-АМ № 3	24.06.05	«—»	17,4	29,4	41,4	53,4
Экспресс-АМ № 33	28.01.08	«—»	0	0	9,3	21,3

Отказы полезной нагрузки в КА «Экспресс-А» и «Экспресс-АМ» составляют 7 и 23 % от общего количества выявленных неисправностей [3]. Их количество на КА «Экспресс-АМ» сравнимо с зарубежными КА (25 %).

Введем коэффициентные показатели качества КА определенных серий A_i , сравнение которых могло бы характеризовать динамику качества условных КА-аналогов различных серий с учетом наработок:

$$A_i = \frac{R_{i\Sigma}}{T_{i\Sigma}} \quad \text{или} \quad A_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ji} T_{AC_i}}{\sum_{j=1}^n t_{ji}},$$

где $R_{i\Sigma}$ – суммарное количество неисправностей по признакам деления на один КА i -ой серии; $T_{i\Sigma}$ – суммарное количество отработанных нормативных гарантийных сроков активного существования (ГСАС) или сроков службы всеми КА i -ой серии; r_{ji} – количество неисправностей по признаку деления j на один КА i -ой серии (табл. 3); t_{ji} – наработка j -ой КА i -ой серии на момент оценки; n – количество КА i -ой серии на момент оценки; T_{AC_i} – гарантийный срок активного существования (ГСАС) КА i -ой серии.

Сравнительный анализ качества некоторых современных космических аппаратов по показателю свидетельствует, что по данному показателю КА серии «Экспресс-АМ» пока уступают условным КА-аналогам «Экспресс-А», которые уже выработали свои гарантийные сроки активного существования, однако динамика «улучшения» данного показателя с ростом наработок выше у КА «Экспресс-АМ». Прогнозная оценка показывает, что при достижении данными КА, требуемых ГСАС, показатель (отношение суммарного количества неисправностей по признакам деления на один КА i -ой серии к количеству отработанных ГСАС всеми КА i -ой серии) будет ниже у КА «Экспресс-АМ», т. е. качество КА серии «Экспресс-АМ» выше, чем у КА серии «Экспресс-А» [3].

Анализ показателей эксплуатационной надежности.

Рассмотрим расчетные значения ряда основных показателей эксплуатационной надежности в виде вероятности безотказной работы (ВБР) за ГСАС, средних сроков активного существования (САС) до закрытия и первого ограничения в работе рассматриваемых КА для различных уровней

доверительных вероятностей на 01.12.09 (табл. 3). Для оценки показателей надежности КА по текущим наработкам использована программа расчета, основанная на условном плане испытаний $[N, U, z]$ цензурированных выборок [4], где N – объем выборки изделий (КА), предназначенных для испытаний; U – планы испытаний, в которых отказавшие изделия не заменяются и не восстанавливаются; z – признак окончания испытаний (наработка z_i каждого изделия), $z_i = \min(t_i, \tau_i)$, $i = \overline{1, N}$, где t_i – наработка до отказа i -ого КА (его бортовой аппаратуры); τ_i – наработка i -ого КА (его БА) до момента проведения оценки (цензурирования) и объем статистики по рассматриваемым КА. При расчете статистических показателей надежности КА «Экспресс-А» использованы дополнительные данные по общим лидерным наработкам на момент закрытия условных КА-аналогов «Экспресс» и «Галс».

Расчетные показатели эксплуатационной надежности КА «Экспресс-АМ», которые еще не выработали свой ГСАС, лучше аналогичных показателей КА «Экспресс-А» и с ростом наработок ожидается их дальнейший рост. Они демонстрируют не только обеспечение требуемых по ТУ на КА показателей надежности, но и динамику их роста, что в первую очередь свидетельствует о высоких ресурсных возможностях соответствующих платформ КА.

Общие статистические данные по разным КА позволяют сделать вывод о целесообразности комплектации перспективных КА импортной полезной нагрузкой, а также модулей служебных систем отдельной аппаратурой зарубежной разработки, что позволит, в совокупности с высокими ресурсными возможностями отечественных перспективных базовых платформ негерметичного исполнения («Экспресс-1000» и модификаций, «Экспресс-2000» и др.) разработки ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева», создавать конкурентоспособные КА.

Сравнительный анализ количества классифицированных отказов ЭРИ при эксплуатации современных КА типа «Экспресс-АМ», при производстве которых полностью внедрена система дополнительных испытаний партий ЭРИ, предназначенных для комплектации в летные образцы аппаратуры (отбраковочные испытания, диагностический неразрушающий контроль, выборочный разрушающий анализ) [5; 6] с более ранними КА разработки ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева», типа «Горизонт», эксплуатация которых началась с 1980 г., по-

Таблица 3

Показатели эксплуатационной надежности космических аппаратов

Индекс КА	Гарантийный СА, мес.	Требуемая ВБР за ГСАС	Доверительная вероятность	Точечное значение ВБР за ГСАС	Нижняя доверительная граница ВБР за ГСАС	Общий средний САС до закрытия, мес.	Нижняя доверительная граница среднего САС до закрытия, мес.	Средний САС до первого ограничения, мес.	Нижняя доверительная граница среднего САС до первого ограничения, мес.
Экспресс-А	60	0,63	0,8	0,877551	0,64939	95,721428	90,903869	50,25	33,927125
Экспресс-А	60	0,63	0,9	0,877551	0,565119	95,721428	88,392102	50,25	25,416742
Экспресс-АМ	123	0,7	0,8	0,91701	0,79331	61,74	47,641823	61,74	47,641823
Экспресс-АМ	123	0,7	0,9	0,91701	0,71768	61,74	40,291349	61,74	40,291349

казывает, что доля классифицированных отказов ЭРИ на некоторых типах современных КА не падает, что связано с частными случаями комплектования КА партиями ЭРИ недостаточного качества, недостаточно совершенными объемами дополнительных испытаний и общими проблемами электронной компонентной базы.

Обеспечение качества и требуемой эксплуатационной надежности современных отечественных КА-проблема многоплановая. Анализ эксплуатационной надежности современных отечественных КА показал, что по признакам деления преобладают отказы ЭРИ, устранить которые полностью не удастся даже с помощью дополнительных процедур обеспечения качества ЭРИ, и не классифицированные по признакам деления отказы и неисправности (в основном производственного происхождения) по причине невозможности однозначного установления причин их появления из-за недостаточности объема телеметрической информации, используемой для анализа технического состояния КА.

Для перспективных КА, находящихся в разработке, выявлена необходимость решения ряда задач. По результатам опыта работы ОАО «ИСС» имени М. Ф. Решетнева к ним можно отнести следующие:

- комплектование бортовой аппаратуры КА отечественными перспективными квалифицированными ЭРИ повышенной надежности, изготавливаемыми в соответствии с Российскими нормативными требованиями;
- комплектование бортовой аппаратуры КА ЭРИ иностранного производства только космического или близкого к нему уровня качества, изготавливаемыми по требованиям, контролируемым иностранными национальными космическими агентствами;
- разработку более эффективных программ и методик дополнительных испытаний партий ЭРИ отечественного изготовления в испытательных технических центрах;
- совершенствование комплекса отраслевых нормативных документов, регламентирующих приобретение и применение электронной компонентной базы в КА длительного функционирования;
- необходимость проведения более раннего и глубокого анализа видов, последствий и критичности отказов (АВ-ПКО) бортовой аппаратуры на этапах проектирования с целью разработки более эффективной программы их контроля и определения достаточности диагностики для наиболее критичных узлов и блоков бортовой аппаратуры;
- разработку более эффективных, информативных и достоверных методов испытаний, контроля надежности бортовой аппаратуры перспективных КА, норм отработочных и приемочных испытаний бортовой аппаратуры, в особенности для КА негерметичного исполнения, включая увеличение количества термоциклов и термовакуумных циклов при наземной экспериментальной отработке и приемке;
- разработку более жесткой программы контроля качества КА и составных частей при изготовлении в целях снижения производственных отказов и отказов ЭРИ при

эксплуатации и повышении эффективности системы и конкретных процедур гарантирования качества изготовления бортовой аппаратуры на заводах изготовителях;

- разработку метода технически обоснованного назначения продолжительности и режимов электротермостерилизации (ЭТТ) бортовой аппаратуры при изготовлении в целях получения, после их завершения, приемлемого показателя надежности в виде интенсивности отказов, обеспечивающей требуемую вероятность безотказной работы КА на конец нормативного САС.

Таким образом, по результатам анализа показателей качества и эксплуатационной надежности, а также проблем обеспечения надежности современных отечественных и зарубежных КА можно сделать вывод о их коррелированности и необходимости решения ряда задач, обеспечивающих эксплуатационную надежность, эффективность и конкурентоспособность перспективных отечественных КА длительного функционирования (12–15 лет).

Библиографические ссылки

1. О надежности спутниковых платформ // Ракетная и космическая техника. М., 2004. № 44. С. 6–8.
2. Анализ технического состояния и оценка уровня фактической надежности, а также готовности к целевому использованию КА связи и вещания народно-хозяйственного назначения по результатам эксплуатации в 2008 г. Анализ динамики изменения показателей надежности за период с 1994 по 2008 г.: отчет по ОКР; рук. Роскин С. М.; исполн.: Патраев В. Е. [и др.]; ОАО «ИСС». Железнодорожск. 2008. 182 с. № 510-6298-08.
3. Анализ технического состояния и оценка уровня фактической надежности, а также готовности к целевому использованию КА серий «Горизонт», «Экран-М», «Экспресс», «Гонец» по результатам эксплуатации в 2009 г. Анализ динамики изменения показателей надежности за период с 1994 по 2009 г.: отчет по ОКР; рук. Роскин С. М.; исполн.: Патраев В. Е. [и др.]; ОАО «ИСС». Железнодорожск. 2009. 199 с. № 510-6586-09.
4. Патраев В. Е., Вовченко С. П. Оценка эксплуатационной надежности космических аппаратов связи и теле вещания разработки НПО ПМ // Двойные технологии. М., 2004. № 3. С. 64–66.
5. Федосов В. В., Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиа-космическое приборостроение. М., 2006. № 10. С. 50–55.
6. Федосов В. В., Патраев В. Е. Оценка влияния разрушающего физического анализа на характеристики безотказности изделий микроэлектроники, устанавливаемых в бортовую аппаратуру космических аппаратов // Авиа-космическое приборостроение. М., 2008. № 1. С. 37–40.

MODERN SPACECRAFTS OPERATIONAL RELIABILITY AND QUALITY ANALYSIS

Research work proposes and considers the main quality and operational reliability characteristics of modern Russian communication spacecrafts. Some recommendations for increase of operational reliability of long-term operation spacecrafts, with account of severization of requirements, are given.

Keywords: spacecraft, reliability, lifetime of EEE-parts.

© Патраев В. Е., Трифанов И. В., 2010

УДК 629.735.064

О. Г. Бойко

О ПРАВОМЕРНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСЛОВНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И УСЛОВНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТКАЗОВ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ НАДЕЖНОСТИ АГРЕГАТОВ

Обсуждаются процедуры определения условных вероятностей безотказной работы, условных плотностей вероятностей отказов и правомерность их использования в математических моделях надежности агрегатов авиационных систем.

Ключевые слова: вероятность, условная вероятность, условная плотность вероятности, агрегат, математическая модель.

В расчетах надежности сложных технических систем в авиации и других критических по надежности отраслях промышленности, при моделировании надежности агрегатов, для определения вероятности безотказной работы используется экспоненциальное распределение

$$p(t) = e^{-\omega t}, \quad (1)$$

где ω – параметр потока отказов агрегата, который определяется по плану испытаний [1] восстанавливаемых агрегатов и равен среднему значению числа отказов в единицу времени (в 1 час). При достаточно большой статистике среднее значение стремится к математическому ожиданию и параметру потока отказов ω допустимо придать этот статус.

Вследствие процедур, предусмотренных при техническом обслуживании авиационной техники, параметры потоков отказов агрегатов систем самолетов поддерживаются на постоянном уровне [2]. Более того, верхние пределы параметров потоков отказов ограничиваются нормативными документами гражданской авиации в виде нормативных значений коэффициентов K_{1000} для самолетов российского производства и K_{100} – иностранного производства. Коэффициент K_{1000} является числом отказов агрегатов определенного типа, приходящемся на 1 000 часов полета и, таким образом, однозначно связан с параметром потока отказов.

Экспоненциальная модель вероятности отказа агрегата, который представляет собой монотонно возрастающую функцию времени (рис. 1):

$$q(t) = 1 - e^{-\omega t}. \quad (2)$$

В гражданской авиации, в соответствии с Нормами летной годности самолетов [3], вероятность отказа агре-

гатов и систем нормируется в вероятностях отказа за 1 час, приводящих к последствиям различной степени тяжести. Поскольку 1 час является величиной 3–4-го порядка малости по сравнению с налетом самолета, то вероятность отказа за 1 час $q(1)$ может быть определена в виде производной от (2) следующим образом:

$$q(1) = \omega \cdot e^{-\omega}. \quad (3)$$

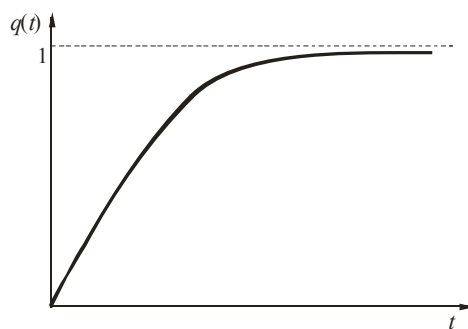


Рис. 1. Экспоненциальная модель вероятности отказа агрегата

График этой зависимости приведен на рис. 2. Уменьшение вероятности отказа за 1 час в функции времени работы агрегата противоречит, во-первых, независимости математического ожидания числа отказов за 1 час, равных ω , от времени работы агрегата; во-вторых, здравому смыслу, поскольку в процессе работы в агрегате неизбежно развиваются деградационные процессы, и вероятность отказа за 1 час никак не может уменьшаться. На практике ее можно поддерживать техническим обслуживанием на некотором уровне.