

УДК 629.78:519.718 + 629.785

ОБ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

О.О. Павловская

Обоснован выбор бортовых систем подлежащих первоочередному анализу на надежность. Выполнен обзор подходов к обеспечению требуемой надежности основных бортовых систем, приведены методики выбора вида и схемы резервирования.

Ключевые слова: космический аппарат; бортовая система; надежность; вероятность безотказной работы; резервирование; схема резервирования; кратность резерва.

В последнее время в области разработки и создания космических аппаратов (КА) отчетливо прослеживается тенденция их миниатюризации при сохранении и улучшении функциональных характеристик [1], что обеспечивается прогрессом в области разработки и изготовления элементной базы. В результате удалось снизить массы КА с нескольких тонн до нескольких килограммов, появился класс малогабаритных КА (МКА).

Опыт эксплуатации МКА во всем мире подтвердил высокую эффективность их применения для нужд науки и народного хозяйства, а также в военных целях. Так, в области народного хозяйства МКА используются для: мониторинга и контроля окружающей среды; метеорологии; навигации и связи; прогнозирования опасных явлений и оперативного контроля чрезвычайных ситуаций; использования в интересах отработки новых технологий; поиска полезных ископаемых и пр.

Целевая эффективность МКА в основном определяется качеством функционирования его бортовых систем (БС) как в штатных, так и в аномальных ситуациях. В условиях активного функционирования МКА критичными являются отказы бортовых систем (БС), как внезапные, вызванные различного рода перегрузками, так и постепенные, связанные с ускоренной деградацией компонентов БС [2].

Качество функционирования МКА определяется критериями: надежность, отказоустойчивость и живучесть, где надежность [3] – свойство системы сохранять работоспособное состояние в течение времени эксплуатации; отказоустойчивость [4] – свойство технической системы сохранять работоспособность после отказа одного или нескольких составных компонентов; живучесть [5] – способность системы выполнять свои основные функции, несмотря на полученные повреждения. Причем для БС, которые в условиях активного функционирования МКА являются невосстанавливаемыми, свойства отказоустойчивости и живучести обеспечиваются за счет надежности. При этом требуемая надежность обеспечивается защитой от внезапных отказов, так как постепенные отказы являются хорошо про-

гнозируемыми, их возникновение можно предупредить своевременным техническим обслуживанием БС. Внезапные же отказы возникают в аномальных ситуациях, неизбежно имеющих место в процессе эксплуатации МКА, однако являются труднопрогнозируемыми.

Поэтому нетривиальным является вопрос анализа инженерных решений по первоочередному обеспечению надежности тех БС МКА, отказ которых наиболее критичен. Так при отказе бортового комплекса управления (БКУ) и/или системы энергопитания (СЭП) невозможно выполнение целевой миссии МКА, следует говорить о прекращении активного существования МКА. Поэтому в первую очередь решаются вопросы по обеспечению и требуемой надежности именно этих БС.

В настоящее время БКУ строятся на базе интегральных микросхем, соединенных единой телекоммуникационной сетью SpaceWire, характеризуются высокой отказоустойчивостью, низким потреблением энергии, небольшой массой. Учитывая взаимосвязь отказов отдельных узлов БКУ и БКУ в целом, схема расчета надежности БКУ МКА имеет вид, показанный на рисунке 1.

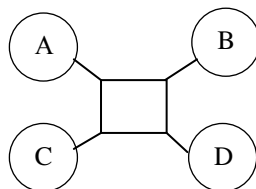


Рис. 1. Схема расчета надежности БКУ МКА

В схеме расчета надежности БКУ (см. рис. 1) к маршрутизатору (М) подключены: А – бортовой компьютер, В – преобразователь интерфейсов, С – преобразователь телекоммуникационной системы и D – модуль питания. Надежность каждого узла характеризуется функцией вероятности безотказной работы (ВБР) $P_i(t)$.

Известный способ обеспечения требуемой надежности БКУ – поэтапное резервирование. Резервирование БКУ может быть реализовано в нескольких вариантах. Так, например, можно резервировать все элементы БКУ кроме маршрутизатора. В этом случае отказ БКУ наступает, когда выходят из строя основной и резервный элемент и/или маршрутизатор. Можно резервировать только маршрутизатор. Можно резервировать одновременно и элементы, и маршрутизатор, причем если откажет хотя бы один из элементов одного комплекта устройств, то будет включаться весь резервный комплект и т.д. Наконец, может быть использована схема резервирования БКУ, когда фактически «все соединено со всем». Эта схема резервирования является самой надежной, но и самой сложной в реализации.

Чтобы выбрать из предлагаемых вариантов резервирования один, наиболее рациональный, представляющий собой «золотую середину» между надежностью системы, и количеством потребляемых ресурсов, применяется алгоритм [1], откорректированный с учетом специфики МКА:

Шаг 1. Оценить ВБР всех узлов БКУ.

Шаг 2. По известным значениям ВБР составляющих элементов вычислить ВБР каждой из шести схем резервирования [1], т. е.:

$$P_{суст} = [p_m \ p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4]^T,$$

$$P = \{P_f^a(p_{суст}), P_f^b(p_{суст}), P_f^c(p_{суст}), P_f^d(p_{суст}), P_f^e(p_{суст}), P_f^f(p_{суст})\}$$

Шаг 3. Из множества P выбрать только те результаты, которые больше минимального значения, данного в техническом задании:

$$P' = \{P_i : P_i > P_{\min}, i = \overline{1,6}\}$$

Шаг 4. Если множество P' не пусто, то перейти на шаг 4, в противном случае делается вывод о необходимости повышения надежности системы принятием одной из следующих мер:

- 1) замена элементов на другие (с большим значением ВБР);
- 2) выбор другого режима резервирования.

Шаг 5. Если множество имеет один элемент, то принять его. Если множество P' имеет более одного элемента, то выбирается один элемент с учетом ограничений на массогабаритные характеристики БКУ, энергопотребление, стоимость.

Более интересный и современный подход к обеспечению требуемой надежности МКА связан с алгоритмическим резервированием БКУ. Он заключается в получении на 1-м шаге полного диагноза о времени появления отказа, его месте, классе, виде его проявления. Причем полный диагноз получается на блоковом, системном и мегасистемном уровнях. На 2-м шаге по полному диагнозу (на каждом уровне) парируются последствия этого отказа посредством выбора избыточного ресурса; выбора алгоритма и процедуры восстановления отказавшего объекта диагностирования. На 3-м шаге проводится повторное диагностирование, для того чтобы дать оценку принятым мерам. Эта оценка передается на уровень выше по отношению к текущему. Построение такой адаптивной системы очень сложная и большая задача, требующая глубокого знания видов отказов конкретного блока, причин их вызывающих и методов их устранения.

Инженерные подходы к обеспечению требуемой надежности системы энергоснабжения (СЭП) связаны с повышением надежности элементной базы и резервированием. Схема расчета надежности СЭП представлена на рис. 2, где ПСБ – подсистема солнечных батарей, ПАБ – подсистема аккумуляторных батарей, БА – блок автоматики.



Рис. 2. Схема расчета надежности СЭП

Согласно схеме расчета надежности:

$$P_{СЭП} = P_{СБ} \cdot P_{АБ} \cdot P_{БА},$$

поэтому для обеспечения требуемой надежности СЭП необходимо резервирование каждой подсистемы.

Расчет требуемой кратности ВБР каждой подсистемы СЭП МКА (корректно использовать экспоненциальный закон распределения времени жизни) при известных значениях ВБР нерезервированных секций, можно провести, используя метод The Feasibility Of Objectives Technique [6]. Согласно данному методу весовые коэффициенты интенсивностей отказов каждой подсистемы определяются экспертно через уровень сложности, уровень высокотехнологичности, с учетом факторов времени функционирования и условий эксплуатации. Полученная расчетным путем кратность резерва каждой подсистем далее может быть уменьшена только за счет использования более надежных базовых элементов.

В заключении хотелось бы отметить, что в последнее время особенно остро противоречие между уровнем сложности КА, обусловленным стремлением к повышению эффективности его применения, и недостаточным резервом повышения надежности, который можно обеспечить традиционными методами: совершенствованием элементной базы и использованием структурной избыточности. Сегодня одним из эффективных путей разрешения указанного противоречия является оснащение КА бортовыми средствами активного обеспечения безопасности полета. Эти средства призваны обеспечить живучесть КА за счет, во-первых, получения оперативной достоверной информации о причинах, вызвавших нештатную ситуацию, во-вторых, за счет принятия комплекса мер по реорганизации системы с целью устранения последствий нештатной ситуации.

Библиографический список

1. Гуцин, В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учеб. для вузов / В.Н. Гуцин – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
2. Кирилин, А.Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных КА зондирования Земли / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.В. Соллогуб, В.П. Макаров. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
3. Анцелиович, Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолёта / Л.Л. Анцелиович – М: Машиностроение, 1985. – 296 с.
4. Воробьёв, В.Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования / В.Г. Воробьёв, В.Д. Константинов. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 448 с.
5. Кизько, В.Г. Теория надежности систем УВД / В.Г. Кизько. – СПб.: ГУГА, 2011. – 40 с.
6. J.F. Castet, and J.H. Saleh, Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: a statistical approach, Book, Wiley & Sons, Ltd., 2011.

[К содержанию](#)