

УДК 531.383: 629.78

БАЙПАСНОСТЬ КАК АТРИБУТ ЖИВУЧЕСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В АНОМАЛЬНЫХ ПОЛЁТНЫХ СИТУАЦИЯХ© 2015 Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб

АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

Рассматривается фактор байпасности как основа обеспечения живучести космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) при аномальных полётных ситуациях (АПС), связанных с отказами бортовых систем (БС). Живучесть, как комплексное качество, декомпозируется на частные свойства: неуязвимость, адаптивность и восстанавливаемость. Принципы реализации частных свойств в полёте КА базируются не только на конструктивных мероприятиях (например, защита), но и на управлении техническим состоянием БС. При этом используются не только встроенные структурные резервы, но и байпасы на основе других видов ресурсов. Целью байпасного управления при АПС является обеспечение живучести и целевого функционирования КА ДЗЗ с помощью минимальных дополнительных средств. Для этого применяются обходные пути достижения целей, т.е. байпасы, формируемые на основе функциональных, информационно-аналитических и естественных ресурсов, присущих БС по определению, и эмерджентных (синергетических) ресурсов, возникающих в результате целенаправленного взаимодействия разнородных частей целого, в частности, совокупности БС в составе КА. Актуальность задачи обеспечения живучести возрастает по мере снижения габаритно-массовых параметров КА ДЗЗ, связанных с ужесточением ограничений и увеличением длительности активного существования при сравнительно высоких требованиях по целевым показателям эффективности (ЦПЭ). Предлагаются варианты использования доступных видов избыточностей БС для байпасного управления в полёте КА ДЗЗ с учётом изменения ЦПЭ в установленных пределах. Представлены схемы получения оценок эффективности и живучести как векторных показателей, так и численных оценок на основе байпасов, в том числе опирающихся на показатели и критерии живучести БС. Показана возможность формирования с их помощью требований к бортовым системам в обеспечение живучести КА в аномальных полётных ситуациях.

Дистанционное зондирование Земли, автоматические космические аппараты, бортовые системы, аномальные полётные ситуации, байпасы, живучесть, деградация целевых показателей.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-17-37

Введение

В настоящее время при проектировании сложных технических систем (СТС), включая авиационные и космические, обычно исходят из концепции надёжности, которая опирается на общепринятые положения теории надёжности, отработанные методики и расчётные схемы, регламентированные ГОСТ [1,2]. Известно, что с увеличением объёма выборки (статистического материала) достоверность вероятностных оценок в теории надёжности возрастает. В космической технике, несмотря на большой объём наземных испытаний, учесть все возможные факторы возникновения АПС не представляется возможным. Многие космические эксперименты (например, КА

«Фобос-Грунт») по своей природе являются уникальными, готовятся многие годы и рассчитаны на проведение в течение продолжительного времени. То же самое можно сказать и о современных космических аппаратах дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), которые разрабатываются в течение нескольких лет и рассчитываются на время активного существования в течение 10 и более лет. По существу КА ДЗЗ оказываются продуктом мелкосерийного и даже единичного производства, их стоимость значительно возрастает, а вероятностные оценки надёжности становятся слабо обусловленными. В то же время высокую актуальность сохраняют вопросы обеспечения устойчивого целевого функционирования КА ДЗЗ на всём интервале активного су-

ществования T_{ac} , в том числе при АПС из-за отказов БС. В этой связи помимо повышения надёжности работы БС на первый план выходят задачи обеспечения живучести БС и КА в целом. В теории надёжности развиты методы отказоустойчивого функционирования за счёт структурного резервирования компонентов КА («холодное» или «горячее» резервирование), мажоритарной логики и др. Однако в условиях жёстких массоэнергетических ограничений такой подход осуществить для всех компонентов КА затруднительно. Поэтому в теории живучести помимо структурного резервирования развиваются подходы, связанные с эффективным использованием ресурсов других видов, а именно информационных, функциональных, временных. Некоторые подходы, основанные на принципе Бьесиота и использовании информационных ресурсов (переход БС при АПС к устойчивым состояниям), развиты в работах [3-7].

В данной работе рассматривается подход, связанный с формированием при АПС обходных путей выполнения основных функций КА ДЗЗ. Задача состоит в том, чтобы отыскать приемлемые бортовые ресурсы и продуктивные способы их применения в АПС для осуществления целевых функций бортовых систем, учитывая различие методов и средств построения их основных контуров. Такой подход будем называть байпасным, а сами обходные пути – байпасами. Понятие «байпас» происходит от английского слова *bypass* – обход, обвод. По сути, это дополнительный путь – в обход, например, поражённого участка. Частным случаем байпаса является шунт от английского слова *Shunt* – ответвление.

Принципы реализации байпасности для АПС КА ДЗЗ

В общем случае целевое функционирование КА ДЗЗ может происходить как в расчётных или «нормальных» условиях полёта, так и в аномальных ситуациях, связанных с отказами БС. При этом

аномальные полётные ситуации можно условно разделить на два класса:

- расчётные, или «проектные», последствия которых можно заранее оценить и предусмотреть их парирование;
- нерасчётные АПС, последствия которых плохо предсказуемы ввиду неопределённости причин, их вызывающих [5,6].

Для обеспечения функционирования КА ДЗЗ в нормальных условиях полёта широко используются методы теории надёжности, которые базируются на вероятностных оценках работоспособности бортовых систем, исходя из безотказности их элементов, а также с учётом свойства отказоустойчивости [1,2].

Отказоустойчивость системы при этом понимается как её способность при отказах элементов сохранять структуру и требуемое качество функционирования в заданных условиях. В нормальных (расчётных) условиях она оценивается при отказах, вызванных старением элементов, технологическими и производственными дефектами и другими факторами. При этом восстановление системы осуществляется, как правило, за счёт встроенных структурных резервов, находящихся в «горячем» режиме. Применение «холодного» резервирования зависит от наличия и характера временной избыточности и опирается на принципы обеспечения живучести систем.

Живучесть системы характеризуется как её способность при отказах элементов сохранять в определённых пределах качество функционирования или восстанавливать такую способность путём изменения структуры на ограниченном интервале времени. Отсюда следует, что сущность свойства живучести отражается ключевыми понятиями «сохранение» и «восстановление» [2-4].

Под **живучестью** КА ДЗЗ будем понимать его свойство сохранять «состояние способности» к целевому функционированию при отказах БС, вызываемых повреждениями и сбоями компонентов, или восстанавливать такую способность за счёт внутренних ресурсов (избыточно-

стей), сохранившихся при АПС, с помощью восстановительных мероприятий в течение установленного ограниченного интервала времени. Реализация совокупности таких восстановительных мер поддерживается рядом проектных мероприятий, общая схема которых представлена на рис. 1.

Следует отметить, что многие элементы этой схемы могут совпадать или быть общими с процессами, которые сложились в практике обеспечения работоспособности КА ДЗЗ, исходя из достижения расчётных (заданных) уровней надёжности БС.

К их числу относятся следующие процедуры:

- подготовка перечня возможных отказов всего комплекса БС КА. Эта работа проводится при активном участии смежных предприятий – разработчиков и изготовителей компонентов БС, в основном бортовой аппаратуры (БА);

- анализ возможных отказов БА и их влияния на БС с учётом критичности бортовых элементов, вероятности появления каждого отказа и степени его воздействия на другие системы;

- обоснование решения об уровне вероятности безотказной работы компонентов каждой БС, принципов формирования резервов БС в обеспечение требуемой надёжности КА ДЗЗ (по техническому заданию заказчика).

Таким образом, живучесть КА ДЗЗ, оцениваемая в аномальных условиях полёта (расчётных и нерасчётных), отражает мероприятия по парированию отказов его БС, возникающих из-за сбоев и отказов компонентов.

Ввиду подобия условий, возникающих при АПС, в сущности понятий надёжности, отказоустойчивости и живучести есть общие черты, что отображается в табл.1 возможными сферами их применения.

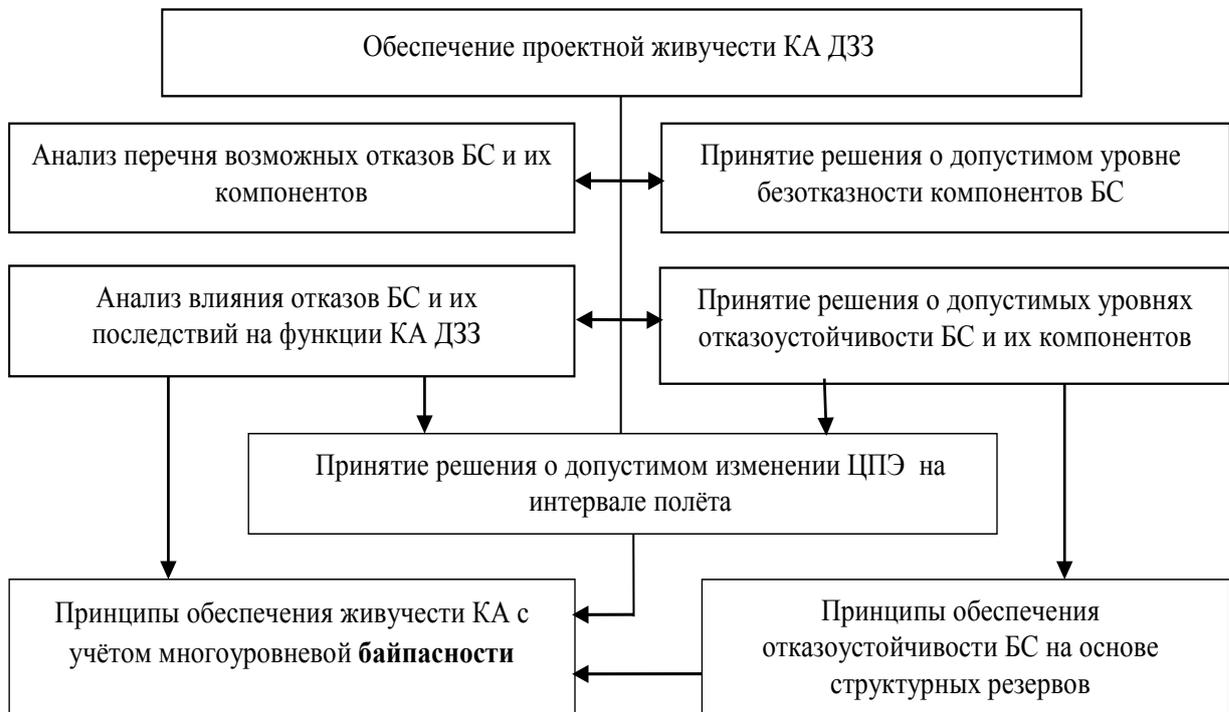


Рис. 1. Схема проектных мероприятий по обеспечению живучести КА ДЗЗ в полёте

Таблица 1. Условия преимущественного применения различных концепций

Условия работы Состояния	Нормальные (расчётные)	Аномальные (расчётные)	Аномальные (нерасчётные)
Работоспособности БС	Надёжность БС (безотказность БА)	-	-
Поддержание работоспособности БС	Отказоустойчивость БС («горячее» резервирование структурных компонентов)	Отказоустойчивость БС («холодное» резервирование структурных компонентов, временная избыточность)	Живучесть БС (временная и функциональная избыточность, байпасные каналы)
Способности КА ДЗЗ к целевому функционированию	Штатные	Живучесть КА ДЗЗ (байпасы на основе временной, структурной и функциональной избыточности БС)	Живучесть КА ДЗЗ (байпасные контуры, синергетические свойства Σ БС)

В аномальных расчётных условиях свойства отказоустойчивости и живучести систем практически совпадают. При реализации байпасов с помощью традиционных схем структурного резервирования компонентов возможно применение резервов либо в «горячем» режиме, либо в «холодном» режиме, но при наличии временной избыточности в процессах функционирования.

В аномальных нерасчётных условиях полёта отказоустойчивость систем не реализуется из-за невозможности сохранения структуры и поведения БС. При этом живучесть КА ДЗЗ может обеспечиваться за счёт байпасов, которые формируются не только на основе типовых ресурсов БС (структурных, функциональных, информационных, временных). Наряду с ними могут использоваться ресурсы иного плана, например, естественные ресурсы, т.е. присущие некоторым системам по определению, а также синергетического типа, возникающие при целенаправленном взаимодействии различных систем.

В общем случае, как показано на рис. 2, байпасы могут формироваться на любом уровне иерархической структуры выполнения задач назначения КА ДЗЗ. Например, байпасные каналы в БС, байпасные контуры в составе КА, резервные

КА как байпасы для выполнения целевых задач космической системы наблюдения.

Сущность применения байпасов состоит в том, чтобы с их помощью оперативно осуществлять мероприятия по противодействию проявившимся АПС, их парированию, т.е. нейтрализации последствий, вызванных отказами БС, обеспечивая тем самым живучесть КА ДЗЗ с возможностью реанимации целевого функционирования.

Байпасы разрабатываются либо заранее на этапе проектирования штатных средств БС, когда закладываются структурные или функциональные резервы, либо в оперативном порядке после появления АПС. В любом случае их структура и совокупность формируются исходя из концепции многоуровневой байпасности. Прежде всего, это уровни бортовых систем и их компонентов, далее следует уровень КА как совокупность всех БС, включая бортовой комплекс управления (БКУ). Затем главный уровень – наземный комплекс управления (НКУ), обладающий мощными техническими и управленческими ресурсами, а также возможностями привлечения к решению бортовых задач внешних факторов: искусственных или естественных физических полей; наземных испытательных средств и отладочных комплексов.

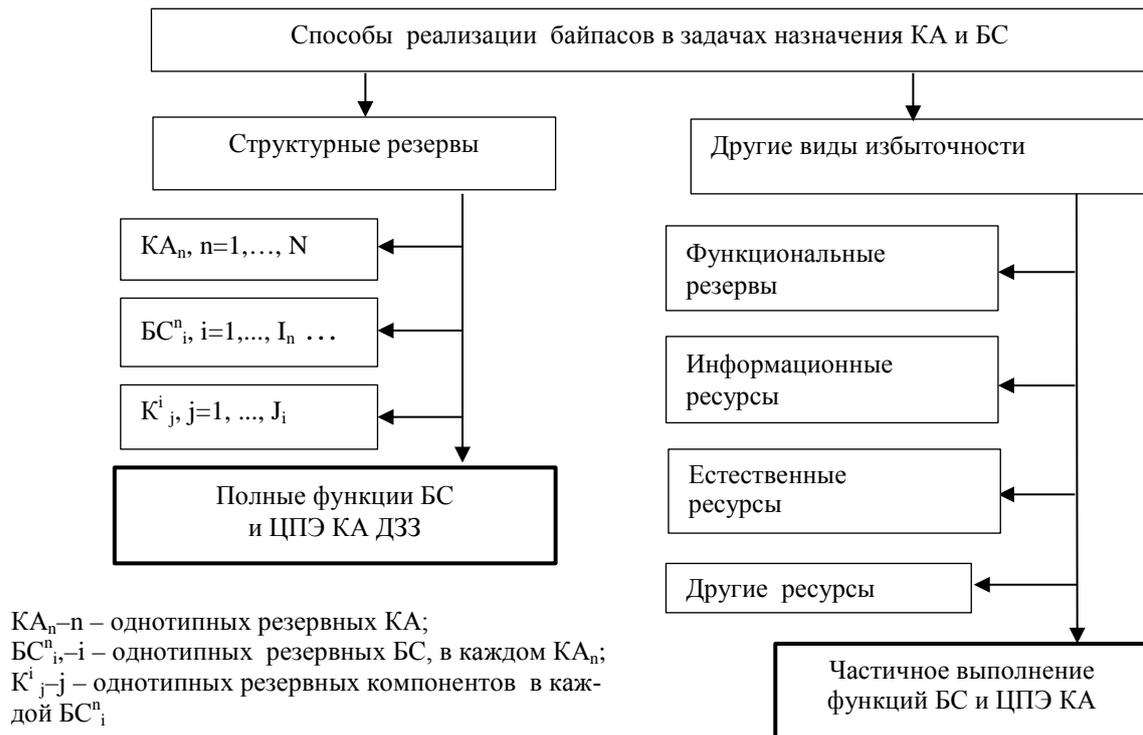


Рис. 2. Обходные пути выполнения задач назначения БС и КА ДЗЗ

На всех этих уровнях, наряду с встроенными в БС штатными резервами всех видов, используются и их синергетические возможности с учётом принципа комплексного применения естественных ресурсов, когда штатные компоненты одних систем могут нештатно применяться для решения задач других БС. Кроме того, возможно построение байпасов и на основе принципа нетрадиционного применения различных физических полей. Например, звёздное, магнитное и гравитационное; инфракрасное излучение, а также искусственные навигационные поля (в частности GPS, ГЛОНАС).

Магнитное поле Земли может быть использовано для байпасов измерительных (ориентации в пространстве) и силовых (стабилизация, переориентация) бортовых средств. Звёздные поля можно использовать не только для обеспечения ориентации КА в пространстве, но и для решения задач калибровки и юстировки бортовых измерительных средств и целевой аппаратуры (ЦА), а также геометрической увязки их измерительных осей.

Таким образом, в общем случае, байпасы, как обходные пути выполнения задач назначения систем, можно представлять как некие структуры, дополняющие основной контур реализации целевых функций и обеспечивающие при отказах его компонентов возможность достижения заданных целей. Следовательно, байпасность является основным атрибутом живучести КА ДЗЗ и его бортовых систем.

Правило 1 (байпасность – принцип поддержания живучести). В обеспечение живучести систем при отказах компонентов основного контура реализации задач назначения следует предусматривать обходные пути их выполнения – байпасы.

Отметим, что в нерасчётных (аномальных) полётных условиях, связанных с отказами БС, достижение максимальных значений ЦПЭ оказывается проблематичным ввиду неясности последствий АПС и наличия ресурсов. Первоочередной задачей становится нейтрализация последствий АПС, а затем воссоздание (реанимация) целевого функционирования исхо-

дя из принципа управления живучестью КА ДЗЗ с помощью байпасов, формируемых из всех видов бортовых ресурсов, сохранившихся при АПС.

В таком случае продуктивным является сам факт реанимации процесса целевого функционирования КА ДЗЗ, хотя и при сниженных значениях ЦПЭ относительно исходных.

На рис. 3 представлена совокупность средств, обеспечивающая возможность реализации таких байпасов. При этом использованы следующие обозначения: ЭРИ – электрорадиоизделия; БПО – бортовое программное обеспечение; СГК – силовой гироскопический комплекс; ИК ПМВ – инфракрасный построитель местной вертикали; ССН – спутниковая система навигации; БА – бортовая аппаратура.

Эти средства содержат основные виды ресурсов, встраиваемых в БС, и некоторые синергетические возможности, а также принципы и общую схему выполнения задач назначения на всех структурных уровнях.

Наиболее значимым и результативным представляется так называемый **адаптивно-компенсаторный** подход к обеспечению живучести. Он базируется на актуализации (задействовании) в АПС компенсаторных механизмов, которыми могут обладать все бортовые средства с учётом их наличных ресурсов, оставшихся после нейтрализации предыдущих АПС.

В общем случае, основой компенсаторного подхода является комплексное использование отдельных компонентов различных БС или их элементов (БА и ЭРИ), обладающих некоторыми потенциальными ресурсами (явными или скрытыми).

Сущность адаптивно-компенсаторного подхода к управлению живучестью КА в АПС состоит в том, что функция отказавшей БС (или её БА) заново воссоздаётся (регенерируется) в процессе полёта на основе наличных бортовых ре-

сурсов и соответствующих компенсаторных механизмов.

Эти механизмы могут быть либо явными, использующими известные встроенные функциональные резервы БС, включая естественные (присущие им по определению), либо скрытыми, т.е. неизвестными или не выявленными заранее ресурсами, в том числе синергетическими возможностями.

Явные компенсаторные механизмы могут формироваться либо оперативно в процессе полёта, либо заранее в виде паттернов с заготовками типовых решений как вариантов байпасов, исходя из назначения систем и характера бортовых ресурсов.

Скрытые компенсаторные механизмы выявляются, как правило, непосредственно в процессе полёта КА ДЗЗ, исходя из результатов идентификации текущего состояния БС и возможных, хотя бы и маловероятных, бортовых ресурсов для реанимации целевого функционирования. Для управления живучестью в АПС важным ресурсом являются синергетические свойства систем как совокупности их компонентов.

В качестве типовых встроенных ресурсов наряду со структурными резервами рассматриваются следующие:

- функциональное резервирование, когда при отказах элементов БС используются свойства системы обеспечивать требуемое функционирование за счёт перераспределения функций и дополнительных нагрузок на БА и её ЭРИ и путём изменения программно-алгоритмических компонентов БС. Например, вместо отказавшего СГК использовать (хотя бы временно) управляющие ракетные двигатели малой тяги (УРД МТ) с увеличением как числа их включений, так и расхода рабочего тела, причём со снижением точности ориентации КА;

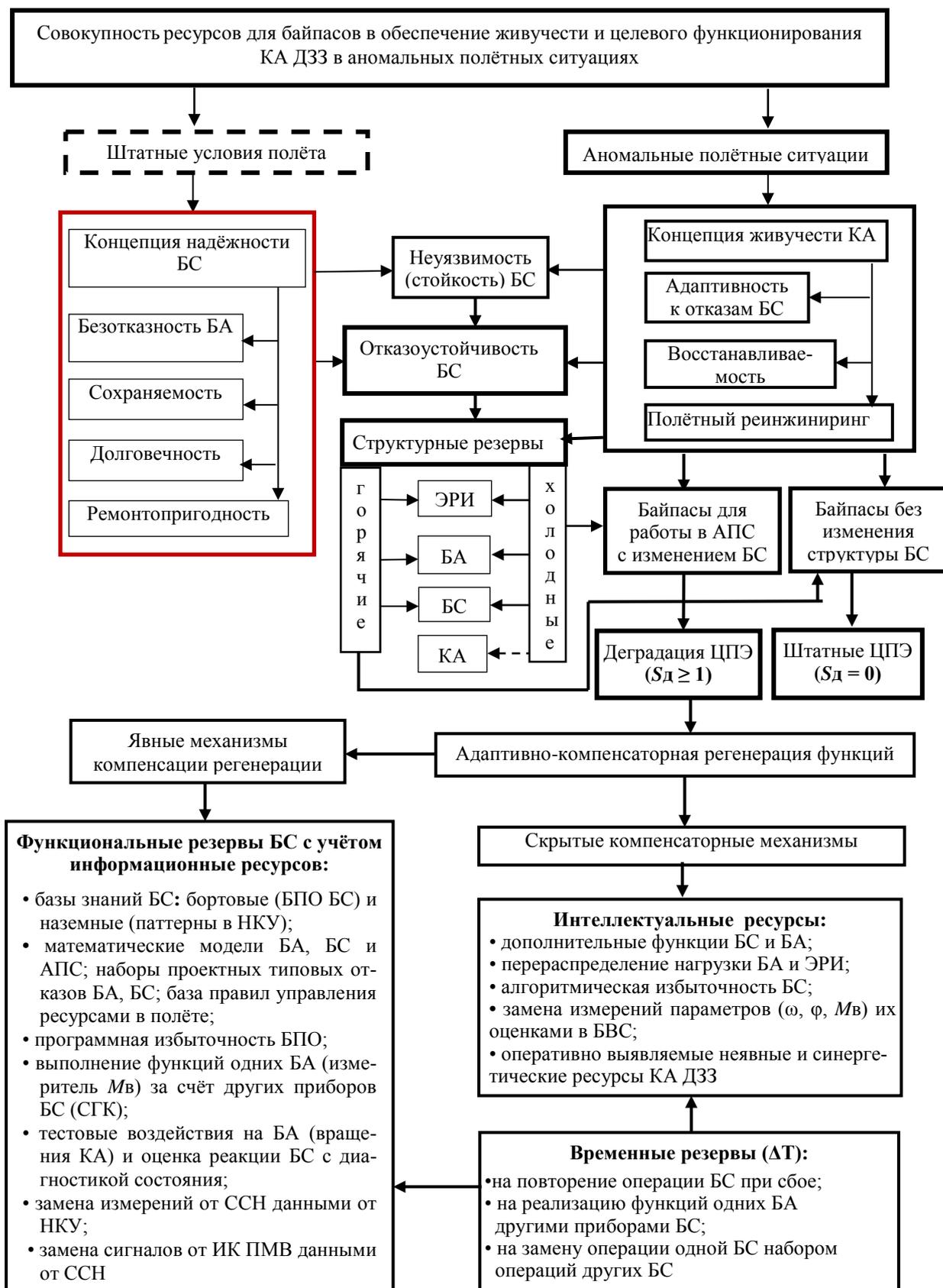


Рис.3. Обобщённая модель ресурсов для байпасов в обеспечение живучести и целевого функционирования КА ДЗЗ в аномальных полётных ситуациях (S_d - степень деградации целевых показателей)

- информационное (включая аналитическое) резервирование. Использование избыточной информации (сверх минимально необходимого объёма данных) для выполнения задачи назначения. Например, использование алгоритмов реализации функций одних БА за счёт обработки данных других приборов БС (в частности, вместо измерителя момента внешнего возмущения $Mв$ использовать или углы между роторами силовых гироскопов в спарке, или скорость вращения ротора электродвигателя-маховика; вместо датчика углов ориентации ϕ использовать интегралы сигналов с датчиков угловой скорости ω);

- интеллектуальное (интеллектуальное) резервирование. Основой являются алгоритмы встроенной самоорганизации с использованием баз знаний: бортовых (в бортовом программном обеспечении БС) или наземных (паттерны в НКУ). Они содержат наборы типовых отказов БС с правилами (алгоритмами) управления ресурсами БС для парирования АПС; бортовые и наземные математические модели БС и БА; когнитивные матрицы в БПО БС и т.п.;

- временное резервирование. Сокращение (уплотнение) длительности выполнения совокупности определённых функциональных операций в полёте, а также использование встроенных запасов (резервов) времени на повторение операции БС (при сбое) или для замены операции одной системы набором операций других БС.

Важным фактором при управлении живучестью в АПС могут служить потенциальные ресурсы, выявляемые не только на этапе проектирования отдельных компонентов БС (и пока неиспользуемые), но и отыскиваемые целенаправленно непосредственно в процессе полёта КА, в том числе, на основе комплексного использования всех видов встроенных ресурсов бортовых средств. Кроме того, вследствие взаимодействия различных БС в составе КА могут возникать так называемые синергетические явления, при которых по-

являются новые свойства и ресурсы эмерджентного характера, не присущие отдельным системам.

Эти дополнительные ресурсы можно использовать для формирования соответствующих байпасов. По сути, такие байпасы можно рассматривать как структурные компоненты в составе КА ДЗЗ, которые в АПС можно использовать для целенаправленной реализации его функций живучести с реанимацией целевого функционирования.

Многие из этих ресурсов можно рассматривать в качестве базовых факторов при проектной реализации байпасных контуров.

Например, наведение на Солнце панелей солнечных батарей (ПСБ) при отказе их штатных автономных приводов может осуществляться нештатно с помощью байпасного контура, использующего штатную систему управления ориентацией (СУО) КА. Применение штатной магнитной системы сброса кинетического момента (МССКМ) в качестве нештатного многомерного исполнительного органа СУО при выставке КА из произвольного положения в заданное.

Возможно нештатное использование силового гироскопического комплекса (СГК) в качестве измерителя внешнего возмущающего момента $Mв$; нештатное применение штатных ПСБ в качестве аэродинамических поверхностей для управления положением центра давления КА с целью компенсации $Mв$ или разгрузки СГК от накопленного момента $Mг = f(Mв)$; нештатное применение УРД МТ вместо штатных силовых гироскопов для режима экспонирования целей; нештатное применение УРД МТ вместо штатных двигателей большой тяги (УРД БТ), предназначенных штатно для оперативного перенацеливания и выставки из произвольного положения в заданное; формирование алгоритмов определения текущих данных об ориентации и навигации КА по параметрам движения изображения в фокальной плоскости ЦА; нештатное определение ориентации КА по сигналам с

двух бортовых антенн спутниковой системы навигации (ССН); использование для определения положения КА в пространстве наземных измерительных средств НКУ вместо отказавших штатных бортовых устройств ССН; формирование алгоритмов с типовыми тестами (угловые движения, известный набор программных данных, сигналов) для выявления и отключения от управления отказавшего прибора с последующей его адекватной заменой.

Следует подчеркнуть, что применение структурных резервов БС хотя и обеспечивает в АПС возможность достижения максимальных (штатных) значений ЦПЭ, но связано с проблемой реализации расчётных (штатных) условий функционирования БС во время всего полёта КА ДЗЗ. Решение этой проблемы при времени активного существования более пяти лет оказывается проблематичным ввиду непредсказуемости внешних воздействий, включая космические излучения [3].

В таких случаях представляется целесообразным либо заранее устанавливать допустимые пределы изменения (деградации) целевых показателей систем в АПС исходя из характера вызываемых негативных последствий, либо изыскивать (в условиях ограничений) необходимые ресурсы для реструктуризации БС и реанимации процессов целевого функционирования КА ДЗЗ.

Принципы реализации живучести КА ДЗЗ с использованием байпасов

Живучесть КА ДЗЗ можно характеризовать совокупностью частных свойств, как это принято для СТС [3,9]. Главными из них являются: неуязвимость, адаптивность, восстанавливаемость. Основные принципы их реализации представлены на рис.4, где привлечены следующие обозначения: ЭВТИ – экранно-вакуумная термоизоляция; РМВ – реальный масштаб времени; НП – неориентированный полёт; ОДП – ориентированный дежурный полёт; АСУ – автоматизированная система

управления; ТМИ – телеметрическая информация; БКУ – бортовой комплекс управления; НКУ – наземный комплекс управления; БПО – бортовое программное обеспечение; ПСБ – панели солнечных батарей; РП – рабочая программа.

Первый атрибут – **неуязвимость** (или непоражаемость) – характеризует свойство КА сохранять состояние работоспособности при воздействии повреждающих факторов (ПФ), когда параметры внешних или внутренних воздействий превышают значения, на которые рассчитаны компоненты БС при проектировании. В общем случае непоражаемость реализуется на основе повышения стойкости БС и компонентов путём применения защитных средств, а также обеспечения отказоустойчивости БС за счёт структурной избыточности компонентов.

Следует отметить, что неуязвимость характеризует также свойство КА сохранять состояние работоспособности при получении повреждений БС из-за сбоев и отказов их компонентов. Количество таких повреждений определяется стойкостью БС, а их влияние на состояние работоспособности КА зависит от степени структурной избыточности БС. При этом стойкость и структурную избыточность БС можно рассматривать в качестве частных характеристик неуязвимости КА.

Мероприятия, направленные на снижение уязвимости БС от ПФ среды функционирования, реализуются, в основном, разработчиками БА, в частности, путём применения защиты от воздействия космических излучений. Например, за счёт установки специальных экранов для отдельных ЭРИ или всей БА, выбора материала и его толщины для корпуса БА, выбора структурной схемы БА и топологии с учётом дублирования, в частности, пространственное разнесение линий связи и др. [3,5]. Возможны также и дополнительные меры по защите или снижению уязвимости БА в составе БС.

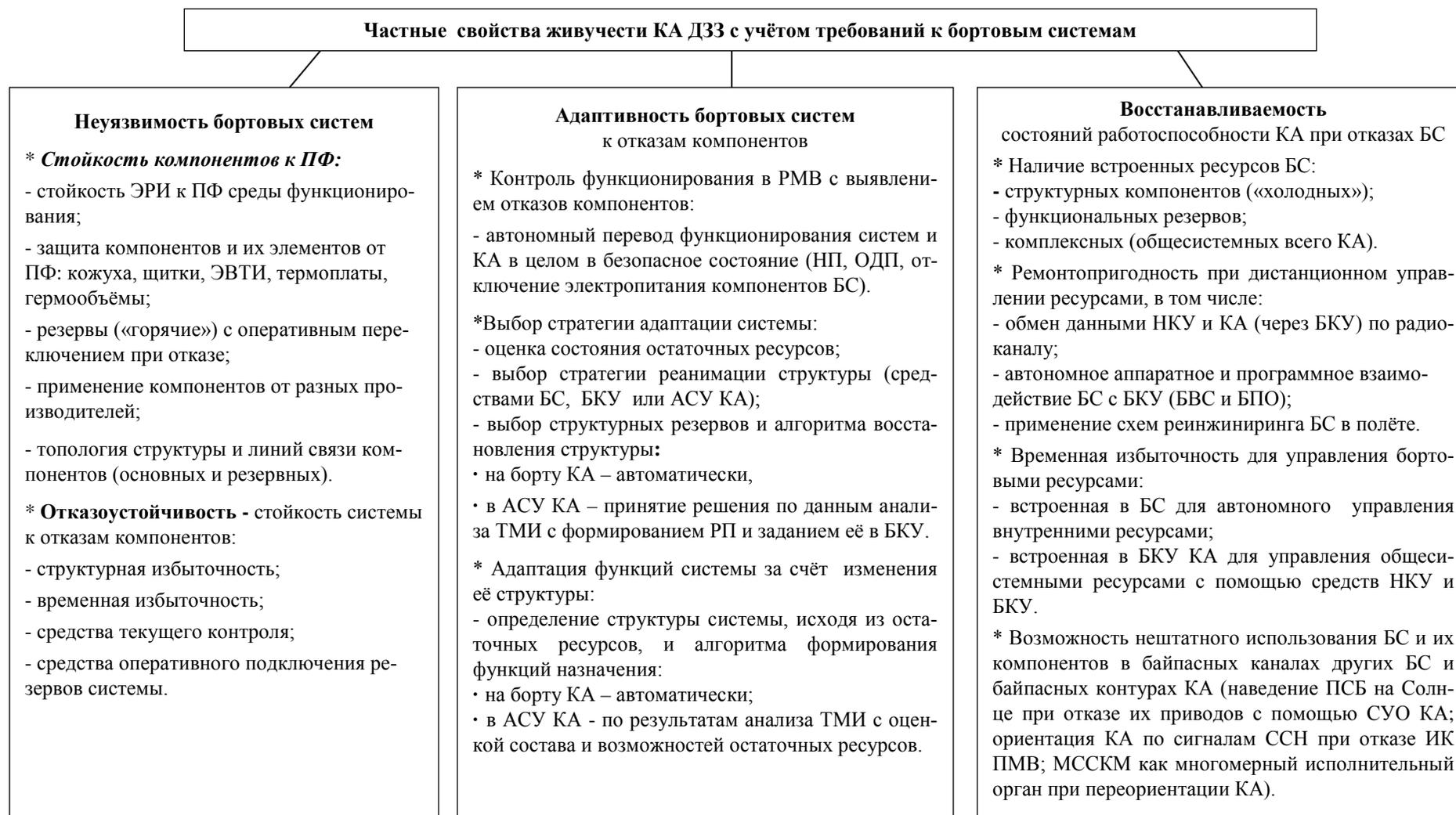


Рис. 4. Общие принципы реализации частных свойств живучести КА ДЗЗ

Стойкость БС – это свойство сохранять состояние работоспособности при воздействии ПФ на компоненты системы. Этот показатель всегда увязывается с физической природой ПФ: водостойкость, радиационная стойкость, вибростойкость, термостойкость, которые, как правило, указываются в технических заданиях на разработку аппаратных компонентов БС.

Структурная избыточность системы, как атрибут её неуязвимости, характеризует сохраняемость состояния работоспособности БС за счёт применения резервных компонентов.

Количественной мерой неуязвимости системы может служить степень её структурной избыточности, определяемая как отношение числа элементов систем к минимально необходимому их числу для выполнения функций системы.

Второй атрибут – **адаптивность** – отражает мероприятия, обеспечивающие свойство адаптации БС к отказам компонентов. Сущность этих мероприятий состоит в формировании необходимой и достаточной избыточности в составе каждой БС исходя из действующих ограничений, а также с учётом выбранной топологии.

В качестве избыточных ресурсов БС рассматриваются структурные резервы – дублирование (иногда троирование) критических компонентов, а также разнообразные функциональные ресурсы (информационные и временные резервы). При формировании избыточности БС целесообразно применять компоненты (аппаратные и программные) от разных разработчиков и производителей, исходя из принципа многообразия. Это позволяет исключать катастрофическое влияние типовых конструкторских и производственных дефектов и технологических ошибок на работоспособность систем.

Адаптивность можно рассматривать как свойство КА предотвращать развитие АПС и формировать с учётом остаточного ресурса состояние работоспособности на основе принципов приспособления (адаптации) структуры и функций БС к условиям, которые привели к АПС, т.е. париро-

вать её. Цель адаптации на этапе парирования АПС состоит в сохранении остаточного ресурса БС от вторичных поражений (короткого замыкания, развития пожара и др.).

Принцип приспособления (адаптации) структуры БС к условиям АПС базируется на использовании встроенных структурных резервов компонентов назначения, что позволяет сохранять и структуру, и функции, и показатели БС и, следовательно, штатное функционирование КА ДЗЗ. В зависимости от состояния этих резервов («горячий» или «холодный») управление процессом адаптации БС осуществляется либо автономными бортовыми средствами (БКУ), либо с привлечением средств НКУ.

Принцип приспособления функций БС к условиям функционирования в АПС базируется в основном на использовании функциональных ресурсов. Это могут быть байпасные каналы, причём либо встроенные в бортовые системы (с учётом БКУ), либо формируемые в оперативном порядке с помощью НКУ. Средства адаптации, являясь, по сути, инструментом управления в АПС, проводят оценку остаточного ресурса БС, формируют на его основе изменённую структуру и организуют её функционирование. При этом возможно изменение характеристик БС и, следовательно, показателей КА ДЗЗ.

Третий атрибут – **восстанавливаемость** – характеризует приспособленность БС к восстановлению (реанимации) КА ДЗЗ для целевого функционирования за счёт внутренних ресурсов в течение времени, которое допустимо по условиям решения задачи. Восстановление может быть прямым или возвратным.

Прямое восстановление (без возврата к прошлому состоянию) состоит в своевременном обнаружении отказа и устранении его последствий путём приведения БС в работоспособное состояние за время, не превышающее допустимое для задержки выполнения текущей операции. Прямое восстановление возможно, как правило, только для предусмотренных за-

ранее отказов и при обеспеченности техническими ресурсами и временной избыточностью.

Возвратное восстановление отражает состояние, когда технические ресурсы в БС есть, но нет резерва времени, что может приводить к нарушению текущего процесса. При этом возможность восстановления в дальнейшем сохраняется, но с обязательным возвратом в исходное состояние, т.е. в начало прерванного процесса.

В общем случае формирование состояния работоспособности КА достигается либо путём адаптации остаточного ресурса БС, либо путём восстановительного ремонта отказавших компонентов, исходя из текущего состояния встроенных резервов, в том числе с использованием байпасов как функциональных ресурсов. Для этого формируются средства управления техническим состоянием БС и встроенными резервами, в частности, на основе технологии полётно-реинжиниринга КА ДЗЗ, что позволяет адекватно реагировать на АПС с последующей реанимацией целевых функций [3,6,7]. Восстановительный ремонт на практике возможен лишь в случае, когда отказавшим компонентом КА ДЗЗ является некий программный модуль в составе БПО бортовой системы или её компонент. Частными характеристиками свойства восстанавливаемости являются временная избыточность и ремонтпригодность.

Временная избыточность $T_{и}$ понимается как резерв времени, в течение которого могут быть проведены восстановительные мероприятия (ремонт БС в составе КА или компонентов БС) без ущерба в решении функциональных задач (т.е. $T_{и} \leq T_3$, где T_3 – время, заданное для решения этих задач).

Ремонтпригодность КА ДЗЗ и любой бортовой системы в условиях АПС основывается на имеющихся в их составе средствах диагностического обеспечения (идентификации) и восстановления состояния работоспособности. Это возможно реализовать, например, с помощью рас-

пределённой системы управления живучестью КА ДЗЗ на основе технологии полётно-реинжиниринга с учётом методов обратной инженерии и механизмов «встроенной самоорганизации» [6,7].

Подходы и принципы оценки живучести КА ДЗЗ и его целевой эффективности в АПС с учётом байпасов

Будем исходить из того, что задача обеспечения живучести КА ДЗЗ с учётом его целевой эффективности в АПС сводится к управлению всеми сохранившимися бортовыми ресурсами, которые встроены в БС и технологические процессы, включая байпасы и временную избыточность.

Структурный резерв БС является здесь важным средством решения этой задачи. Во-первых, он допускает возможность целевого функционирования КА ДЗЗ и при отказах БС. Во-вторых, позволяет восстанавливать в АПС его исходные значения ЦПЭ за счёт проведения в полёте реструктуризации БС с помощью «холодных» структурных резервов, опираясь на возможность введения в бортовые технологические процессы временной избыточности.

В случае отсутствия структурных резервов в бортовых системах регенерацию процесса целевого функционирования КА ДЗЗ можно осуществлять с помощью байпасов, при формировании которых используются все доступные виды бортовых ресурсов (в первую очередь, функциональные). Тогда восстановление штатных показателей отказавших БС оказывается практически недостижимым. Поэтому каждый из вариантов байпасов характеризуется определённой степенью деградации (S_d) целевых показателей КА ДЗЗ. Кроме того, некоторые отказы компонентов, не вызывая полного нарушения работоспособности БС, могут ухудшать качество их работы, снижая тем самым ЦПЭ.

Под степенью деградации ЦПЭ будем понимать установленные (заданные)

значения N уровней деградации, то есть $S_d = N$, где $N = 0, 1, 2, \dots$.

В целом деградацию эффективности КА ДЗЗ можно регламентировать путём задания допустимых значений ЦПЭ, снижение которых может отражать переход БС (и КА) в другой класс, например, в класс частично работоспособных. Отсюда вытекает необходимость постулировать деградацию целевых показателей, а также регламентировать её в эксплуатационно-технической документации (ЭТД).

Правило 2 (принцип деградации показателей систем как атрибут байпасности): применение байпасов для обеспечения живучести систем при отказах основных компонентов, не имеющих структурного резервирования, связано с деградацией целевых показателей.

При АПС оценку степени соответствия текущего функционирования КА ДЗЗ и желаемого удобно проводить с помощью геометрической интерпретации целевых показателей в форме так называемой «звезды ориентиров». Для её построения можно использовать типовой набор ЦПЭ [3,4].

Пусть, например, ЦПЭ представляют собой совокупность следующих параметров:

- q_1 – линейное разрешение на местности;
- q_2 – оперативность получения целевой информации – суммарная длительность наведения на цель, её экспонирования, предварительной обработки и передачи данных по радиолинии в наземный специальный комплекс (НСК);
- q_3 – производительность в номинальных условиях функционирования;
- q_4 – оперативность выхода КА в заданный район зондирования – общая длительность процесса проведения манёвра до начала наведения на цель;
- q_5 – длительность активного существования (функционирования) T_{ac} .

Один из вариантов звезды ориентиров КА ДЗЗ, отражающий возможность деградации ЦПЭ в условиях АПС, приведён на рис. 5. Каждый луч этой звезды,

выходящий из центра окружности единичного радиуса, соответствует одному из ЦПЭ. По лучам откладываются в безразмерном виде значения заданных и текущих показателей. При этом концы векторов заданных значений ЦПЭ лежат на единичной окружности, а концы векторов их текущих значений, в общем случае, могут занимать на этих же лучах промежуточные положения от 0 до 1.

При штатном процессе эксплуатации ни один из показателей q_j не должен выходить за допустимые уровни деградации, которые определяются отрезками лучей диаграммы $O r_1^j - O r_2^j$ или разностью векторов $r_1^j - r_2^j$, эквивалентных, в свою очередь, значениям показателей – исходным (заданным) (q_j^H), а также предельно допустимым (q_j^D), отражающим их минимальный уровень, допустимый за время активного функционирования T_{af} , т.е. его деградацию из-за старения ЭРИ, выработки ресурса, отказов БА и накопленных повреждений в БС.

Заметим, что на практике, зачастую, фактическое время активного функционирования КА ДЗЗ T_{af} отличается от заданного при проектировании T_{ac}^B . Например, для КА «Ресурс-ДК» длительность $T_{af} > 3T_{ac}^B$.

Коэффициент эффективности КА ДЗЗ в момент $t \in T_{ac}$ можно определять отношением

$$K_3 = Q_T / Q_1,$$

где Q_T и Q_1 – площади фигур, отражающих текущие (q_j^T) и исходные (q_j^H) значения ЦПЭ, $j = \overline{1, J}$. Аналогично можно оценивать и уровень его живучести.

Для учёта влияния условий АПС на эффективность КА ДЗЗ оценку коэффициента K_3 можно увязать с взаимным расположением контуров площадей Q_T и Q_2 , так как, согласно правилу 2 о допустимости деградации ЦПЭ в АПС, площадь Q_2 отражает минимально допустимые значения ЦПЭ, которые они могут принимать на всём интервале T_{ac} . Если разность площадей $(Q_1 - Q_2) = \text{const}$ характеризует допустимую область изменения ЦПЭ

(их деградации), то разность площадей $(Q_T - Q_2) > 0$ отражает текущую степень живучести КА ДЗЗ и возможность целевого функционирования с допустимыми значениями ЦПЭ. При этом контуры фигур с площадями Q_T и Q_2 нигде не должны пересекаться.

Формально численные значения уровней текущей эффективности КА ДЗЗ

и его живучести можно получать из соотношения

$$K_3 = (Q_T - Q_2) / (Q_1 - Q_2) = D (Q_T - Q_2),$$

где $D = 1 / (Q_1 - Q_2) = \text{const}$ – коэффициент проектной эффективности КА ДЗЗ.

При $Q_T = Q_1$ уровни эффективности и живучести КА ДЗЗ в полёте соответствуют максимальным проектным (исходным) значениям. Будем считать их равными 1.

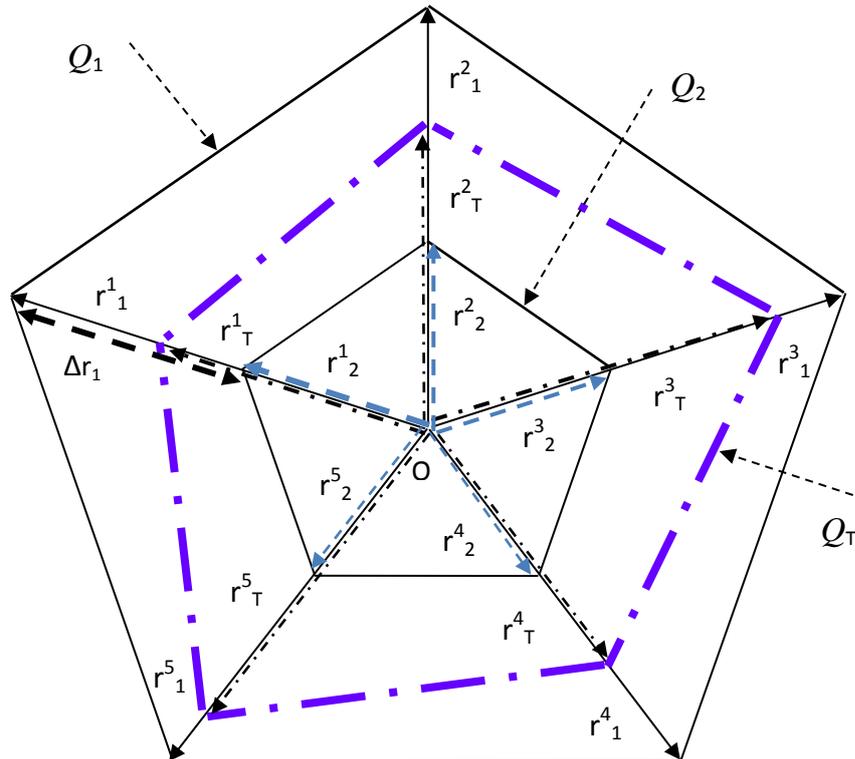


Рис. 5. Распределение показателей КА ДЗЗ:

$O r^j_T$ – текущее значение j -го показателя;

$\Delta r_j = O r^j_1 - O r^j_2$ – допустимое изменение j -го показателя на интервале $\Delta t \in T_{ac}$

При $Q_T = Q_2$ уровни эффективности и живучести КА ДЗЗ соответствуют проектному минимально допустимому уровню, который будем полагать численно равным нулю.

Если хотя бы один из ЦПЭ оказывается меньше допустимого значения, то это соответствует потере эффективности и живучести КА ДЗЗ, что требует принятия решения о характере дальнейшего функционирования КА ДЗЗ.

Таким образом, по текущим (измеренным или вычисленным) показателям

$q_j, j \in J$ можно получать численные значения степени соответствия текущей и требуемой эффективности КА ДЗЗ, а также оценивать уровень его живучести.

Будем также полагать, что при степени деградации $S_d = N = 0$ все ЦПЭ $q_j, j = 1, 2, \dots, J$ соответствуют максимальным значениям, которые рассматриваются как штатные. При $S_d = N \geq 1$ хотя бы один из этих показателей отличается от штатного значения на величину, большую заданной: $\Delta i_j \geq \Delta i_j^3$.

Пусть, например, для всякого $j \in J$ параметру $N=1$ соответствует значение $\Delta q_j^3 = 10\%$; а при $N=2$ – значение $\Delta q_j^3 = 20\%$ и т.д. соответственно.

Допустимость конкретных значений Δq_j^3 определяется на этапе проектирования исходя из требований технического задания, приемлемых методов и технических средств их реализации с учётом габаритно-массовых, энергетических и других ограничений, а также с учётом результатов исследования типовых отказов БС и их компонентов.

Кроме того, уровни деградации ЦПЭ Δq_j^3 могут устанавливаться непосредственно в процессе эксплуатации исходя из возникших повреждений БС, характера сохранившихся ресурсов, а также возможностей дальнейшего применения КА ДЗЗ в условиях АПС.

Всё это позволяет оперативно (в процессе полёта) определять соответствие текущих частных ЦПЭ их заданным значениям, а значит и степень живучести КА ДЗЗ как векторного показателя, чтобы своевременно принимать меры по парированию АПС. Однако с помощью коэффициента K_3 сравнивать по степени живучести различные системы затруднительно, так как одинаковые значения K_3 можно получать при различных значениях частных ЦПЭ, а следовательно, сложно обосновать предпочтение.

В теории известны и другие возможности количественного определения живучести технической системы [8,9]. Они, в основном, базируются на вероятностных оценках работоспособности систем. Поэтому во многих случаях, в частности, при управлении полётом КА ДЗЗ на этапе эксплуатации, их использование малопродуктивно.

При определении количественной меры живучести КА ДЗЗ можно опираться на численные оценки структурных резервов, например, как это принято для оценки свойства неуязвимости сравнительно простых систем [2].

Однако воспользоваться таким приёмом в рассматриваемом случае затруд-

нительно, так как КА ДЗЗ, являясь сложной системой, включает в себя множество разнотипных БС. Все их структурно резервировать в обеспечение штатных функций при АПС практически невозможно, особенно при жёстких массо-энергетических ограничениях. Кроме того, вследствие синергетических явлений, возникающих при взаимодействии БС в составе КА, появляются новые свойства и ресурсы эмерджентного характера, не присущие отдельным системам. Их можно использовать как дополнительные ресурсы при формировании соответствующих байпасов. Такие байпасы можно рассматривать как структурные компоненты в составе КА ДЗЗ, которые служат для целенаправленной реализации в АПС его функций живучести с реанимацией целевого функционирования.

Поэтому количественную меру живучести КА ДЗЗ, как и любой СТС, можно определять с помощью числа байпасов как структурных компонентов назначения в средствах обходного выполнения целевых задач (байпасных каналов или контуров). Практически все БС современных КА ДЗЗ могут оснащаться соответствующими байпасами.

Особенность байпасов, формируемых исходя из свойства эмерджентности, присущей совокупности бортовых систем КА, состоит в том, что их условно можно относить к той БС, задача которой выполняется за счёт такого байпаса. Например, штатные средства СУО, с помощью которых выполняется задача наведения на Солнце ПСБ при отказе их приводов, можно считать байпасом системы энергетического питания.

В ряде БС имеются и другие особенности, связанные с применением структурных резервов, в частности, при многоуровневом и многослойном резервировании в наиболее ответственных узлах или компонентах. Примером служат электронные компоненты в бортовой вычислительной системе, применяемой в качестве центрального звена БКУ.

Такого типа элементы обычно служат для реализации свойства отказоустойчивости системы и её надёжности. В то же время изменённые схемы БС (из-за введения новых связей при подключении резервных компонентов) можно рассматривать как структурные байпасы для обеспечения в АПС живучести соответствующих систем и КА в целом.

Следует отметить, что на уровне целевых систем (ЦС) вопросы применения байпасов для реализации в АПС желаемого (планируемого) целевого функционирования КА ДЗЗ являются более сложными из-за габаритно-массовых ограничений. Например, в многотонных оптико-электронных телескопических комплексах, применяемых на высокодетальных КА ДЗЗ (подобных «Ресурс-ДК»), возможно применение байпасов лишь отдельных компонентов или некоторых подсистем, причём, на основе структурного резервирования приёмно-преобразующих элементов (ПЗС-линеек или матриц), модулей памяти и других.

В любом варианте замены отказавшей штатной ЦС на некий функциональный байпас происходит изменение характера или качества решения тех целевых задач, ради которых разработан данный КА ДЗЗ. Это, по сути, означает изменение его целевого предназначения. Тем не менее, во многих случаях такое приемлемо, что служит основанием при проектировании сразу закладывать многовариантный или многоцелевой характер функционирования КА ДЗЗ на всём интервале T_{ac} .

Байпасом ЦС видового наблюдения может служить аппаратура радиолокационного и инфракрасного наблюдения или ЦС иного назначения (типа «Памела» на КА «Ресурс-ДК»). Тогда отказ одной ЦС приводит лишь к частичному невыполнению задачи назначения, что снижает эффективность его применения, но живучесть сохраняется, пока имеется хотя бы одна целевая система, которую можно рассматривать как структурный байпас основной системы.

Именно поэтому большинство КА, включая КА ДЗЗ, проектируются как многоцелевые объекты.

По контуру обеспечивающих систем к качеству оценки живучести КА можно принять коэффициент $K_{КА} = f(\sum K_{БС})$, который отражает зависимость живучести КА от совокупности коэффициентов живучести всех БС в его составе, т.е. $\sum K_{БС}$.

В общем случае получение такой зависимости для систем, различных по структуре и функциям, является нетривиальной задачей. Однако для многих прикладных задач допустимы упрощающие условия. Например, если принять, что вклад всех систем в обеспечение ЦПЭ и живучести КА является равноценным, то исходный коэффициент живучести целого определяется минимальным значением коэффициента живучести частного из всей их совокупности:

$$K_{КА} = \min K_{БС} \mid \sum K_{БС}$$

В этом случае усматривается возможность повышения общей живучести КА за счёт увеличения числа байпасов в каждой из БС. В других случаях, когда ранжируется значимость БС, это не столь очевидно.

Степень живучести бортовой системы, характеризуемую коэффициентом $K_{БС}$, можно определять как отношение числа байпасов B для этой системы к длительности функционирования системы T_{ϕ} ($T_{\phi} \in T_{ac}$) с установленными показателями $Q(t)$:

$$K_{БС} = (B) / (T_{\phi}) \mid Q(t)$$

Получаемое количество байпасов на единицу времени эксплуатации системы хотя и позволяет сравнивать различные БС по степени их байпасности (или живучести) на этапе проектирования, но малоэффективен в процессе эксплуатации, особенно для формирования и количественной оценки в полёте текущего уровня живучести КА ДЗЗ ($K_{КА}$).

При определении коэффициента живучести $K_{КА}$ естественно опираться на все возможные способы достижения целей: байпасы и ту часть основных контуров, которую можно считать структурными фрагментами двойного назначения. Они обеспечивают отказоустойчивость основного контура БС при сбоях и отказах, появляющихся при нормальных условиях функционирования (например, из-за производственных дефектов или старения ЭРИ), а также обеспечивают живучесть в условиях АПС, возникающих при отказах компонентов (например, из-за кратковременных нерасчётных воздействий повреждающих факторов среды функционирования, вспышках на Солнце и т.п.).

Общее число путей выполнения задач назначения БС равно:

$$N_{\Pi} = N_{O} + N_{B},$$

где N_{O} – число основных контуров выполнения задачи назначения; N_{B} – число бай-

пасов в обеспечение функционирования БС в АПС.

В первом приближении относительную оценку коэффициента живучести БС можно сформировать в виде

$$K_{БС} = N_{\Pi} / N_{O} = 1 + N_{B} / N_{O},$$

где $N_{O} \geq 1$, $N_{B} = 0, 1, 2, \dots$

Будем полагать, что некоторая система для выполнения задачи назначения имеет число основных контуров $C \geq 1$, а число байпасов $B \geq 0$. Тогда коэффициент живучести такой БС равен

$$K_{БС} = 1 + B / C.$$

При $0 \leq B \leq C$ имеем $1 \leq K_{БС} \leq 2$.

В табл. 2 приведены результаты возможных сочетаний байпасов и основных контуров.

Таблица 2. Показатель живучести системы при возможных сочетаниях основных контуров и байпасов

Число основных контуров БС, C	Число байпасов, B	Показатель живучести системы, $K_{БС}$	Интерпретация
1	0	1	Если в системе не предусмотрены байпасы, то её живучесть определяется отказоустойчивостью основного контура
1	1	2	Если система, имеющая один основной контур, оснащена одним байпасом, то её живучесть характеризуется коэффициентом 2
≥ 1	$B = C$	2	Коэффициент, равный 2, свидетельствует о наличии у каждого основного контура хотя бы одного байпаса в обеспечение живучести системы
≥ 1	$B > C$	2	Чем больше значение $K_{БС}$, тем больше байпасов реализовано для каждого основного контура системы и тем выше степень её живучести

Данные табл. 2 позволяют ещё на этапе проектирования систем целенаправленно формировать уровень их живучести, задавая значение коэффициента $K_{БС}$ исходя из критерия $K_{БС} \geq 2$, а также контролировать и поддерживать его на всех этапах производства и эксплуатации. При этом следует учитывать, что обеспечение показателя $K_{БС} > 2$ связано с привлечением дополнительных энергомассовых ре-

сурсов, что допустимо лишь для особо ответственных систем. В противном случае необходимо изыскивать возможности реализации байпасов за счёт синергетических свойств их компонентов, а также с учётом временной и информационной избыточности при одновременном решении вопроса о допустимой деградации показателей систем и целевых показателей КА ДЗЗ.

Рассмотрим следующий пример оценки живучести.

Подсистема определения трёхосной ориентации в составе СУО КА имеет два основных контура: средней (номинальной) и прецизионной точности. Первый выполнен на основе волоконно-оптических гироскопов, оснащённых корректором базового положения (базы), в котором применяется, как правило, инфракрасный построитель местной вертикали (ПМВ). Второй использует пару блоков оптических звёздных координаторов. Пусть каждый из этих основных контуров имеет по одному байпасу структурного типа, т.е. структурно подобного основному контуру. Тогда живучесть СУО можно оценить как $K_{СУО} = 1 + 2 / 2 = 2$.

Примем, что в подсистеме определения ориентации СУО КА имеется только один основной контур (средней точности) и три байпаса, один из которых структурно подобен основному контуру, а два других представляют собой однотипные прецизионные контуры, состоящие из пары БОКЗ каждый.

В этом варианте живучесть СУО оценивается как $K_{СУО} = 1 + 3 / 1 = 4$, т.е. выше.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Свойство живучести КА ДЗЗ, особенно в условиях жёстких энерго-массовых ограничений, может эффективно обеспечиваться с помощью байпасов как встроенных в бортовые системы, так и получаемых из-за синергетических эффектов и естественных свойств их совокупности.

2. Байпасность является мощным фактором обеспечения живучести КА ДЗЗ при АПС, связанных с отказами БС, и основой для реанимации процесса их целевого функционирования. Это реализуется не только за счёт структурных резервов (как в концепции надёжности), но и на основе иных компенсаторных механиз-

мов, когда функция отказавшей БС регенерируется заново в процессе полёта с учётом сохранившихся ресурсов.

3. Байпасность можно считать неотъемлемым атрибутом живучести всех СТС, таких как КА ДЗЗ и, в первую очередь, маломассогабаритных КА и микро-КА, в которых полное дублирование бортовых компонентов затруднительно, а иногда и невозможно.

4. Встроенные байпасы можно формировать на основе всех известных видов ресурсов БС: структурных, функциональных, информационных. Байпасы структурного типа обеспечивают возможность реанимации целевого функционирования КА ДЗЗ при штатных показателях. Байпасы других видов связаны с деградацией ЦПЭ, поэтому их следует определять и регламентировать заранее.

5. Для качественной оценки состояния живучести КА ДЗЗ можно использовать модифицированную звезду ориентиров, построенную на текущих значениях ЦПЭ и отражающую область их вариации в полёте от исходных значений до предельно допустимых при деградации в АПС.

6. Для количественной оценки живучести КА ДЗЗ можно использовать показатели живучести БС, которые базируются на байпасах. При $1 \leq K_{БС} < 2$ живучесть БС обеспечивается только за счёт встроенных средств реализации отказоустойчивости, а при $K_{БС} \geq 2$ – ещё и с помощью байпасов. Исходя из общей структуры и назначения системы можно формировать к ней требования по живучести, задавая значение коэффициента $K_{БС}$ и контролируя его выполнение на всех этапах жизненного цикла КА ДЗЗ.

7. Для КА ДЗЗ коэффициент живучести $K_{КА}$ можно оценивать, используя данные по живучести систем $K_{БС}$, определённые с учётом всех внутрисистемных и общесистемных ресурсов. При этом уровень живучести КА может определяться минимальным уровнем живучести БС из всей их совокупности: $K_{КА} = \min K_{БС}$.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1989. 32 с.
2. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. СПб.: Политехника, 2002. 155 с.
3. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Соллогуб А.В., Макаров В.П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных КА зондирования земли. М.: Машиностроение, 2010. 384 с.
4. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Проблемы обеспечения сбоеотказоустойчивости бортовой аппаратуры КА дистанционного зондирования Земли от воздействия излучений космического пространства. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 72-78.
5. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Принципы управления космическими аппаратами мониторинга Земли в аномальных ситуациях // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1. С. 16-22.
6. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Проблемы реинжиниринга автоматических КА в аномальных полётных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2014. № 1(43). С. 9-21.
7. Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллогуб А.В. Методы реинжиниринга в задаче обеспечения живучести автоматических КА зондирования Земли // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 3. С. 38-47.
8. Анцелович Л.Л. Надёжность, безопасность и живучесть самолёта. М.: Машиностроение, 1985. 296 с.
9. Новые наукоёмкие технологии в технике. Энциклопедия. Т. 20 / под ред. К.С. Касаева. М.: ЗАО НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2002. 331 с.

Информация об авторах

Ахметов Равиль Нургалиевич, доктор технических наук, генеральный конструктор АО «РКЦ «Прогресс», г.Самара. E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: проектирование и испытания ракетно-космической техники.

Макаров Валентин Павлович, доктор технических наук, научный советник АО «РКЦ «Прогресс», г.Самара.

E-mail csdb@samspace.ru. Область научных интересов: системы управления движением КА.

Соллогуб Анатолий Владимирович, доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «РКЦ «Прогресс», г.Самара. E-mail csdb@samspace.ru. Область научных интересов: моделирование ракетно-космических систем.

BYPASS AS AN ATTRIBUTE OF UNMANNED SPACECRAFT OPERABILITY IN ANOMALOUS FLIGHT SITUATIONS

© 2015 R. N. Akhmetov, V. P. Makarov, A. V. Sollogub

Space Rocket Center «Progress» JSC, Samara, Russian Federation

The bypass factor as the basis for providing Earth remote sensing spacecraft (ERS SC) operability in anomalous flight conditions, related with onboard equipment (OE) faults, is discussed in the paper. In addition, operability as a complex property is decomposed into three particular characteristics: invulnerability, adaptability, and recoverability. Principles of their implementation during the flight are based not only on structural provisions (for example, protective measures), but also on OE technical state control not only by integrated structural

reserves, but also by bypasses based on other resources. Provision of ERS SC operability and target operation with the use of minimum additional resources is the purpose of bypass control in anomalous flight situations. It is based mainly on roundabout ways of accomplishing tasks, in other words, on bypasses produced on the basis of functional, information-analytic, and natural resources (intrinsic to OE) as well as emergent (synergetic) resources formed as a result of purposeful interaction of dissimilar components, in particular, the complex of the SC onboard equipment. The topicality of this problem increases with the decrease of ERS SC weight-dimension characteristics (caused by tightening the restrictions) and the increase of active life duration (T_{al}) under relatively strict requirements of efficiency target (ET). Variants of using available OE redundancies for ERS SC bypass flight control, taking into account the change of ET within the set limits, are proposed in the paper. Schemes of numerical estimation of efficiency and operability as vector parameters on the basis of bypasses including those based on parameters and criteria of SC operability are presented. A possibility of forming requirements to onboard equipment to ensure SC operability in anomalous flight conditions with their help is shown.

Earth remote sensing, unmanned spacecraft, onboard equipment, anomalous flight situations, bypasses, operability, degradation of target parameters.

References

1. State Standard 27.002-89, Reliability in engineering. Main ideas. Terms and definitions. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. (In Russ.)
2. Stekolnikov Y.I. *Zhivuchest system* [Systems' operability]. Saint Petersburg: Polytekhnika Publ., 2002. 155 p.
3. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Sollogub A.V., Makarov V.P. *Metody obespecheniya zhivuchesti nizkoorbital'nykh KA zondirovaniya zemli* [Methods of ensuring operability of low-orbiting Earth remote sensing spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2010. 384 p.
4. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. Maintaining of Fault-Tolerant and Fail-Safe Behavior of Remote Sensing Satellite Onboard Equipment to Withstand Impact of Space Charged Particles. *Mechatronics, automation, control*. 2009. No. 11. P. 72-78. (In Russ.)
5. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. Principles of the Earth Observation Satellites Control in Contingencies. *Information and Control Systems*. 2012. No. 1. P.16-22. (In Russ.)
6. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. Problems of unmanned spacecraft reengineering in abnormal flight situations and their knowledge-based solutions. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No.1 (43). P. 9-14. (In Russ.)
7. Akhmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. Reengineering Methods for Remote Sensing Spacecraft Survivability Assurance. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. 2013. No. 3. P. 38-47. (In Russ.)
8. Antselovich L.L. *Nadezhnost', bezopasnost' i zhivuchest' samoleta* [Airplane reliability, safety and operability]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 296 p.
9. *Novye naukoemkie tekhnologii v tekhnike. Entsiklopediya. T. 20* [New high technologies in engineering. Encyclopedia. V. 20 / ed. by Kasaev K.S.]. Moscow: ZAO NII ENTSITEKH Publ., 2002. 331 p.

About the authors

Akhmetov Ravil Nurgalievich, Doctor of Science (Engineering), General Designer of Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail:

csdb@samspace.ru. Area of Research: designing and testing of space hardware.

Makarov Valentin Pavlovich, Doctor of Science (Engineering), Scientific Adviser of Space Rocket Center «Progress»,

Samara, Russian Federation. E-mail: csdb@samspace.ru. Area of Research: satellite motion control systems.

Sollogub Anatoliy Vladimirovich,

Doctor of Science (Engineering), Professor,

Senior Research Assistant of Space Rocket Center «Progress», Samara, Russian Federation. E-mail: csdb@samspace.ru. Area of Research: modeling of space rocket systems.