

КОНЦЕПЦИЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИВУЧЕСТЬЮ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В АНОМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

© 2009 Р.В. Ахметов, В.П. Макаров, А.В. Соллогу́б

ФГУП ГНПРКЦ “ЦСКБ - Прогресс”, г. Самара

Поступила в редакцию 04.02.2009

Рассмотрена проблема управления автоматических космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в аномальных ситуациях (АС), которая особенно актуальна при низко-высотном детальном зондировании, когда востребованы многократные перенацеливания КА в пределах ограниченного интервала наблюдения совокупности объектов (целей). В общем случае решение этой проблемы связано с интеллектуализацией процессов управления функционированием КА ДЗЗ. Для случаев, характеризующихся аномальными ситуациями (АС) на борту КА, исследуются возможности обеспечения живучести КА с помощью автономной системы управления техническим состоянием бортовых систем (БС), называемой системой управления живучестью (СУЖ). Представлена концепция автономного управления живучестью КА, общая структура и некоторые варианты построения СУЖ, отработанные в полёте.

Ключевые слова: Автоматические КА ДЗЗ, отказы бортовых систем, аномальная ситуация, эталонная модель, автономный анализ, диагностика, реанимация, система управления живучестью.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения по целевому назначению автоматических КА ДЗЗ при длительных сроках функционирования определяется во многом возможностью его БС противостоять АС, которые вызваны отказами структурных элементов - бортовой аппаратуры (БА) или бортового программного обеспечения (БПО). Это обеспечивается структурой БС и соответствующей организацией управления внутренними ресурсами БС с помощью средств бортового комплекса управления (БКУ) КА, обычно реализуемого в виде самостоятельного паттерна управления живучестью КА, который может включать в себя специализированные подсистемы, например, подсистемы контроля, диагностики и управления БС.

Основными являются следующие функции такой подсистемы. Постоянный контроль функционирования БС, выявление отказов их структурных элементов, управление БС с целью предотвращения развития выявленных отказов до необратимых (аварийных) последствий и компенсация их негативного влияния на штатные функции КА [1, 2, 3]. При этом, если при отказах обеспечивается сохранение штатных (заданных) характеристик БС, то такая подсистема

может считаться системой управления отказоустойчивостью. Если же обеспечивается частичное сохранение показателей БС, то она становится системой обеспечения её живучести или системой управления живучестью (СУЖ).

В любом из этих вариантов требуется введение в БС различного рода избыточности. В том числе: структурной (резервные элементы), функциональной (используется способность БС перераспределять функции между элементами), информационной (получение информации о состоянии систем по различным каналам), временной (использование резервных интервалов времени для выполнения ряда операций управления). Кроме того, необходимы эффективные методы и средства управления этими избыточными ресурсами БС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из анализа проблемы, связанной с управлением живучестью автоматических КА ДЗЗ при отказах бортовых средств [4], следует, что предпочтительным вариантом ее решения является автономное управление техническим состоянием БС с учетом их внутренних ресурсов и возможностей БКУ КА.

Эффективное управление непосредственно в полете техническим состоянием бортовых систем целесообразно осуществлять с помощью специализированного паттерна системы управления живучестью (СУЖ), входящей в состав бортового комплекса управления (БКУ) КА. При этом,

Ахметов Равиль Нургалеевич, Генеральный конструктор. E-mail: csdb@samtel.ru.

Макаров Валентин Павлович, научный советник.

Соллогу́б Анатолий Владимирович, главный научный сотрудник.

исходя из простоты аппаратно-программной реализации и информационного взаимодействия с БС, желательно, чтобы общая схема построения и концепция СУЖ были однотипными для каждой БС, включая БКУ КА.

Проблема, однако, состоит в том, что БС КА структурно существенно различаются, поскольку каждая из них обладает специфическими функциями, выполнение которых связано с применением, как правило, уникальной БА. Существенный шаг в плане интеллектуализации функций БС КА представляет целенаправленное их оснащение встраиваемыми микропроцессорами, которые входят (функционально) в состав бортовой вычислительной системы (БВС) БКУ, обеспечивая тем самым возможность унификации информационного взаимодействия.

В этой связи необходимо, опираясь на общие черты процесса функционирования БС в аномальной ситуации (АС), разработать стратегию автономного управления техническим состоянием бортовых систем в обеспечение живучести КА, обобщенную структуру и концепцию автономной СУЖ для реализации этой стратегии, а также общие принципы восстановления штатных функций КА.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА АНОМАЛЬНОЙ СИТУАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

В общем случае в полете КА автономная СУЖ предназначена для выполнения следующих функций:

- ◆ контроль правильности текущего процесса функционирования КА и оперативное выявление аномальной ситуации;
- ◆ диагностика аномальной ситуации до уровня отказавшей системы или бортовой аппаратуры;
- ◆ адекватное реагирование на причины АС, то есть выработка соответствующих управляющих воздействий с целью парирования деструктивного влияния АС на БС КА и его целевые функции;
- ◆ восстановление штатных функций БС и КА в целом.

Подходы к реализации этих функций могут быть различными [1, 2, 4]. Самым радикальным, естественно, является подход на основе повышения уровня надежности всех структурных элементов КА. Однако, несмотря на его дороговизну, он, тем не менее, полностью не исключает возможности отказов технических средств даже с высоким расчетным уровнем их надежности.

Обеспечение живучести КА ДЗЗ на основе

методов построения надежных систем из ненадежных элементов связаны с многократным резервированием структурных элементов, что не всегда оказывается приемлемым (по массово-габаритным, энергетическим, стоимостным и другим показателям).

Подход к обеспечению живучести КА на основе автономного управления в полете техническим состоянием БС оказывается наиболее эффективным по множеству эксплуатационных критериев. В том числе, по надежности и относительной простоте реализации СУЖ в виде взаимосвязанной совокупности программных модулей БКУ и систем КА. При этом программные модули БКУ представляют собой верхний иерархический уровень СУЖ, а системные программные модули – ее нижний уровень. Все программные модули СУЖ могут размещаться либо в одной (центральной) БЦВМ, либо часть из них – в периферийных вычислителях, являющихся принадлежностью автономных БС [4, 5].

Схема декомпозиции целей и задач управления живучестью КА ДЗЗ при наличии АС в системе управления ориентацией (СУО) посредством автономного управления техническим состоянием ее БА (с учетом возможностей БКУ), представлена на рис. 1. Такую схему можно рас-

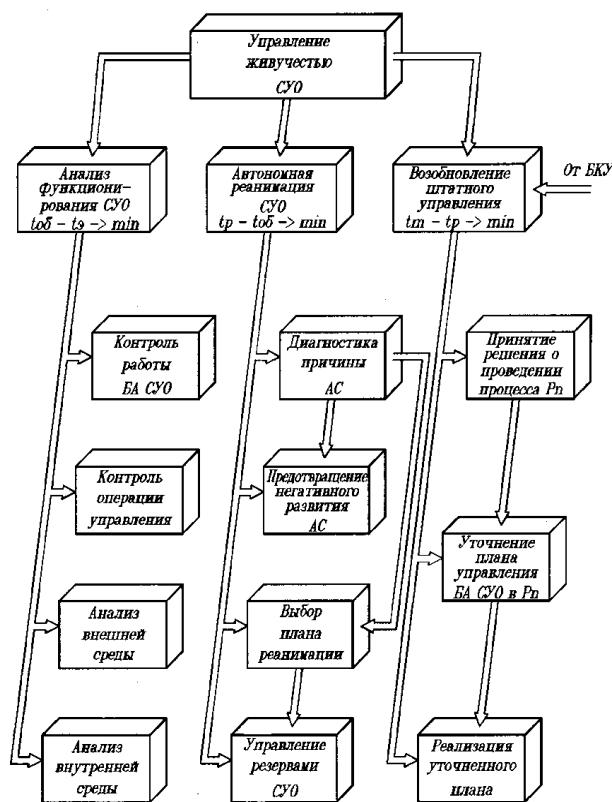


Рис. 1. Схема декомпозиции целей и задач управления живучестью КА ДЗЗ посредством управления техническим состоянием БА его СУО: P_n – текущий (или очередной) технологический процесс штатного функционирования КА

смагивать в качестве типовой для многих БС КА. Основой декомпозиции являются следующие положения, рассматриваемые как цели:

- ♦ оперативное обнаружение аномальной ситуации (АС) на основе анализа текущего функционирования СУО по критерию:

$$T_{об} = (t_{об} - t_a) \quad \min, \quad (1)$$

где t_a , $t_{об}$ - моменты появления и обнаружения АС, $T_{об}$ - длительность процесса обнаружения АС.

- ♦ оперативная реанимация с целью восстановления штатных функций СУО посредством управления БА в соответствии с критерием:

$$T_p = (t_p - t_{об}) \quad \min, \quad (2)$$

где t_p , T_p – соответственно момент завершения и длительность реанимации, т.е. восстановления способности выполнять штатные функции.

Автономная реанимация здесь понимается как процесс реализации совокупности мероприятий по диагностике причины, предотвращению негативного развития АС до необратимых последствий и восстановлению штатных функций отказавшей БС;

- ♦ оперативное восстановление штатного управления комплекса БС, задействованных в процессах выполнения целевых функций КА, согласно критерию:

$$T_{ТП} = (t_{ТП} - t_p) \quad \min, \quad (3)$$

где $t_{ТП}$, $T_{ТП}$ – момент восстановления штатного управления системами КА и длительность этого процесса, соответственно.

Принципы построения автономных процессов анализа и диагностики состояния СУО базируются на использовании детальной информации о БА, алгоритмах управления, законах движения КА, а также особенностей взаимосвязанного функционирования БА СУО и соотношений между их выходными переменными.

Высокой диагностической способностью обладают данные, полученные в результате сравнения параметров состояния реальной системы и ее математической модели на одном интервале времени. При этом необходимо, чтобы априорные знания об особенностях аппаратных и программных элементах системы, о характере ее функционирования при выполнении соответствующих целевых и функциональных задач КА, нашли адекватное отражение не только в математической модели системы, но и в критериях оценки.

Характер и значения указанных рассогласований позволяют выдвинуть определенное (конечное) число гипотез, объясняющих возникшую неисправность с глубиной, достаточной для принятия решения по управлению резервами. Каждой гипотезе соответствует определенная цепочка (ветвь) взаимосвязанных состояний, описывающая возникновение отказа и развитие

аномальной ситуации в системе. Для каждой такой ветви с помощью эвристических методов разрабатывается логическая модель истинности процесса контроля (таблица), на основе которой формируется соответствующий алгоритм выбора, что и обеспечивает решение задачи диагностики системы [5].

На основании изложенного сформированы следующие основные принципы эффективного управления в полете техническим состоянием СУО с помощью автономной СУЖ:

- ♦ сохранение параметров текущего технологического процесса P_n , $n=1, \dots, N$, при отказах систем КА на определенных (ограниченных) интервалах времени;

- ♦ максимально возможная оперативность выявления АС в системе и диагностики отказов;

- ♦ максимально возможная достоверность диагностики АС (на уровне заданной), чтобы обеспечивать управляющие воздействия на СУО, адекватные причине АС;

- ♦ при восстановлении работоспособности СУО предпочтительнее использование ее внутреннего структурного резерва, как наиболее полно сохраняющего целевые показатели КА, а также обеспечивающего минимизацию потерь времени на восстановление работоспособности КА и минимизацию “целевых” потерь;

- ♦ при исчерпании структурных резервов СУО необходимо предусматривать возможность изменения штатной программы работы КА на время реконфигурации системы;

- ♦ управление живучестью КА организуется по иерархическому принципу: нижний уровень - БА, затем подсистемы (включая подсистемы БКУ), системы КА (включая БКУ), и наконец наземный комплекс управления (НКУ) КА;

- ♦ обеспечение сохранности информации, на основе которой определяются варианты реконфигурации БС (в том числе, БКУ), их подсистем, а также БА;

- ♦ обеспечение диагностической информации (ДИ), формируемой и передаваемой для персонала НКУ, данными о предыстории отказа, позволяющими оценить ретроспективу его развития.

Из анализа схемы декомпозиции на рис. 1 следует, что наиболее нагруженным является первый элемент второго уровня, ибо оперативное обнаружение аномальной ситуации связано с непрерывным автоматическим анализом работоспособности СУО и условий функционирования в процессе выполнения некоторого штатного технологического процесса P_n из заданной их совокупности $[P_n]$, $n = 1, \dots, N$.

Для оперативного выявления аномальных ситуаций, возникающих на борту КА, определе-

на общая структура процесса автономного анализа работоспособности СУО, представленная на рис. 2, которая приемлема для любых БС КА.

Этот процесс базируется на максимальном использовании собственных средств каждой из БС КА для анализа текущего поведения внутри-системных параметров, а также средств БКУ, обеспечивающих контроль состояния среды функционирования БС и контроль выполнения операций текущего технологического процесса Рп.

Построение процедуры автономного анализа функционирования СУО КА, исходя из критерия оперативности выявления АС $T_{об}=(t_{об}-t_a) \min$, базируется на следующих принципах:

- ◆ максимальная полнота контроля на всех уровнях организации управления, достаточная для оперативного выявления АС;
- ◆ высокая достоверность анализа и принятия решения о наличии АС;
- ◆ выполнение всех операций контроля и анализа результатов как фоновой задачи, не оказывающей влияния на ход любого технологического процесса целевого функционирования КА;
- ◆ надежность выполнения задач контроля должна быть выше надежности решения штатных задач управления функционированием КА.

Здесь $P_n=[\Phi_n]=[\Phi_1^n, \dots, \Phi_R^n]$, – произвольный технологический процесс выполнения целевых функций из заданной их совокупности ($n=1, \dots, N$); $\Phi_1^n, \dots, \Phi_R^n$ – частные операции технологического процесса P_n

Заметим, что наиболее сложными для контроля являются динамические процессы, а для выявления причины АС - отказы БА типа “нуля” (нулевого сигнала) на выходе, поскольку нулевые значения ряда параметров систем могут быть целью функционирования, например, в системе

стабилизации углового положения КА.

Таким образом, рассмотренные общие принципы построения СУЖ КА служат основой разработки соответствующих методов автономного выявления АС в каждой бортовой системе с учетом различия в назначении, структуре и функциональном наполнении паттернов этих систем.

Процесс восстановления работоспособности отказавшей БС КА (реанимации) задействуется лишь по мере необходимости – после выявления АС на борту КА. Процедура реанимации включает в себя следующую последовательность действий:

- ◆ диагностику причины АС с выявлением отказавшей БС и её причины, т.е. конкретного её элемента (прибора или алгоритма);
- ◆ исключение неисправного элемента из функционального контура (задача безопасности);
- ◆ анализ наличия резерва у отказавшей БС, в том числе, функционального;
- ◆ подготовка и включение резервного прибора в функциональный контур или реконфигурация БС в случае применения функционального резерва;
- ◆ восстановление штатных функций БС КА; формирование информации о готовности БС к выполнению целевых функций КА.

Результаты определения неисправности БС поступают в системный блок управления, в котором предусматривается необходимый набор стратегий по реанимации системы. Такой набор стратегий соответствует возможным отказам БС и реализуется на программном уровне в БВС БКУ в виде определенной последовательности действий (управляющих воздействий), которые приводят к восстановлению штатных функций БС. В том числе, посредством переключения на

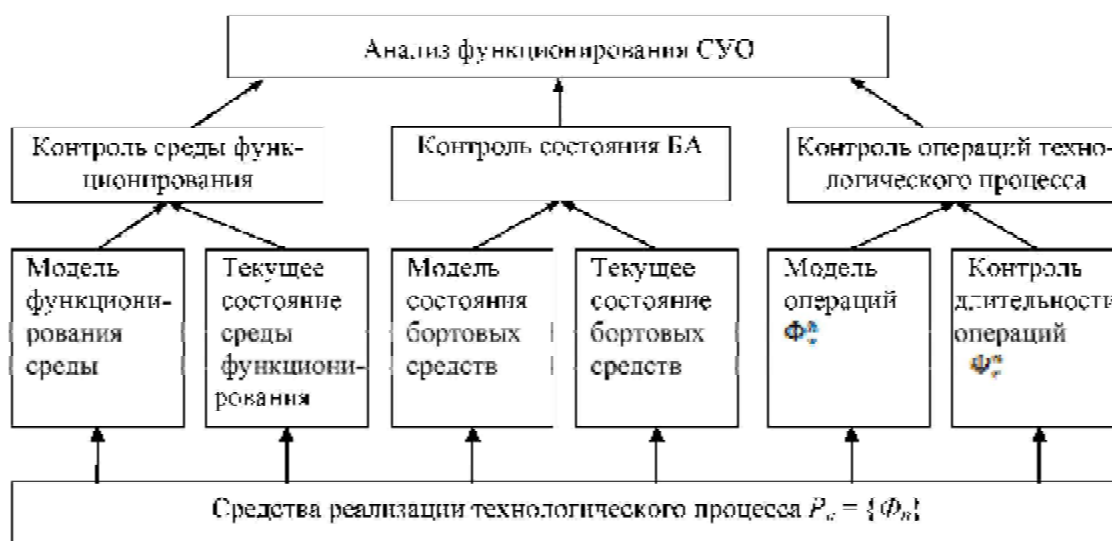


Рис. 2. Структура процесса анализа функционирования бортовых систем КА ДЗЗ

структурный или функциональный резерв, изменения режимов работы и др. Выбор алгоритмов реконфигурации индивидуален для каждой из БС и конкретного класса КА. После выбора соответствующей стратегии, осуществляется реконфигурация структуры БС.

Следует отметить, что, наряду с отказами материальной части БС, важное место занимает компенсация “отказов” их БПО, вызванных, как правило, ошибками в программах, не выявленных в процессе наземной отладки. Основные методы устранения таких ошибок, проявившихся в полете, в том числе, дистанционная коррекция БПО посредством оперативно создаваемых ПрОЗУ (программ, выполняемых из ОЗУ БВС), рассмотрены в [2, 4, 6]. Здесь следует лишь подчеркнуть важность структурного построения БПО для обеспечения возможности дистанционной коррекции любой программы БВС.

Проблема возобновления штатного функционирования КА в технологическом процессе P_n рассматривается в двух аспектах:

- ◆ восстановление ранее прерванного в результате АС штатного технологического процесса P_n ;
- ◆ сохранение целостности текущего технологического процесса P_n в аномальной ситуации, выявленной бортовыми средствами СУЖ.

Первый случай является функциональной задачей системы управления верхнего уровня иерархии, включая НКУ, и рассмотрен в [2, 6].

Второй случай относится к компетенции соответствующей БС и БКУ КА. Для его реализации с помощью бортовых средств формируются совокупности последовательных управлений путем выбора логически обусловленных действий из базы данных, встроенной в БС на этапе проектирования. При этом важно определить, отказ какой именно БС является причиной АС, какие ее элементы отказали, имеются ли внутренние ресурсы для ее реанимации. Подход к решению этой проблемы зависит от назначения и структуры БС. Особенности такого подхода рассмотрены в последующих разделах на примере СУО КА.

ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА БОРТОВОЙ АВТОНОМНОЙ СУЖ КА ДЗЗ

Рассматриваемая концепция построения СУЖ состоит в следующем:

- ◆ структура СУЖ формируется на основе принципа физического и программного комплексов бортовых средств, предназначенных для решения функциональных задач КА и его БС (включая БКУ);
- ◆ разработка встроенных в БПО БС специализированных программных модулей, решающих задачи в интересах СУЖ.

Такая концепция позволяет решать задачу автономного контроля и диагностики БС КА без введения какой-либо дополнительной бортовой контрольной аппаратуры.

Это является принципиальным положением, которое позволяет избавиться от проблемы контроля контролирующих средств.

При этом СУЖ представляется как трехуровневая иерархическая система, программно реализуемая всей совокупностью бортовых вычислительных средств:

нижний уровень – микропроцессоры, встраиваемые непосредственно в БА, которые, помимо решения функциональных задач, обеспечивают автоматический мониторинг их состояния на основе информации, получаемой в процессе штатного измерения и оценки физических переменных (токов, напряжений, перемещений, скоростей и др.);

средний уровень – это специализированный компьютер в составе функциональной системы или специализированный компьютерный модуль в составе центральной машины БВС БКУ, который служит для диагностики состояния

внутренних функциональных контуров, в частности, контуров управления панелями солнечных батарей, ориентацией осей КА, стабилизацией напряжения питания, поддержание заданной температуры в отсеках и других;

верхний “системный” уровень – центральная машина БВС БКУ, с помощью программных средств которой обеспечивается диагностика систем КА, как элементов его структуры.

На двух последних уровнях функциональная диагностика осуществляется путем сравнения наблюдаемых параметров систем и их эталонных математических моделей (ММ).

На основе рассмотренных принципов эффективного функционирования БКУ в АС может быть сформирована типовая структура автономной СУЖ БС КА, как программной подсистемы БКУ. Один из вариантов структуры СУЖ представлен на рис. 3.

Программы СУЖ бортовых систем размещаются как в центральной вычислительной машине (ЦВМ) БВС, так и в микропроцессорах БА, как нижнем иерархическом уровне СУЖ.

В БПО БВС решаются задачи выявления аномальной ситуации в системах КА, ее диагностики и осуществления мероприятий по реанимации систем. На нижнем иерархическом уровне СУЖ (в БПО БА) выполняются задачи, связанные с обеспечением надежности функционирования и автономного управления живучестью непосредственно БА.

В общем случае функции основных групп программ такой СУЖ состоят в следующем.

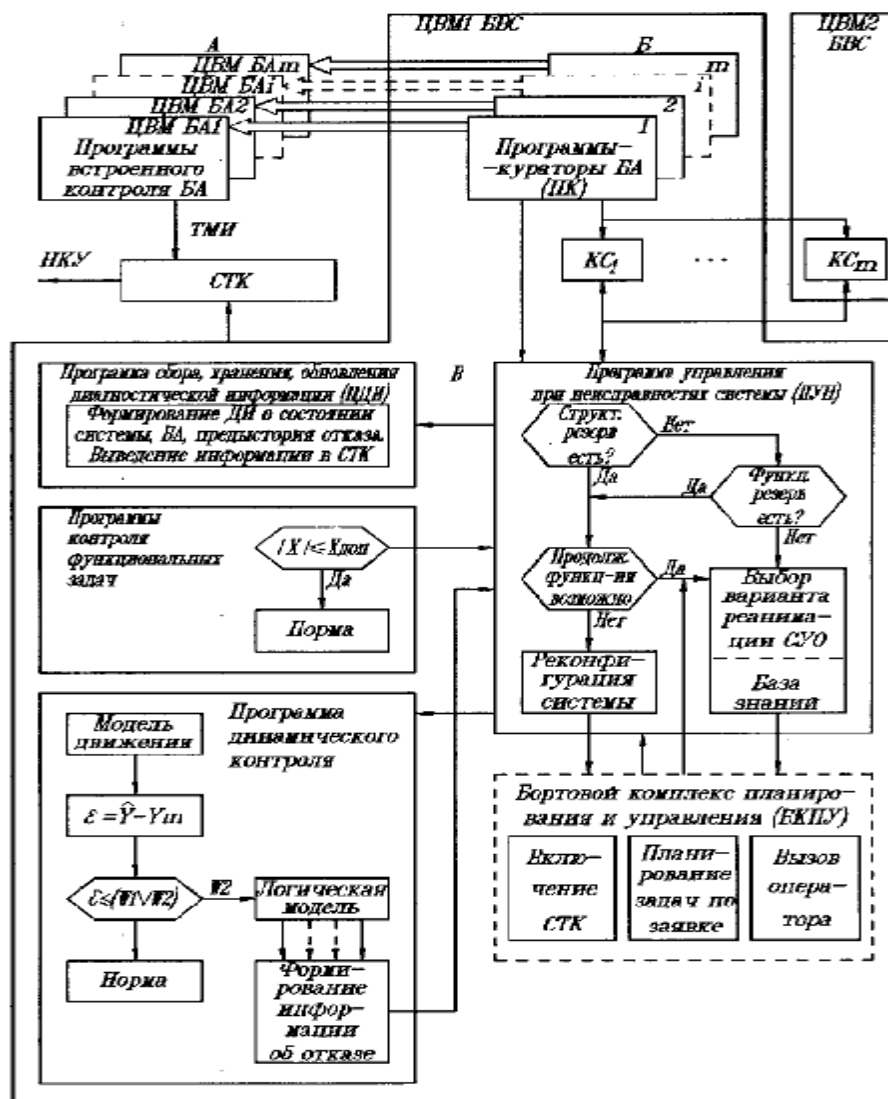


Рис. 3. Типовая структура системы управления живучестью БС КА ДЗЗ.

Здесь СТК – система телеметрического контроля; ЦВМ – цифровая вычислительная машина в составе БВС или в составе БА; КС – код состояния БА

Программы группы А позволяют существенно расширить возможности бортовых СУЖ, так как обеспечивают выполнение следующих функций:

- ◆ автономный контроль и диагностику до уровня отказавшего элемента БА;
- ◆ управление реконфигурацией БА;
- ◆ обработка, хранение и обновление диагностической информации (ДИ);
- ◆ подготовка информации для центрального элемента СУЖ в виде кода состояния (КС) БА, включающего данные о наличии внутренних резервов БА, условном номере отказа и др.;
- ◆ контроль правильности обмена информацией с БВС;
- ◆ организация вывода массива ДИ в систему телеметрического контроля (СТК) и перевода БА в режим ожидания командных сообщений из БВС в случае нарушения правильности обмена информацией с БВС.

Программы группы Б размещаются в одной из ЦВМ БВС и обеспечивают:

- ◆ управление и обмен информацией БВС и БА;
- ◆ прием, размещение и обновление КС БА в разных ЦВМ БВС;
- ◆ анализ КС БА и при его “ненорме” - вызов программы управления при неисправностях (ПУН) БА.

Программы группы В размещаются в ЦВМ БВС и включают в себя (в качестве основы СУЖ) следующий набор программ:

- ◆ динамического контроля (ПДК);
- ◆ контроля функциональных задач БС;
- ◆ управление при неисправностях (ПУН).

Эти программы в процессе штатного функционирования БС на основе рассмотренных выше методов осуществляют контроль исходных данных, результатов работы БС и принятие решения об отказе конкретной БА.

При отказе БА вызывается программа управления при неисправностях (ПУН), которая анализирует вид отказа БС и БА, режимы их работы в текущем технологическом процессе КА и выбирает стратегию управления живучестью БС (вариант реанимации) из множества допустимых вариантов, хранящихся в базе знаний. С целью обеспечения высокой надежности управления живучестью КА ПУН может выполняться на любой бортовой ЦВМ БВС.

Основные принципы построения СУЖ, методы их реализации и бортовые программные средства апробированы в процессе штатной эксплуатации в составе современных КА ДЗЗ (“Комета”, “Неман”, “Ресурс-ДК1” и др.).

Практика их эксплуатации подтверждает эффективность разработанных принципов управления живучестью маневрирующих низкоорбитальных КА ДЗЗ в аномальных условиях функционирования.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СУЖ В СОСТАВЕ БС КА

Исходя из представленной концепции, реализован один из вариантов автономной СУЖ в составе системы управления движением (СУД) типа “Колибри”. Это позволило обеспечить выполнение программы полета многих типов КА в сложных ситуациях, связанных с отказами БА, в том числе, серийных КА ДЗЗ топографического типа “Комета” (20 запусков), а в модифицированном варианте (“Колибри-М”) – и миссии блока выведения “Икар” в процессе выполнения программы запуска 24-х американских спутников связи типа “Globalstar” [6, 7].

Рассмотрим подход к решению проблемы возобновления штатного функционирования КА в технологическом процессе P_n на примере СУД “Колибри-М” при одном отказе, например, датчика углового положения, или датчика угловой скорости, или исполнительных органов.

На рис. 4 представлена общая схема СУД “Колибри-М” с встроенной программной СУЖ.

В этой СУЖ в качестве таблицы истинности использована логическая модель ситуаций (ЛМС), а также эталонная ММ следующего вида [4, 5]:

$$\omega_i = M_i / J_i, \quad i = 1, 2, 3; \quad M_i = \int_0^{t_k} f_i(U_i) dt; \quad \Delta \omega_{ik} = 1 / \int_0^{t_k} f_i(U_i) dt; \quad \Delta \varphi_{ik} = \int_0^{t_k} \omega_i dt; \quad (4)$$

где: ω_i, J_i, M_i – соответственно угловая скорость КА, его момент инерции и суммарные (управляющие и возмущающие) моменты, действующие на корпус КА по i -му каналу управления;

$\Delta \omega_{ik}$ – оценка приращения угловой скорости КА от работы исполнительных органов (ИО) на

интервале контроля $t_k; k=1,2,\dots;$

$\Delta \varphi_{ik}$ – оценка приращения угла ориентации КА на интервале контроля t_k по измеренному датчиком угловой скорости (ДУС) значению ω_{ik} .

С помощью ЛМС (или таблицы истинности) осуществляется выявление АС и ее диагностика в СУО до уровня отказавшего прибора.

Для анализа используются невязки между измеренными (X) и модельными (X_m) значениями параметров

$$(e_{1,\dots,e_K}) = X(X_1,\dots,X_K) - X_m(X_{m1},\dots,X_{mK}). \quad (5)$$

Последующая их классификация с отнесением невязок $e_k (k = 1,\dots,K)$ к классам $W1$ (норма) и $W2$ (не норма) позволяет выявить наличие в системе АС. В случае отнесения значения e_k к классу $W2$ фиксируется наличие аномальной ситуации в системе.

Диагностика причины до уровня отказавшего прибора выполняется с помощью логической модели ситуаций (ЛМС), которая связывает состояние БА системы (например, датчиков углов ориентации и угловой скорости, исполнительных органов в каждом i -м, $i=1,2,3$, канале управления) с распределением по классам $W1$ и $W2$ параметров контроля (невязок e_{ik}):

$$e_{1k} = |\Delta \omega_{ik} - \Delta \omega_{in}^m| \Delta \theta_{1i}; \quad e_{2k} = |\Delta \varphi_{ik} - \Delta \varphi_{in}^m| \Delta \theta_{2i}; \quad (6)$$

где $\theta_1=f(t), \theta_2=f(t)$ -допуски контроля, определяемые по априорной информации о параметрах контроля с учетом их изменения во времени в i -м канале управления ($i=1,2,3$).

Анализ поведения выбранных параметров контроля с помощью ЛМС дает возможность бортовым алгоритмам не только выявлять отказавший элемент системы, но и формировать рекомендации по управлению ее бортовыми ресурсами. Кроме того, ЛМС обеспечивает возможность замены выходных сигналов отказавшего измерительного прибора в штатной СУО соответствующими текущими выходными параметрами эталонной ММ.

В случае исчерпания ресурсов управления по автономному восстановлению работоспособности СУО, СУЖ формирует массив диагностической информации (ДИ), необходимой для принятия решения о дальнейших действиях системы и передает соответствующее сообщение в вышший иерархический уровень - БКУ (или НКУ).

На рис. 4 обозначено: БДУС – блок датчиков угловых скоростей; БУС – блок устройств согласования; БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина; ДПС – датчик приращения скорости; ИО – исполнительные органы; КС – камера сгорания; КТД – корректирующе-тормозной двигатель; ОСК – орбитальная система координат; ПМВ – построитель местной вертикали; СУД – система управления движением; УРД

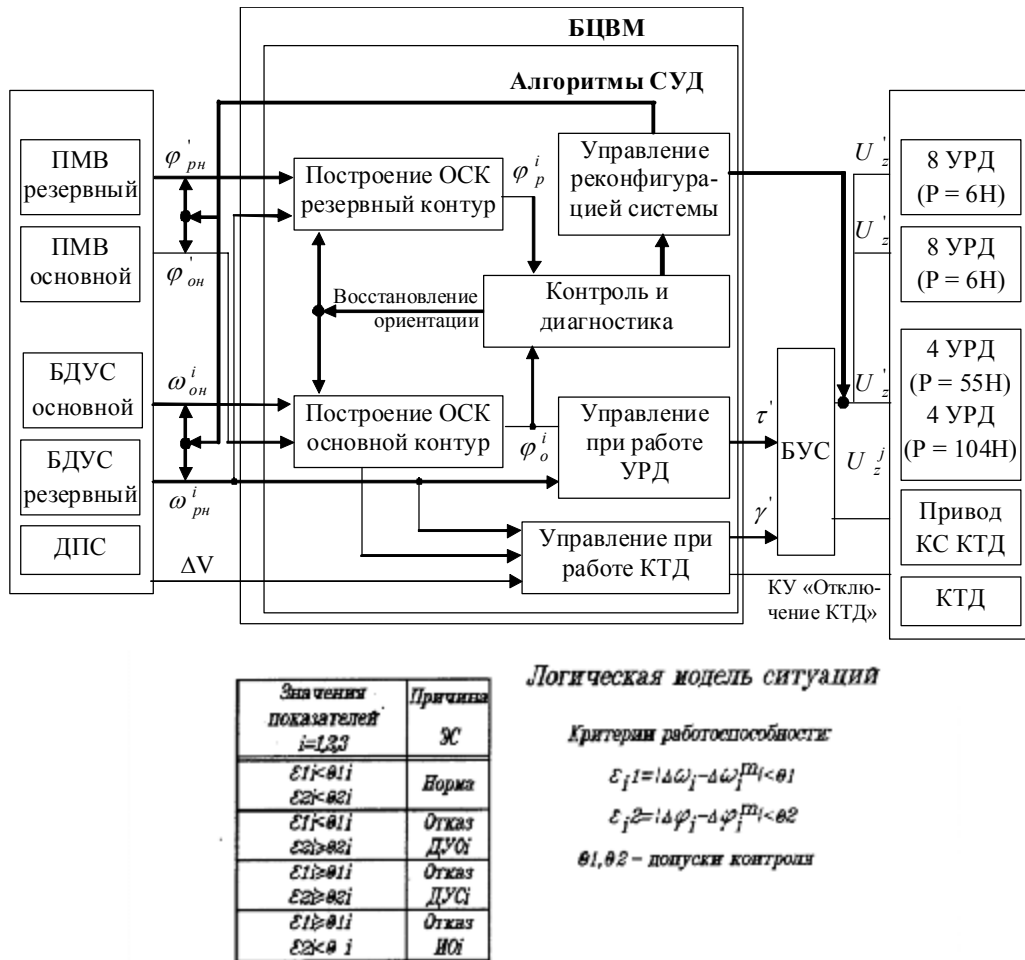


Рис. 4. Структурная схема системы управления “Колibri-М” БВ “Икар” с встроенной программой СУЖ

– управляющий ракетный двигатель; ЧЭ – чувствительные элементы; $\varphi_{рн}^i, \varphi_{он}^i$ - измеренное ПМВ угловое положение КА относительно ОСК, $i=k,т$; $\omega_{он}^i, \omega_{рн}^i$ - измеренная проекция на i -ую ось абсолютной угловой скорости КА, $i=k,т,р$; DV - приращение линейной скорости КА; φ_o^i, φ_p^i - угловое положение КА, рассчитанное основным, резервным контуром; γ - скважность управления приводом КС КТД; τ - длительность управляющего импульса; U_z - управляющий сигнал на УРД; U_z^j - управляющий сигнал на электродвигатель привода.

В зависимости от состава массива ДИ и характера сообщения, БКУ формирует (или использует заранее заданную) последовательность управляющих воздействий на БС. Это обеспечивает безопасность функционирования КА при отказах БС посредством перевода КА в соответствующий паттерн функционирования. В частности, ориентированный дежурный полет с сохранением части функциональных задач систем или неориентированный полет (дрейф), когда основная масса приборов (кроме дежурных) отключается [4,6].

Длительность восстановления штатного управления определяется свойствами резервной БА, длительностью работы эталонной ММ с приемлемой точностью без коррекции данных, а также текущей операцией системы в технологическом процессе, на выполнение которой пришелся (наложился) момент завершения реанимации системы.

Важно при этом обеспечивать постоянную готовность ММ систем к выполнению подобных задач. Это достигается за счет их непрерывного функционирования в фоновом режиме и соответствующей настройкой параметров.

Характерным в этом отношении является функционирование элементов СУЖ в составе СУО «Колibri-М» в процессе перехода длительностью около 45 минут блока выведения (БВ) «Икар» с исходной эллиптической орбиты на рабочую круговую орбиту. Схема полета БВ на переходной орбите после отделения от РН (перед корректирующим импульсом в апогее) и моменты переключения приборов ПМВ представлены на рис.5.

На переходной орбите автономно реализуются следующие режимы управления угловым движением:

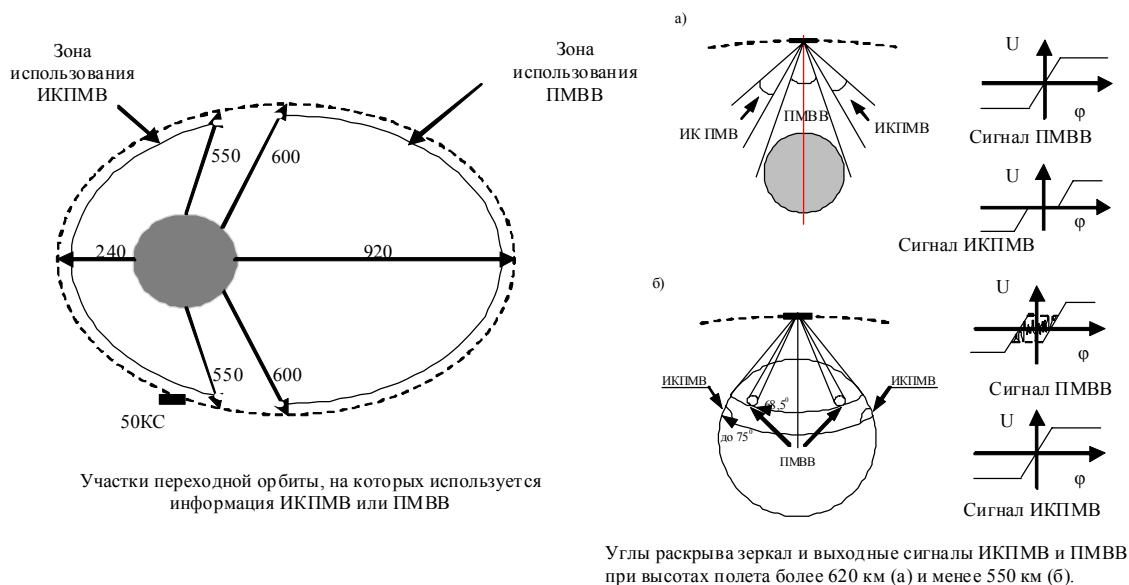


Рис. 5. Схема полета КА 50КС на переходной орбите и выходные сигналы ПМВ

- ♦ поиск Земли, построение вертикали места и ориентация КА относительно местной вертикали;
- ♦ построение приборной плоскости орбиты (ПрПО), т.е. материализация орбитальной системы координат (ОСК) на борту КА, и ориентация его продольной оси в плоскости орбиты;
- ♦ поддержание заданной ориентации КА в ОСК и коррекция ОСК с использованием измерений ПМВ (режим "коррекция");
- ♦ поддержание заданной ориентации КА в ОСК без использования измерений ПМВ (режим "память");
- ♦ программный разворот КА по каналу рыскания (ППР) для отделения полезной нагрузки.

(ИК МПВ – инфракрасный построитель местной вертикали низковысотный; ПМВВ - построитель местной вертикали высотный).

Управляющие воздействия на всех этапах орбитального полета БВ реализуются с помощью управляющих ракетных двигателей малой тяги (УРД). На участке работы маршевого двигателя (МД) создание управляющих моментов по каналам рыскания и тангажа (вместо УРД) осуществляется отклонением камеры сгорания МД. Управляющие сигналы на включение УРД и разворот камеры сгорания МД формируются бортовым компьютером по информации о текущих угловых скоростях и углах ориентации КА.

Угловые скорости КА измеряются гироскопическими датчиками угловой скорости (БДУС). Углы ориентации КА рассчитываются в бортовом компьютере по информации об угловых скоростях и об отклонении БВ от местной вертикали, измеряемой низковысотным инфракрасным построителем местной вертикали (ИКПМВ) или с помощью ПМВ высотного

(ПМВВ). Рабочие диапазоны ИКПМВ и ПМВВ не пересекаются. В системе в каждый конкретный момент может использоваться информация только с одного из приборов ПМВ. На структурной схеме системы они изображены как один обобщенный датчик – "ПМВ".

Для выполнения миссии БВ "Икар" весьма важной является задача обеспечения непрерывности процесса управления движением, в том числе, при отказах бортовой аппаратуры СУО (БДУС, ИКПМВ, УРД), что возможно лишь с помощью автономных бортовых программных средств диагностики и управления резервами БА. Причем, резервные комплекты БДУС, ИКПМВ и ПМВВ используются по схеме "нагруженного" резервирования. Основные и резервные комплекты приборов образуют два однотипных информационно-измерительных тракта (контура), обеспечивающих параллельное вычисление углов ориентации. Управление угловым движением осуществляется по информации основного контура определения ориентации. Информация резервного контура для управления угловым движением БВ не используется, а служит лишь для контроля функционирования и автоматического восстановления исходного состояния системы при обнаружении отказов приборов основного контура (то есть как структурный резерв). Отказавший прибор основного контура отключается от управления и замещается работоспособным прибором (резервным) без прерывания штатных функций управления движением БВ.

Для диагностики состояния системы в бортовом компьютере осуществляется проверка семи критериев. Их перечень и краткое описание характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние засветки Солнцем ПМВ на ориентацию КА

Критерий оценки работоспособности	Обозначение	Величина допуска	Действия СУЖ БКУ по критерию
Длительность поиска Земли и построения вертикали места	К1	300с (поиск Земли) 500с (построение ВМ)	Отключение одного из ПМВ. Увеличение длительности участка выставки на резервном ПМВ на 30 мин. При отсутствии резерва ПМВ – отключение системы управления
Длительность попадания Солнца в поле зрения ПМВ	К2	600 с	Отключение одного из ПМВ. При отсутствии резерва ПМВ – отключение системы управления
Разница показаний 2-х БДУС на участке работы КТД	К3	0,3 %	Тестовое включение двигателя для проверки реакции БДУС1. Отключение одного из БДУС по результатам проверки
Разница между ожидаемой и наблюдаемой реакцией БДУС на включение УРД	К4	от 0,06 до 0,33 % (в зависимости от типа УРД и числа их включений на интервале контроля)	Отключение одного из БДУС или переход на резервный комплект УРД в случае «не нормы» обоих БДУС. При отсутствии резерва БДУС и УРД критерий не проверяется
Расхождение основного и резервного контуров определения ориентации	К5	1° (2,5° для канала ψ) или 3° (7,5° для канала ψ) в зависимости от участка полёта.	Включение режима тестовой проверки ПМВ (критерий К6)
Уровень выходного сигнала ПМВ при отклонении КА на $\pm 5^\circ$ от местной вертикали (тестовая проверка ПМВ)	К6	Более 1° (при отклонении БВ на +5°) или менее - 1° (при отклонении БВ на - 5°)	Отключение одного из ПМВ при уровне его выходного сигнала меньше ожидаемого. При подтверждении исправности 2-х ПМВ задание одинаковых начальных условий для двух контуров определения ориентации
Отклонение от заданных углов в основном контуре ориентации.	К7	10°	Отключение системы управления движением и перевод БВ в не ориентированный полет (НП)

По функциональному назначению эти критерии подразделяются на 3 группы:

- ◆ диагностика длительности функциональных участков (критерии К1, К2);
- ◆ диагностика системы стабилизации (критерии К3, К4, К7)
- ◆ диагностика системы ориентации (критерии К5, К6).

Критерии первой группы проверяют соответствие заданному интервалу фактической длительности функциональных участков (поиск Земли, построение вертикали места). При их превышении функциональные участки повторяются с резервным прибором ПМВ.

Диагностика системы стабилизации на всех этапах полета, кроме участка работы КТД, осуществляется посредством сравнения ожидаемой (вычисляемой по ММ системы) реакции системы на каждое включение УРД и наблюдаемой реакцией по сигналам БДУС.

По результатам сравнения данных основного и резервного каналов между собой и ММ системы выявляется отказавший тракт, который в дальнейшем исключается из управления.

На участке работы МД диагностика системы стабилизации осуществляется сравнением разности показаний 2-х БДУС с допустимым уровнем (порогом). При превышении указанной разности допустимого уровня в каком-либо канале фиксируется наличие отказа. Для диагностики его, то есть определения отказавшего прибора, бортовым алгоритмом автономно осуществляется эксперимент непосредственно в процессе работы МД. С этой целью организуется угловое тестовое движение (вращение) БВ (тест БДУС) посредством кратковременного отклонения камеры сгорания МД на определенный угол с последующей оценкой по ММ системы реакции БДУС1 и БДУС2 на физическое отклонение БВ от исходного положения. Посредством сравнения инфор-

мации из трех источников: выходных сигналов двух приборов БДУС и данных ММ, полученных в результате теста, один из БДУС (сигнал которого имеет максимальное отклонение от среднего) отключается, а управление движением БВ ведется по исправному прибору. Кроме того, на всех участках работы СУД проверяется отклонение данных основного контура определения углов ориентации КА от заданного положения КА. Диагностика осуществляется путем сравнения с допустимым уровнем (порогом) разности углов, рассчитанных основным и резервным контурами определения ориентации КА. Если эта разность превышает допустимый уровень, то фиксируется отказ в СУД. Дополнительная информация, необходимая для диагностики причины отказа, получается бортовым алгоритмом посредством эксперимента, то есть организации тестового движения КА (контрольный тест ПМВ).

По характеру сигналов с ПМВ1 и ПМВ2 (резервный контур) контрольный алгоритм выявляет отказавший прибор и выключает его. Дальнейшая работа осуществляется с исправным прибором.

Следует отметить необходимость обеспечения соответствия реальных характеристик прибора и его ММ, по данным которой работает СУЖ. Так, в рассматриваемой схеме СУЖ модели ПМВ принимались однотипными и для высотного и для низковысотного приборов (рис 5 а). Однако при запуске БВ № 3 чувствительность основного ПМВВ оказалась более высокой (на верхней границе допуска), чем на других аналогичных КА.

Вследствие этого при полете БВ на низких высотах, когда поле “зрения” ПМВВ скользило по поверхности Земли (вне пределов рабочей зоны), на его выходе появился случайный сигнал (рис.5б), вызванный неравномерностью инфракрасного излучения Земли. В результате это-

го “сбилась” внутренняя логика прибора, что привело к искажению его выходного сигнала и на рабочих высотах, когда он оказался в контуре управления. Поэтому СУЖ выдана информация об отказе прибора и его выключении с последующей заменой на резервный, что и позволило в итоге выполнить миссию БВ “Икар”.

Характерно, что при выполнении заключительной операции увода БВ с рабочей орбиты ИСЗ “Globalstar”, этот же прибор был вновь включен в рабочей зоне в контур управления и штатно отработал без замечаний.

Весомость вклада СУЖ в выполнение миссии БВ “Икар” подтверждается достигнутыми основными характеристиками СУО, представленными на рис. 6 вместе с типовым процессом ускоренной выставки БВ №6 в ориентированное положение.

Несмотря на сбои и отказы отдельных элементов системы, характеристики, полученные во всех шести штатных пусках БВ “Икар”, по точности ориентации в заданных в ОСК положениях, соответствуют расчетным и в основном не превышают 1 углового градуса уже через 15 мин после отделения от РН, вместо 135 мин у прототипа. Точность стабилизации КА в процессе выдачи корректирующего импульса соответствует заданной и не превышает по углу 0,5 град, по угловой скорости – 0,03 град/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные основные принципы построения автономной системы управления техническим состоянием бортовых систем КА позволяют эффективно управлять живучестью КА для всей номенклатуры штатных режимов его функционирования.

Наиболее эффективно автономная система управления техническим состоянием бортовых систем КА реализуется в виде самостоятельно-

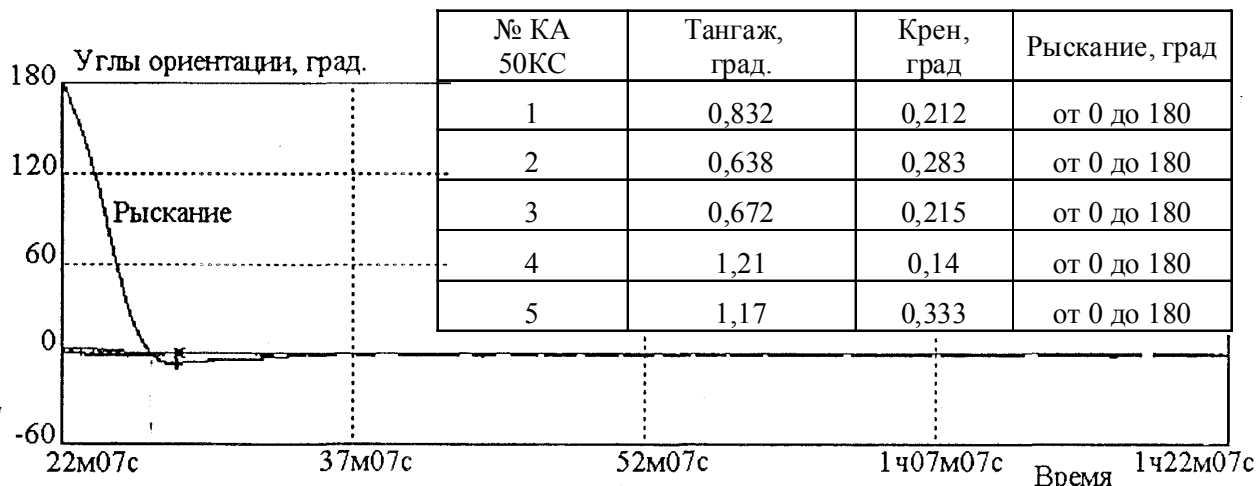


Рис. 6. Основные характеристики СУО “Колibri-M” БВ “Икар”

го программного паттерна СУЖ КА в составе бортового программного обеспечения БКУ.

Большинство основных принципов построения СУЖ, методов решения частных задач и бортовых программных средства отработаны в процессе штатной эксплуатации в составе ряда бортовых систем современных КА ДЗЗ (типа “Комета”, “Ресурс-ДК1” и другие).

Практика эксплуатации маневрирующих низкоорбитальных КА ДЗЗ подтверждает эффективность предложенных принципов управления их живучестью в аномальных условиях функционирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант 08-08-00101).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметов Р.Н., Белякова Т.Е., Фенога В.Н.* Алгоритм определения состояния элементов системы управления в режиме стабилизации. Сб. Трудов Всесоюзного научно-технического семинара по управлению движением и навигации, июнь 1983 г. Куйбышев, СГАУ, 1985, С. 148.
2. *Ахметов Р.Н.* Управление живучестью космического аппарата // Общероссийский научно-технический журнал “Полет”. 2006, №9, С. 16-20.
3. *Ахметов Р.Н., Анишаков Г.П., Мостовой Я.А., Соллогуб А.В.* Концептуальные проблемы управления живучестью сложных технических объектов // Труды VIII Международной конференции по проблемам управления и моделирования в сложных системах (Самара, 24-28 июня 2006г.) – Самара: Сам НЦ РАН, 2006, С. 274-284.
4. *Г.П. Анишаков, Р.Н. Ахметов, В.П. Макаров, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой.* Методы и средства управления КА зондирования Земли “Ресурс-ДК1” // Сб. трудов XIII Всероссийского семинара по проблемам управления движением и навигации ЛА. Самара: СГАУ, 2007.
5. *Макаров В.П., Платонов С.Н.* Элементы искусственного интеллекта в задаче обеспечения живучести системы ориентации ИСЗ // Динамика и управление космическими объектами. Новосибирск: Наука, 1992. С. 193-202.
6. *А.Н.Кирилин, Р.Н.Ахметов, Г.П. Анишаков.* Основные результаты и планы ГНПРКЦ “ЦСКБ-ПРОГРЕСС” по созданию космических средств ДЗЗ социально - экономического назначения // Москва: Труды НИИ ВНИИЭМ “Электромеханика” (материалы конференции по ДЗЗ, октябрь 2007 г.), Том 105, 2008 г.
7. *А.Н.Кирилин, Р.Н.Ахметов.* Развитие российской космической системы ДЗЗ // Аэрокосмический курьер, № 2, 2007, С. 57-61.

CONCEPT OF AUTONOMOUS CONTROL OVER EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFT SURVIVABILITY AT OFF-NOMINAL OPERATION

© 2009 R.N. Akhmetov, V.P. Makarov, A.V. Sollogub

Federal State Unitary Enterprise State Research and Production Space Centre “TsSKB-Progress”, Samara

Issue of autonomous control over Earth remote sensing spacecraft is on the agenda not only for nominal operation, but also for off-nominal conditions. It is so especially at low orbits during detailed sensing, when it is necessary to carry out highly dynamical angular spatial motions in order to refocus from one object (target) under observe onto the other within the limited observation interval. In general, solution of this problem is related to intellectualization of remote sensing spacecraft control procedures. At off-nominal operation as an effective tool of spacecraft control in order to ensure survivability of it there proposed an automatic system of control over operating conditions of onboard equipment, which is called a survivability control system. There considered a concept of spacecraft control survivability, general structure and some flight tested variants of survivability control system designs.

Key words: Earth remote sensing spacecraft, onboard equipment failure, off-nominal operation, reference model, autonomous analysis, diagnosis, revival, survivability control system.