

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. А. Микрин, Н. А. Суханов, В. Н. Платонов, И. В. Орловский, О. С. Котов,
С. Г. Самсонов, В. Г. Беркут

Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева, г. Королев

Изложен подход к построению бортовых комплексов управления (БКУ) автоматических космических аппаратов. Описаны основные компоненты БКУ и решаемые ими задачи. Приведена структура программного обеспечения — главного интеграционного звена БКУ. Рассмотрены характеристики БКУ космических аппаратов “Ямал”, эксплуатируемых на геостационарной орбите в сфере телекоммуникаций.

Для обеспечения “жизнеспособности” разнообразных уже эксплуатируемых и только еще проектируемых космических аппаратов (КА) и выполнения ими целевых программ необходимо решить широкий круг задач, присущих всем типам КА. В числе этих задач следующие:

- обеспечение обмена информацией с наземным комплексом управления (НКУ);
- обеспечение снабжения аппарата электроэнергией;
- распределение электропитания на КА между потребителями;
- поддержание требуемого теплового режима на КА;
- определение и поддержание ориентации КА в пространстве;
- обеспечение движения КА в пространстве (перемещение его центра масс);
- обеспечение углового движения КА в пространстве (вокруг центра масс);
- определение (прогнозирование) местоположения КА на орбите;
- управление вращающимися солнечными батареями (при их наличии);
- сбор, хранение, обработка и передача телеметрической информации;
- управление работой систем и оборудования КА в соответствии с программой полета КА и с учетом его реального состояния.

При проектировании первых КА каждая задача решалась автономной работой отдельной системы, содержащей свою датчиковую аппаратуру, испол-

нительные органы, автоматику управления. С усложнением КА и увеличением числа решаемых ими задач появилась потребность в централизации управления и контроля за работой бортовых систем КА, прежде всего, в части рационального расходования и пополнения энергоресурсов, приоритетности и времени выполнения полетных и регламентных операций, автономного парирования нештатных ситуаций на основе результатов диагностики и тестирования бортовой аппаратуры и др. Разработка и внедрение на КА вычислительных средств с развитым программным обеспечением (ПО) позволили, в принципе, удовлетворить эту потребность. По аналогии с НКУ появилось понятие бортового комплекса управления (БКУ), объединяющего в себе основные бортовые системы КА и включающего в себя бортовую вычислительную систему, систему управления движением и навигацией, систему управления бортовой аппаратурой, бортовую аппаратуру служебного канала управления, систему бортовых измерений, а также программное обеспечение БКУ.

Для более детального рассмотрения принципов построения БКУ автоматических КА с целевой направленностью (связные спутники, КА наблюдения участков звездного пространства, космические аппараты зондирования Земли) перечислим их основные системы (рис. 1):

- бортовая вычислительная система в виде совокупности вычислительных средств и устройств сопряжения (адаптеров связи), обеспечивающая информационное взаимодействие с бортовыми



абонентами и предоставляющая свои вычислительные ресурсы для решения задач управления системами КА и задач контроля их работы;

- система управления движением и навигации или, в другой интерпретации, система ориентации и управления движением, предназначенная для управления движением КА как материальной точки (перемещением центра масс), так и для управления угловым движением КА (движением вокруг центра масс);
- система управления бортовой аппаратурой, выполняющая функции коммутации электропитания, усиления и преобразования электрических сигналов, а также выдачи команд управления в системы и приборы КА в соответствии с временными или логическими условиями;
- система бортовых измерений, предназначенная для сбора, обработки и передачи в НКУ телеметрической информации о результатах измерений, характеризующих состояние систем КА и протекающие на КА процессы;
- бортовая аппаратура служебного канала управления или командной радиолинии, представляющая собой радиотехнический комплекс для обеспечения своевременного обмена служебной информацией между НКУ и БКУ;
- объединенная двигательная установка, состоящая из комплекта двигателей для обеспечения перемещения КА относительно орбиты и углового движения КА;
- система обеспечения определенного теплового режима внутри КА;
- система энергоснабжения (СЭС) для преобразования первичной (солнечной) энергии в электрическую.

Задачи управления вращающимися солнечными батареями в некоторых типах КА решаются специальной системой ориентации солнечных батарей. В других КА эти задачи решаются в СУДН.

В некоторых классах КА в качестве отдельной структурной единицы рассматривается бортовая кабельная сеть.

Внедрение на КА вычислительных средств и новых конструктивно-технологических решений, применение современной элементной базы и средств комплексирования ПО позволили создать основу для построения интегрированных БКУ. Возможность оперативного контроля состояния систем КА и “умного” выполнения программы полета КА с учетом внешней обстановки, текущего статуса бортовых систем и имеющихся на текущий момент времени ресурсов позволила перенести многообразные функции контроля и управления КА в БВС, точнее — в ее ПО. Тенденция концентрации этих функций в бортовой вычислительной системе (ПО БКУ) продолжает усиливаться по мере развития программных и аппаратных средств. Программное обеспечение сформировалось как

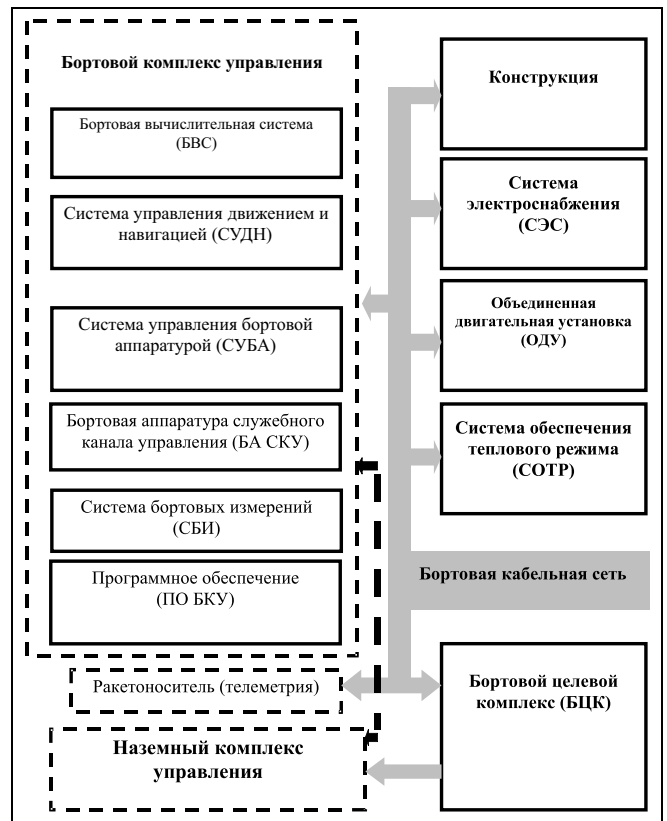


Рис. 1. Бортовые системы космического аппарата

отдельный (и одним из самых главных) компонентов БКУ (рис. 2).

Программное обеспечение БКУ построено по иерархическому принципу:

- первый или нижний уровень составляют драйверы обмена с аппаратурой и программы организации вычислительного процесса;
- второй уровень составляют программы обеспечения управления и контроля работы бортовых приборов и оборудования;
- программы третьего уровня включают в себя программы обеспечения полетных режимов бортовых систем и расчетные программы;
- четвертый или верхний уровень составляют программы планирования и организации режимов работы всего БКУ и контроль состояния систем КА.

Архитектура ПО БКУ подразделяет все программы на служебные (диспетчер, обмен, управление конфигурацией БВС, таймирование и др.) и функциональные (программы включения/выключения конкретных приборов, программы расчета различной подготовительной и сопроводительной информации, программы формирования управляющих воздействий на отдельные приборы и т. п.). Каждая программа (программный модуль) имеет свои настроечные параметры и логико-информа-

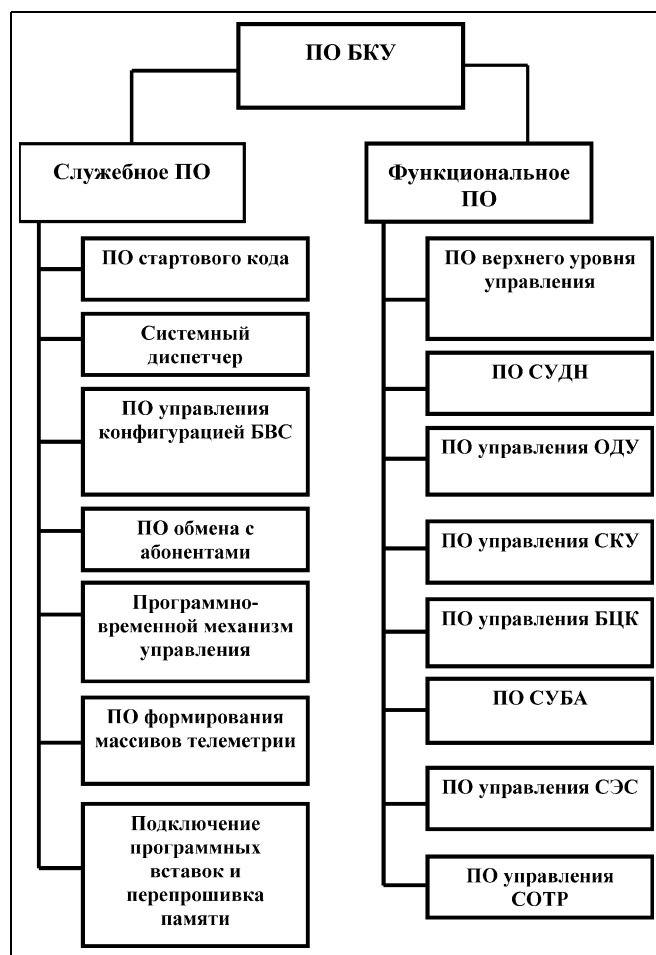


Рис. 2. Структура программного обеспечения

ционные связи с другими программами. Построение ПО БКУ предполагает детерминированное циркулирование обменной информации между программами всех уровней, причем управляющая информация поступает сверху вниз (от программ верхних уровней до программ нижних уровней), а контрольно-диагностическая информация — снизу вверх. Для обеспечения функционирования ПО БКУ в реальном масштабе времени каждой программе определяются последовательность и конкретное время подключения на вычислительном такте бортового компьютера, а также ее вычислительные ресурсы.

Интеграционный характер ПО БКУ позволяет выполнять, кроме функций контроля и управления, и другие важные функции и задачи, как, например:

- задачи повиткового планирования полета КА;
- задачи оптимизации расхода бортовых ресурсов;
- функции обеспечения автономности существования КА;
- функции оперативного реагирования на многие нештатные ситуации.

Получение цифровой информации от бортовых систем (напрямую или через СБИ), обмен информацией с НКУ (через БА СКУ), обработка и использование полученной информации в расчетно-вычислительных задачах, реализованных в ПО, — все это выдвинуло БВС и ПО БКУ на главенствующее место в бортовом комплексе управления. Системы БА СКУ и СБИ в такой конфигурации являются неотъемлемой частью БКУ как источники циркулирующей на КА информации и необходимые звенья, поддерживающие информационно-логические интерфейсы. Заметим, что связи между БВС, БА СКУ и СБИ как физические (проводные, через бортовую кабельную сеть и устройства сопряжения), так и “виртуальные” (информационные, через каналы информационного обмена).

Неотъемлемой и основной частью БКУ следует считать и систему управления бортовой аппаратурой. Две важные функции СУБА несут интеграционный характер и являются прерогативой БКУ:

- обеспечение всех бортовых потребителей электроэнергией;
- обеспечение физического (проводного) интерфейса с системами и оборудованием КА и управление ими путем формирования соответствующих команд и сигналов.

Все остальные из вышеперечисленных систем решают свои конкретные задачи, жизненно важные для КА, но не являющиеся интеграционными с точки зрения структурного построения БКУ. Из этих систем особо выделим СУДН, часто включаемую разработчиками КА в состав БКУ благодаря следующим аспектам:

- данная система (как и СУБА) — одна из первых бортовых систем, она проектировалась и разрабатывалась уже для первых КА;
- задачи СУДН (ориентация, стабилизация, наведение КА для решения целевых задач и т. д.) — важнейшие и первоочередные;
- программы управления СУДН тесно “привязаны” к программам управления других систем и программам “верхнего” уровня ПО БКУ и др.

В состав СУДН включены чувствительные элементы в виде оптико-спектральных датчиков и датчиков угловых скоростей, преобразующие устройства и блоки формирования управляющих сигналов, а также исполнительные органы в виде силовых гироскопов (например, маховиков или гироскопов). Исполнительными органами СУДН служат также двигатели двигательной установки. Состав аппаратуры СУДН может дополняться навигационными приборами и аппаратурой спутниковой навигации.

Основой построения СУДН разработки РКК “Энергия” является корректируемая бесплатформенная инерциальная навигационная система, позволяющая в реальном масштабе времени определять текущее положение связанных осей КА отно-



сительно инерциальной системы координат путем интегрирования составляющих абсолютной угловой скорости (рис. 3).

Функционирование СУДН обеспечивается работой трех контуров управления:

- кинематический контур управления ориентацией позволяет определять угловое рассогласование приборного базиса СУДН с неким опорным базисом, задаваемым режимом ориентации; кроме того, кинематический контур уточняет (корректирует) данный опорный базис;
- динамический контур управления ориентацией позволяет совмещать с заданной точностью связанный базис КА с опорным базисом; кроме того, динамический контур обеспечивает стабилизацию КА в процессе коррекции орбиты и других динамических операций;
- навигационный контур позволяет определять (прогнозировать) в реальном масштабе времени с заданной точностью местоположение КА на орбите по начальным условиям, определяемым в НКУ или в бортовой навигационной аппаратуре, с использованием расчетных гравитационных и магнитных моделей Земли и информации от бортовых навигационных датчиков КА.

К служебным системам автоматических КА рассматриваемого класса предъявляются сходные по своему составу требования, обусловленные полезной нагрузкой (или БЦК) к служебным системам этих аппаратов. В головных предприятиях космической отрасли наметилась тенденция разработки универсальных космических платформ (УКП), единых для различных типов автоматических КА. Интеграция готовой УКП с новым БЦК путем преемственности систем и приборов УКП и минимизации этапов проектирования и наземной отработки позволяет существенно сократить сроки создания новых КА и финансовые затраты при сохранении показателей качества и надежности.

Степень преемственности существующей космической платформы к применению на КА с новой целевой аппаратурой определяется, исходя из характеристик этой аппаратуры и состава требований к УКП, ее обусловленных. Основные характеристики БЦК: энергопотребление, масса, количество фидеров питания, тип интерфейсов и др. В число задач, определяемых условиями работы БЦК, включаются:

- обеспечение точности ориентации и стабилизации КА при работе БЦК;
- обеспечение точности наведения и ее оценка;
- обеспечение заданных параметров рабочей орбиты и длительности эксплуатации КА;
- выполнение заданных режимов работы БЦК и др.

Следствием анализа требований и характеристик БЦК является подтверждение пригодности УКП к интеграции с данным БЦК в составе про-

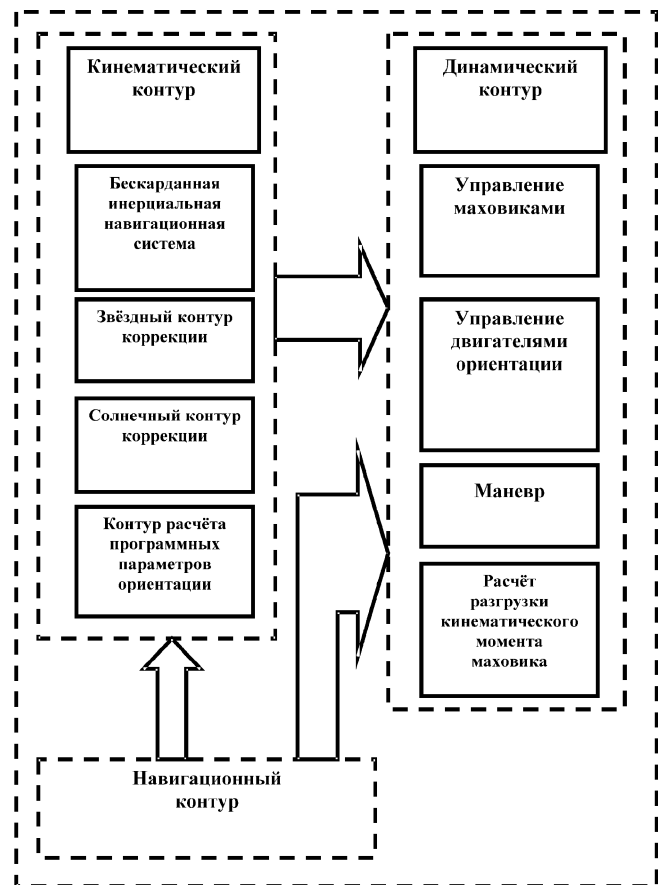


Рис. 3. Структура СУДН на базе двухконтурной бесплатформенной инерциальной системы

ектируемого КА либо определение перечня необходимых доработок и дооснащений УКП. Выбор окончательной модификации УКП применительно к новому БЦК определяется как решение многопараметрического функционала:

$$\Phi (M_i, N_{ij}, U_i, T_i, S_i, \dots, K_{ij}, P_{ij}) = 0,$$

где M_i — массы отдельных приборов и систем; N_{ij} — число однотипных приборов j -го класса в i -й системе; U_i — энергопотребление отдельных приборов и систем; K_{ij} — число интерфейсов (командных сигналов) j -го типа в i -й системе; P_{ij} — вероятность безотказной работы прибора j -го типа в i -й системе; T_i — длительность изготовления и испытаний отдельных компонентов; S_i — стоимость затрат на создание отдельных компонентов.

В такой схеме БКУ рассматривается как ядро УКП. Другими словами, БКУ является совокупностью основных служебных систем и бортового ПО, обеспечивающей интеграцию систем УКП при реализации функциональных задач КА на программно-логическом и физическом уровнях через

соответствующие интерфейсы. Основные задачи БКУ:

- координированное управление функционированием УКП и КА в целом при наземной обработке КА и штатном выполнении программы полета в автоматическом режиме и по информации от НКУ;
- диагностика состояния УКП и ее систем, обнаружение, локализация и парирование расчетных нештатных ситуаций в автоматическом режиме;
- сбор, первичная обработка, хранение и телеметрирование информации оперативного контроля, а также ее использование в задачах управления УКП;
- организация информационно-командного взаимодействия с БЦК.

Решение бортовым комплексом управления перечисленных задач сопровождается подтверждением качественных характеристик, таких как:

- высокий уровень комплексирования, т. е. организация комбинированной работы систем УКП и поддержка интерфейсов при реализации всех полетных режимов и операций в реальном масштабе времени;
- строгая иерархичность многоуровневой структуры построения БКУ и детерминированность движения потоков информации (командно-управляющей информации сверху вниз от “ядра” БКУ к каждому элементу и контрольно-диагностической информации снизу вверх от периферийных элементов до “ядра”);
- развитая “гибкость” управления, реализованная в алгоритмах управления ПО БКУ и обеспечивающая на базе целеуказаний от НКУ и обработанной диагностической информации от датчиковой аппаратуры эффективный расход ресурсов и задействование резервов, а также адаптивность к отказам и парирование нештатных ситуаций.

В РКК “Энергия” универсальная космическая платформа для связных и исследовательских КА была разработана в рамках тематики спутниковой системы “Ямал”. Основная целевая функция КА “Ямал” заключается в предоставлении пользователям спутниковой системы связи “Ямал” услуг в части телекоммуникаций. Запуск в сентябре 1999 г. КА “Ямал-100” и в ноябре 2003 г. двух аппаратов “Ямал-200”, а также последующая эксплуатация этих КА подтвердили идеологическую правильность выбранного направления в построении бортовых комплексов управления.

Бортовой комплекс управления универсальной платформы “Ямал” имеет следующие характеристики:

- троированное резервирование аппаратуры БВС; емкость памяти одной ЦВМ 1024 Кбайт, тактовая частота центральных процессоров 12 МГц;

- распределяемая мощность до 10 кВт, более 150 фидеров питания, около 600 команд управления;
- скорость приема информации из НКУ — 1 Кбит/с, скорость передачи информации на НКУ (при ориентированном полете КА) — 4,8 Кбит/с;
- измеряемых параметров — более 1000 дискретных, температурных и аналоговых;
- вероятность безотказной работы на орбите в течение 10 лет — не менее 0,945.

Реализованный вариант БКУ для УКП “Ямал” позволяет обеспечить требования к КА данной системы, основные из которых заключаются в:

- высокой надежности и длительности непрерывной эксплуатации на геостационарной орбите (ГСО);
- максимальной автономности функционирования КА;
- точности удержания КА в рабочей точке на ГСО 0,1°;
- точности наведения и удержания осей связной аппаратуры 0,2°;
- погрешности определения навигационных параметров по координатам не более 10 км.

Отработанная и готовая к применению в составе целого класса космических аппаратов платформа создает особенную привлекательность для заказчиков перспективных космических изделий. Развитие и совершенствование БКУ предполагается в следующих направлениях:

- доработка (замена на новые разработки) отдельных приборов и исполнительных органов БКУ, позволяющих улучшить точностные, динамические, массово-инерционные характеристики из условия требований со стороны целевой аппаратуры;
- повышение надежности и увеличение гарантированного срока функционирования отдельных приборов (путем применения современных электрорадиоизделий) и БКУ в целом (благодаря внедрению функционального резервирования на аппаратном и программном уровнях);
- при сохранении целевых функций и показателей БКУ снижение его общей массы и экономия интерфейсных ресурсов в интересах полезной нагрузки благодаря унификации разнотипных интерфейсов, применению более легких электрорадиоизделий, оптимизации размещения бортовой кабельной сети, переходу в отдельных позициях структуры БКУ на дублирование вместо троирования аппаратных средств.

Каждое направление предполагает выполнение комплекса работ и мероприятий и требует отдельного рассмотрения.

☎ (095) 513-63-46

E-mail: Eugeny.Mikrin@rsce.ru

