

КОМАНДНО-ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕТОМ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС

© 2016 г. Брега А.Н., Коваленко А.А.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rscce.ru

В процессе реализации программы полета космического аппарата (КА) требуется передавать управляющие воздействия его бортовым системам с Земли. Традиционно выдача управляющих воздействий осуществляется из трех источников: Центр управления полетами, бортовой комплекс управления, экипаж (для пилотируемых КА). Данная статья посвящена решению задач командно-программного управления полетом Российского сегмента Международной космической станции со стороны наземного комплекса управления. Командно-программное управление КА — это реализация запланированных операций КА с использованием командной радиолинии и бортового комплекса управления КА. Под операциями в данном случае можно понимать совокупность управляющих воздействий на КА, «объединенных единым замыслом и направленных на достижение заданной цели». Для того чтобы реализовать полетную операцию, необходимо решить ряд задач командно-программного управления. В данной статье мы уделим основное внимание следующим задачам: формирование массивов командно-программной информации для реализации полетных операций, верификация командно-программной информации на математической модели бортового комплекса управления.

Ключевые слова: управление полетом, командно-программная информация, бортовой комплекс управления.

COMMAND AND PROGRAM CONTROL OF THE MISSION OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION RUSSIAN SEGMENT

Brega A.N., Kovalenko A.A.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rscce.ru

In the course of carrying out a mission of a spacecraft (SC), its onboard systems need to be commanded from the ground. Traditionally, commands are sent from three sources: Mission control center, the onboard control system, the crew (for manned SC). This paper addresses the problems of command-and-program control of the mission of the Russian Segment of the International Space Station from the ground control system. The command and program control of a SC involves implementation of planned SC operations using command RF link and the SC onboard control system. Meant by operations in this case can be the combination of SC control actions «integrated through an overarching design and aimed at achieving a specific goal». In order to carry out a flight operation, a number of problems in command and program controlling need to be solved. This paper will mostly focus on the following problems: generating command and program data arrays for carrying out flight operations, verifying command and program data using a math model of the onboard control system.

Key words: mission control, command and program data, onboard control system.



БРЕГА А.Н.



КОВАЛЕНКО А.А.

БРЕГА Анатолий Николаевич — заместитель начальника отдела РКК «Энергия», руководитель группы командно-программного управления РС МКС, e-mail: anatoly.brega@rsce.ru
 BREGA Anatoly Nikolaevich — Deputy Head of Department at RSC Energia, Team Leader command and control software ISS RS, e-mail: anatoly.brega@rsce.ru

КОВАЛЕНКО Андрей Александрович — кандидат технических наук, начальник отдела РКК «Энергия», руководитель Центра реализации программы полета РС МКС, доцент кафедры СМЗ МГТУ им. Баумана, e-mail: andrei.a.kovalenko@rsce.ru
 KOVALENKO Andrey Alexandrovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Department at RSC Energia, Head of the ISS RS Mission Plan Implementation Center, Associate professor of the Department SM3 of Bauman MSTU, e-mail: andrei.a.kovalenko@rsce.ru

Командно-программное управление (КПУ) космическим аппаратом (КА) — это реализация запланированных операций КА наземным комплексом управления (НКУ) с использованием командной радиолинии и бортового комплекса управления (БКУ) КА. Под операциями в данном случае понимается совокупность управляющих воздействий на КА, «объединенных единым замыслом и направленных на достижение заданной цели». КПУ Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) осуществляется с использованием методов управления, разработанных в период создания и летно-конструкторских испытаний орбитальной станции «Мир» и орбитального корабля «Буран». Однако, особенности построения НКУ (обмен командно-программной информацией (КПИ) между Центром управления полетами (ЦУП) и БКУ по широкополосным каналам связи в составе единого цифрового потока [1, 2]) в сочетании с принципиально новым БКУ РС МКС (единая бортовая вычислительная система сетевого типа, являющаяся ядром системы управления бортовой аппаратурой [3]) привели к значительному росту объема КПИ, необходимой для обеспечения управления полетом. В результате возникла потребность обеспечить решение задач формирования увеличенных объемов КПИ без увеличения численности персонала управления и без снижения качества управления, достигнутого в ходе полета станции «Мир».

Традиционно КПУ КА сводилось к планированию выдачи отдельных функциональных и числовых команд в БКУ. Выдача таких команд в составе массивов КПИ осуществлялась исключительно в зоне видимости отдельных командно-измерительных пунктов (КИП) НКУ. Отложенное по времени управление, в частности, вне зон радиовидимости КА, было возможно только при наличии жестко запрограммированных на борту КА циклограмм. Вмешательство в процесс исполнения таких циклограмм было крайне ограничено, а их изменение во время полета КА невозможно.

Таким образом, КПУ сводилось к планированию выдачи команд в виде расставления на временной оси индексов (шифров) команд в программе сеансов управления (сеансов связи). Ситуация в корне изменилась, когда в составе БКУ появились управляющие компьютеры (бортовые цифровые вычислительные комплексы — БЦВК), например, система управления движением (СУД) транспортного корабля «Союз-Т» с БЦВК «Аргон-16», СУД базового блока орбитальной станции «Мир» с БЦВК «Аргон-16», позднее «Салют-5Б». Применение БЦВК в составе БКУ обеспечило возможность вводить по командной радиолинии циклограммы программно-временного управления (ПВУ) из НКУ в БКУ в виде массивов цифровой управляющей информации (МЦИ). Персонал Главной оперативной группы управления (ГОГУ) получил возможность разрабатывать циклограммы ПВУ для реализации различных программ управления бортовыми системами (в первую очередь это относится к СУД станции «Мир»). Использование в составе циклограмм ПВУ директив ожидания (временные и логические условия), записи в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) управляющего компьютера массивов и отдельных битов, полей битов дало очень широкие возможности по разработке и исполнению алгоритмов реализации полетных операций любой сложности, причем с привязкой или без привязки к зонам радиовидимости КИП. Оперативная разработка бортовых программ полета (БПП) в виде набора параллельно исполняющихся циклограмм с ветвлениями (в виде логических условий, условных и безусловных переходов, циклов) силами персонала дежурной смены ГОГУ потребовала коренного изменения программного обеспечения (ПО) командного информационно-вычислительного комплекса (КИВК) ЦУП. Эти изменения касались, в первую очередь, создания формализованных языков описания текстов циклограмм ПВУ с символьными идентификаторами директив управления. Синтаксис таких языков был

Таблица 1

максимально приближен к принятой в ГОГУ терминологии и аббревиатурам, применяемым в детальных планах полета орбитальной станции. Кроме того, использование циклограмм с ветвлениями (рис. 1) потребовало разработки средств отладки программ с помощью моделей БКУ [1].

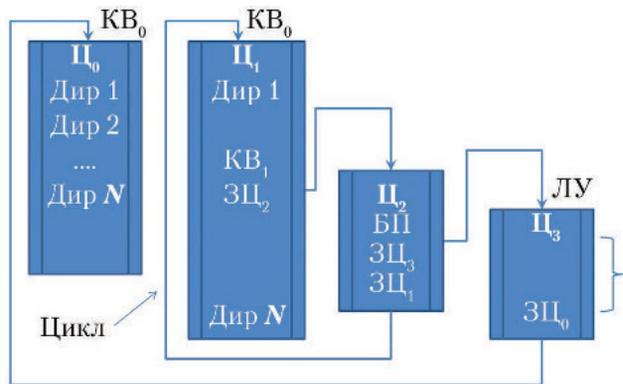


Рис. 1. Циклограммы с ветвлениями: KB – календарное время; ЛУ – логическое условие; БП – безусловный переход; Ц₀...Ц₃ – циклограммы № 0...3; ЗЦ – запуск циклограммы

Примечание. Тело циклограммы может содержать директивы ветвления. Директива ветвления (условная инструкция, условный оператор) – оператор, конструкция языка описания программы полета, обеспечивающая выполнение определенной команды (набора команд) только при условии истинности некоторого логического выражения, либо выполнение одной из нескольких команд (наборов команд) в зависимости от значения некоторого выражения или телеметрического параметра.

Формирование МЦИ для БКУ РС МКС также основано на использовании искусственных формальных языков описания планируемых управляющих воздействий, функций и режимов функционирования бортовых систем. Однако, общее количество таких языков значительно больше, чем было разработано для станции «Мир». Это объясняется тем, что РС МКС имеет в составе своего БКУ большее число управляющих компьютеров. В соответствии с распределением управляющей информации по исполняющим компьютерам бортовой вычислительной системы (БВС) и уровнями управления (рис. 2) языки описания управляющих воздействий делятся на виды, приведенные в табл. 1.

Уровни управления, показанные на рис. 2, соответствуют уровням программного управления сетевой БВС. Разработчики программного обеспечения БВС РС МКС создали соответствующие программные комплексы управления, разместив их во всех управляющих компьютерах БВС, и обеспечили интерфейс к ним для персонала управления посредством ввода МЦИ, содержащих программы и данные для них в числовой форме [3].

Виды бортовых программ РС МКС

Бортовая программа	Исполняющий компьютер
Бортовая программа полета	ЦВМ
Суточная программа полета	ЦВМ, ТВУ МИМ1, ТВУ МИМ2
Расписание сеансов связи	ЦВМ
Программно-временное управление	ЦВМ, ТВМ СМ

Примечание. ЦВМ – центральная вычислительная машина; ТВУ – терминальное вычислительное устройство; ТВМ СМ – терминальная вычислительная машина служебного модуля; МИМ1, МИМ2 – модули.

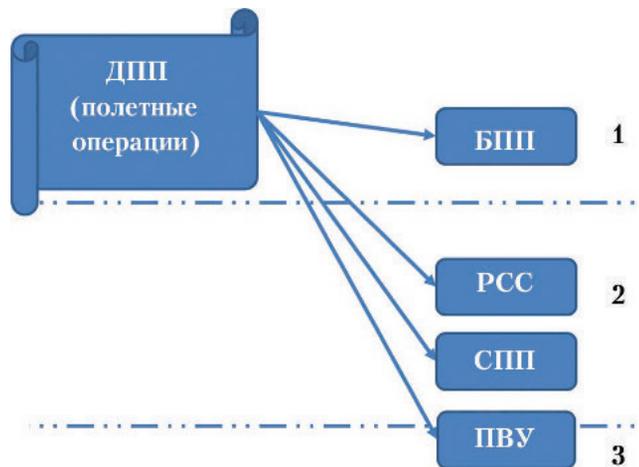


Рис. 2. Уровни управления бортовой вычислительной системы Российского сегмента МКС: 1 – верхний уровень; 2 – функциональный уровень; 3 – приборный уровень

Примечание. ДПП – детальный план полета; БПП – бортовая программа полета верхнего уровня; РСС – расписание сеансов связи; СПП – суточная программа полета; ПВУ – программно-временное управление.

Верхний уровень – это реализация целевой операции в виде последовательности режимов КА посредством исполнения predetermined бортовых программ управления и актуальных уставочных данных. На функциональном уровне происходят адаптация и расширение БПП верхнего уровня для учета текущих операционных условий, реализация основных рутинных операций с целевыми нагрузками; на приборном уровне – адаптация и расширение функций бортовой системы, тонкая настройка отдельных приборов для учета текущих условий эксплуатации, реализация нетиповых режимов и функций систем.

Применение развитых средств формирования МЦИ, обеспечивающих управление РС МКС в целом и его отдельными бортовыми системами как в реальном времени, так и в отложенном (по временным и логическим условиям), предоставило возможность разрабатывать и реализовывать на борту РС МКС

полетные операции любого уровня сложности, включающие комплексные режимы бортовых систем.

Разнообразные средства управления БКУ РС МКС потребовали ввода в память БВС большого количества различных числовых данных, задаваемых в виде уставок, что, в свою очередь, привело к значительному росту объема КПИ, вводимого в БКУ по командной радиолнии, по сравнению с орбитальной станцией предшествующего поколения — «Мир» (рис. 3). Диаграмма построена по данным, полученным группой автоматизированного планирования ГОГУ орбитальной станции «Мир» [1] и группой командно-программного управления ГОГУ РС МКС, которые в разные годы возглавляли авторы статьи.

К уставкам относятся как числовые данные, записываемые непосредственно в переменные бортового ПО, так и значения параметров, передаваемых в составе параметрических управляющих воздействий. Ввод числовых параметров непосредственно в процессе создания и редактирования исходных текстов бортовых программ управления показал неэффективность такого подхода, так как он не обеспечивает повторное использование фрагментов кода программ, содержащих числовые значения. Непосредственный ввод данных в текст программы делает ее неудобочитаемой, провоцирует операторские ошибки. Для решения этих проблем в состав переменных исходных данных для формирования КПИ были введены программные объекты с промежуточным кодом, обеспечивающие возможность гибкого кодирования любых числовых данных. Такие программные объекты получили название именованных массивов параметров (ИМП). Каждый ИМП имеет уникальный идентификатор и содержит один или несколько блоков данных. Блоки данных состоят из, как минимум, одной локальной или внешней переменной с указанием источника данных. В качестве источников данных могут выступать либо информация из баллистической формы, либо непосредственно вводимые значения переменных. К внешним переменным относятся переменные, прототипами которых являются объекты из базы данных БКУ [2]. Таким образом, ИМП являются средством формирования стандартных запросов пользователя к базам данных КИВК и БКУ, осуществляющих виртуальное объединение таблиц в БД БКУ и КИВК, а также выборку данных в соответствии с заданными критериями.

Именованные массивы параметров применяются при формировании КПИ всех уровней управления в качестве стандартного средства

формирования и контроля допустимости значений числовых уставок и параметров управляющих воздействий. Пример содержания ИМП с параметрами вектора состояния объекта приведен в табл. 2, а на рис. 4 приведен пример ИМП с уставочными данными для режима верхнего уровня «Коррекция орбиты». Оба примера иллюстрируют обращения к БД БКУ, баллистическим формам и прямой ввод числовых значений параметров. Числовые параметры могут кодироваться в машинное представление в соответствии с типами данных, обусловленными организацией памяти бортовых компьютеров. К таким типам относятся символьные или текстовые *char*, целые (знаковые и беззнаковые) *integer*, длинные целые (знаковые и беззнаковые) *long*, вещественные числа с плавающей точкой *float*, вещественные числа с плавающей точкой двойной точности *double* и др.

Совместное использование БД БКУ и ИМП для формирования КПИ обеспечили следующие операционные преимущества:

- эффективное формирование МЦИ с контролем количества, типов числовых значений, подстановкой инженерных названий и текстовых тарифов независимо от версии ПО БВС;
- создание и редактирование ИМП доступно оператору дежурной смены;
- обеспечивается переход к летной эксплуатации новых версий ПО БВС без перепрограммирования КИВК ЦУП. Подготовка КИВК может ограничиваться перезагрузкой базы данных БКУ.

Разработка БПП и команд верхнего уровня управления (КВУ) осуществляется на основе типовых описаний структур команд и прототипов уставочных данных. Эти описания и прототипы заданы разработчиками ПО БВС и являются постоянными исходными данными для решения задач формирования КПИ. Особый интерес представляют команды загрузки уставочных данных для реализации режимов МКС или РС МКС. Эти команды могут быть привязаны как к расписанию БПП, так и к отдельным командам, задающим перевод МКС в соответствующий режим в реальном масштабе времени. Исходный текст БПП на формальном языке описания БПП представляет собой набор фраз, каждая из которых содержит следующую информацию:

- признак расписания (переход в режим по расписанию или в реальном времени);
- календарное время (идентификатор баллистических условий) — для перехода по расписанию;
- идентификатор режима и идентификатор ИМП для задания уставочных данных.

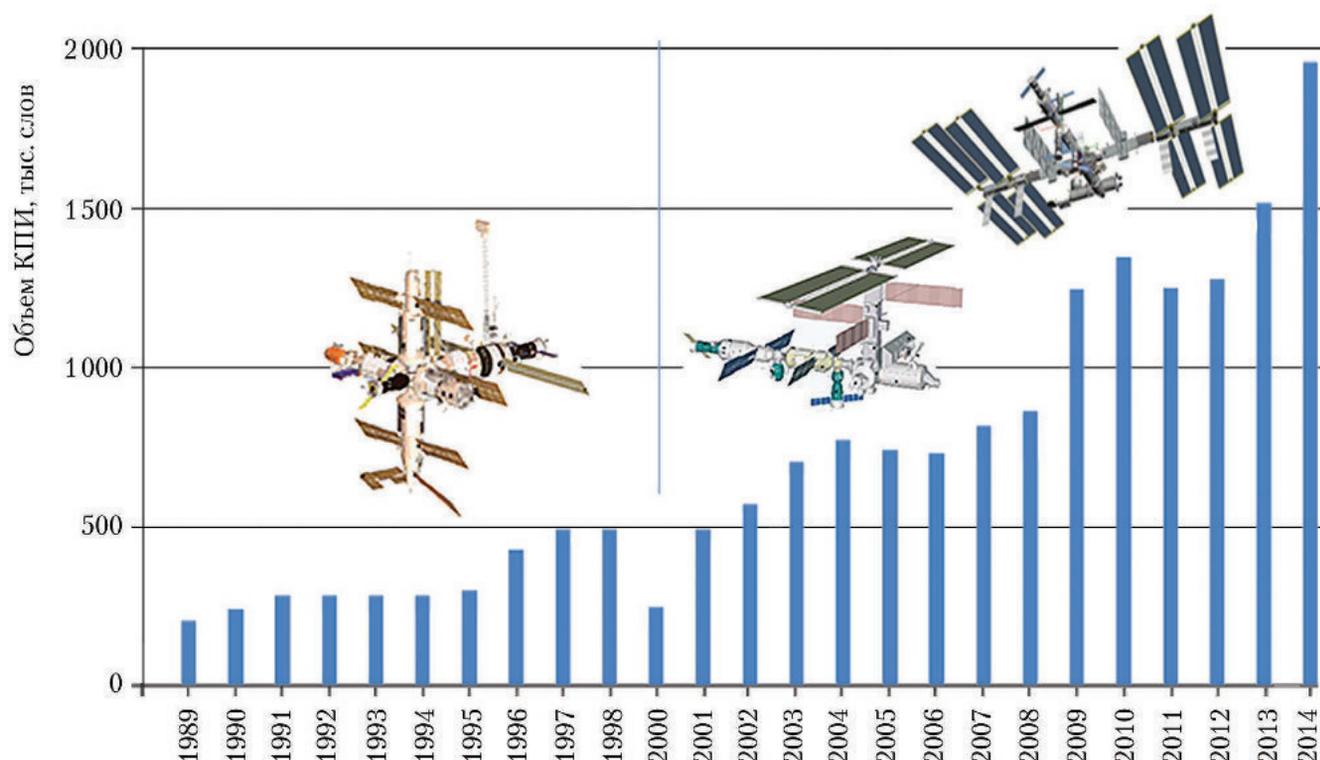


Рис. 3. Объем командно-программной информации (КПИ) для бортового комплекса управления орбитальных станций «Мир» и МКС

Таблица 2

**Содержание именованных массивов параметров (ИМП)
на примере задания параметров вектора состояния МКС**

Атрибут	Значение	Тип данных	Объект в БД БКУ	Объект в БД КИВК
Идентификатор ИМП	BC2463	ТЕКСТ	—	—
Идентификатор блока данных	ВЕКТОР	ТЕКСТ	—	—
Номер формы	371	ЦЕЛОЕ	—	—
Номер объекта	1	ЦЕЛОЕ	—	—
Номер начального условия	2 160	ЦЕЛОЕ	—	—
Номер расчета	1	ЦЕЛОЕ	—	—
Виток	2 463	ЦЕЛОЕ	—	—
Время	16.11.11.06.11.38, 0000	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_T	TUTC_ASV
Координата X	-2944245.53931	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[0]	X_KA
Координата Y	-3239724.27730	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[1]	Y_KA
Координата Z	5135217.44333	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[2]	Z_KA
Координата VX	4300.1522985500	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[3]	VX_KA
Координата VY	-6214.9490041100	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[4]	VY_KA
Координата VZ	-1437.2493386900	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[5]	VZ_KA
Баллистический коэффициент	0,03176	ВЕЩЕСТВЕННОЕ ДВОЙНОЙ ТОЧНОСТИ	GTUDB_X[6]	K_BAL

Примечание. БД БКУ – база данных бортового комплекса управления; КИВК – командный информационно-вычислительный комплекс.

```

C29 КОРРЕКЦИЯ ()
ЗАПРОС БФ=318 НУ=2360 ТЛГ=101 СБИ=38-2;
  ДАННЫЕ ОРИЕНТАЦИЯ НА ИМПУЛЬС;
    V_SMC_REB_TYPE = 1;
    V_SMC_REB_DT = 0;
    V_SMC_ZG1MODE3 = 0;
    V_SMC_ZG2MODE3 = 0;
    V_SMC_REB_T0 = "29.04.14.10.45.00-00.50.00";
    V_SMC_REB_T_TNCM = "29.04.14.10.45.00-00.35.00";
    V_SMC_REB_T_B1 = ORIENT // ОСК+РАЗВОРОТ;
    V_SMC_REB_T_R1 = KVAT_0, KVAT_1, KVAT_2, KVAT_3;
  КД;
ЦЕЛОЕ БЕЗЗНАКА МСЕК1;
ЗАПРОС БФ=112 НУ=2380 ТЛГ=1;
  ДАННЫЕ ИМПУЛЬС МЕТРЫ СЕК;
    V_SMC_REB_T_DV = IMP_SIZE1_F;
    V_SMC_REB_T_MV15 = T_VKL_DU1 // Время 1-го импульса;
    МСЕК1 = 00 // Доли секунд времени 1-го импульса;
  КД;
ЦЕЛОЕ БЕЗЗНАКА REZERV[22];
ЗАПРОС БФ=318 НУ=2382 ТЛГ=102 СБИ=38-2;
  ДАННЫЕ ОРИЕНТАЦИЯ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСА;
    V_SMC_REB_T_TCO = "29.04.14.10.45.00+10";
    V_SMC_REB_T_B2 = ORIENT // ОСК+РАЗВОРОТ;
    V_SMC_REB_T_R2 = KVAT_0, KVAT_1, KVAT_2, KVAT_3;
    V_SMC_REB_T_UWR = 0.1;
    V_SMC_REB_BRO = 300.0;
    V_SMC_REB_BRK = 237.39;
    V_SMC_REB_FI0 = 0.0;
    V_SMC_REB_FI1 = 0.0;
    GTUBM_BT1.B = 0001000001000000U;
    GTUBM_BT2.B = 1110010000000000U;
    GTUBM_BD1.B = F800X;
    GTUBM_BZ1.B = 03FFX;
    V_SMC_REB_BK2 = 0X, 0, 0, 0, 0, 0;
    GTUBM_B14.B = 0X;
    GTUBM_B15.B = 0X;
    GTUCA_KDK[0] = 0X, 0X;
    V_SMC_REB_UP.B = 10000000000000100U;
    V_SMC_REB_DTRTGK = 0;
    REZERV[21] = 0 // Резерв, не используется;
  КД;

```

Рис. 4. Пример именованного массива параметров

Пример задания расписания БПП и уставочных данных для операции «Коррекция орбиты МКС» с последующим переходом МКС в стандартный режим приведен ниже:

```

БПП *
ВИТ=1234
ТН7(34) КОРРЕКЦИЯ_ОРБ «С29_УД_КОРРЕКЦИЯ»
...
СТАНДАРТ «С29_УД_СТАНДАРТ»

```

В приведенном примере идентификатор команды **КОРРЕКЦИЯ_ОРБ** представляет собой ссылку на описание команды верхнего уровня загрузки уставочных данных для режима

«Коррекция орбиты» в базе данных команд. Это описание содержит значения полей кода команды в соответствии с техническим описанием ПО БВС. Специальное ПО «Редактор команд верхнего уровня» дает возможность пользователю разрабатывать новые команды или редактировать существующие.

Идентификаторы **ИМП С29_УД_КОРРЕКЦИЯ** и **С29_УД_СТАНДАРТ** содержат информацию о параметрах, задающих уставочные данные режимов «Коррекция орбиты» и «Стандартный»:

- тип данных;
- прототипы переменных в соответствии с БД БКУ;

- атрибуты форм обмена данными, содержащих значения параметров, рассчитанные смежными службами и группами ГОГУ;
- числовые значения параметров, задаваемые оператором.

В результате трансляции приведенного примера создаются два МЦИ для ЦВМ:

- команда загрузки расписания переходов в режимы «Коррекция орбиты», «Стандартный»;
- команда загрузки уставочных данных для БПП.

Аналогичный подход применен и для формирования суточных программ полета (СПП) функционального уровня СМ (ЦВМ) и других модулей РС МКС (ТВУ МИМ1, ТВУ МИМ2). Разработан язык описания СПП с едиными синтаксисом и семантикой для всех модулей РС МКС. Синтаксические конструкции языка СПП значительно богаче и разнообразнее, чем таковые в языке описания БПП. Циклограммы СПП содержат директивы вызова бортовых функций, так называемые «Управляющие воздействия» с переменными параметрами; директивы задания комплексных режимов бортовых систем; директивы выдачи отдельных команд управления. Опыт эксплуатации РС МКС на начальном этапе показал необходимость введения в СПП возможности выдачи пакетов команд в терминальные компьютеры модулей и в информационно-управляющую систему. Реализация этого предложения разработчиками ПО БКУ дало возможность централизованного программного управления реализацией комплексных полетных операций, в т. ч. операций с целевыми нагрузками. Для этого были введены соответствующие операторы в язык описания СПП.

На рис. 5 приведен пример типичного полного исходного текста СПП для РС МКС с именованным массивом параметров для управляющего воздействия. Как видно из исходного текста, программа полета функционального уровня на интервал полета длительностью 1 сут достаточно компактна и удобочитаема благодаря использованию ИМП и макрокоманд (устоявшаяся последовательность многократно используемых операторов, имеющих собственный идентификатор). В процессе трансляции указанной программы формируется развернутый исходный текст, содержащий раскрытые макрокоманды и ИМП. Фрагмент развернутого исходного текста СПП, полученного из исходных текстов СПП и ИМП с рис. 5 и 6, изображен на рис. 7. Как видно из приведенных

фрагментов СПП, основное назначение программ полета функционального уровня — решение рутинных задач управления, не требующих сложной логики, которая выражается через различные директивы ветвления. Обычно в СПП РС МКС включаются команды для всех его модулей, которые, безусловно, должны быть выданы в заданное время в составе централизованной программы полета, что позволило значительно сократить использование командной радиоперехватной линии для выдачи команд в зонах радиовидимости КИП, освобождая их для управления другими КА, в частности, транспортными космическими кораблями «Союз» и «Прогресс». Строго говоря, командная радиоперехватная линия используется для управления полетом РС МКС в двух случаях: для ввода в память БКУ бортовых программ отложенного управления и для выдачи КИП по дополнительному условию, которое невозможно сформулировать в виде логического условия в БВС.

Как уже говорилось выше, малые исследовательские модули МИМ1 и МИМ2 имеют возможность выполнения локальных СПП, исполняемых ТВУ в составе БВС этих модулей. Синтаксис языка описания СПП модулей идентичен синтаксису языка описания СПП РС МКС в ЦВМ. Единый синтаксис СПП модулей позволил унифицировать специальное математическое обеспечение (СМО) формирования МЦИ и снизить издержки на освоение приемов использования СМО персоналом управления.

На рис. 8 в качестве примера изображен алгоритм отключения динамического контроля в случае автоматического рестарта ТВМ. Этот алгоритм содержит проверки логических выражений на основе значений статусного параметра состояния БВС РС МКС (наличие рестарта ТВМ $A_ST_WORD.A_ST.CTVMRST == 1$, проверки условия подтверждения завершения рестарта $A_ST_WORD.A_ST.CTVMRST == 0$). Если признак рестарта снялся (рестарт завершен), выполняется ожидание признака готовности ТВМ. При выполнении логического условия «Готовность ТВМ» ($AS_TCRD == 1$) выполняется управляющее воздействие **F10_0 (9A00 hex, 0172 hex, 7FFF hex)** на формирование пакета передачи из ЦВМ в ТВМ управляющего воздействия с запретом динамического контроля. Данный алгоритм разработан специалистами ГОГУ для обеспечения управления РС МКС с автоматическим анализом значений телеметрируемых параметров РС МКС и автоматической выдачей команд управления в БКУ без вмешательства персонала управления с Земли.

```

РЦ *; ЗАПУСК;
ВИТ 3356;
  (К0(47)+60); БИТС "ЗАП-А" СК=01 ПР=02 ВИТ=3362 ТК=(Н7(35)-60);
ВИТ 3363;
  (К7(35)-300); БИТС "ВОСПР-А Обратное";
ВИТ 3364;
  (К0(35)+60); БИТС "ЗАП-А" СК=08 ПР=02 ВИТ=3365 ТК=(Н7(33)-60);
ВИТ 3365;
  (К7(33)-210); БИТС "ВОСПР-А Обратное";
РЦ *; ЗАПУСК;
ВИТ 3353;
  (Н7(34)); *ДЫМ_Ц();
ВИТ 3355;
  (Н7(47)); *КОНТР_ШИН();
ВИТ 3366;
  (Н7(33)); УВТ F4_АОТ ИНФ=83;
  *СВРОС(33);
РЦ *; ЗАПУСК;
%Прим.1
(07.11.14.10.23.00); УВТ F19_0 ИНФ_ВК="ТМ_КАДР_26";
%Прим.2
  *ТМ МАС РТ_177_21();
РЦ *; ЗАПУСК;
%Прим.10
*РВО(3352/34/34);*РВО(3353/34/34);*РВО(3355/47/47);
*РВО(3362/35/35);*РВО(3363/35/35);*РВО(3364/35/35);*РВО(3366/33/33);
РЦ *; ЗАПУСК;
%Прим.12
*ГФИ_11 СВРОС_УСМ(3365/33/33);
РЦ *; ЗАПУСК;
%Прим.11
*ВТН НЕЙТРОН(3354/34/34);
РЦ *; ЗАПУСК;
%Прим.14
(07.11.14.09.11.00); *НЧ_ВПИ();
%Прим.15
ВИТ 3353;
  (К0(34)+60); *НЧ();
ВИТ 3354;
  (К0(34)+60); *НЧ();
ВИТ 3355;
  (07.11.14.13.58.00); УВТ FB_20 ИНФ=1,0;
  (К0(47)+60); *НЧ();
ВИТ 3356;
  (07.11.14.15.21.00); УВТ FB_20 ИНФ=2,0;
  (К0(47)+120); *НЧ();
ВИТ 3362;
  (К0(35)+60); *НЧ();
%Прим.14
(08.11.14.00.59.00); УВТ FB_6;
  П 60; КОМ 02022;
РЦ 33;
%Прим.5
(07.11.14.10.33.00); УВТ F1_38;
ВЫХОД; КОНЕЦ 07.11.14.18.00.00;

```

Рис. 5. Пример исходного текста суточной программы полета Российского сегмента МКС

```

ТМ КАДР 26 (ТМ/F19_0)
ЦЕЛОЕ БЕЗЗНАКА УП_СЛОВО, НОМ ЗАПРОСА;
ЦЕЛОЕ БЕЗЗНАКА ИМЯ1, ИМЯ2, ИМЯ3, ИМЯ4, ИМЯ5, ИМЯ6;
ЦЕЛОЕ БЕЗЗНАКА АДР1[3], АДР2[3], АДР3[3], АДР4[3], АДР5[3], АДР6[3];
ДАННЫЕ МИКРОСКОП;
  УП_СЛОВО = 1004X //ТМ 4, режим <Микроскоп>;
  НОМ ЗАПРОСА = 0050X //Номер запроса;
  ИМЯ1 = 0003X //V TIME 4;
  АДР1[0] = 2001X, 0000X, 0004X //Время измерения;
  ИМЯ2 = 0003X //GTIFV W;
  АДР2[0] = 4804X, 0000X, 000CX //Вектор угловой скорости КА в ССК;
  ИМЯ3 = 0003X //GTIFE WPR;
  АДР3[0] = C300X, 0000X, 000CX //Оценка угловой скорости;
  ИМЯ4 = 0003X //GTIFQ N;
  АДР4[0] = 4803X, 0004X, 000CX //x, y, z - компоненты кватерниона N;
  ИМЯ5 = 0003X //GTIFV WB;
  АДР5[0] = 4805X, 0000X, 000CX //Требуемая угловая скорость КА в ССК;
  ИМЯ6 = 0003X //GTIFR U;
  АДР6[0] = 3000X, 0000X, 0010X //Упр. сигн. для рулевых машинок КД1 и КД2;
КД;

```

Рис. 6. Пример исходного текста именованных массивов параметров для суточной программы полета

```

0064      Значение:100
%----- канал 4 -----
    РЦ 4;
    ЗАПУСК;
%Прим.1
    (07.11.14.10.23.00);
    УВТ F19_0 ИНФ_БК="ТМ КАДР_26";
    1004      1004X      ТМ 4, режим <Микроскоп>
    0050      0050X      Номер запроса
    0003      0003X      V_TIME 4
    2001      2001X      Время измерения
    0000      0000X
    0004      0004X
    0003      0003X      GTIFV_W
    4804      4804X      Вектор угловой скорости КА в ССК
    0000      0000X
    000с      000сX
    0003      0003X      GTIFE_WPR
    с300      с300X      Оценка угловой скорости
    0000      0000X
    000с      000сX
    0003      0003X      GTIFQ_N
    4803      4803X      x, y, z - компоненты кватерниона N
    0004      0004X
    000с      000сX
    0003      0003X      GTIFV_WB
    4805      4805X      Требуемая угловая скорость КА в ССК
    0000      0000X
    000с      000сX
    0003      0003X      GTIFR_U
    3000      3000X      Упр. сигн. для рулевых машинок КД1
    0000      0000X
    0010      0010X
%Прим.2
% *ТМ МАС РТ 177 21();
    УВТ F4_STOP_RT ИНФ=177;      07.11.14.10.23.01
        00b1      Значение:177
    УВТ F4_STOP_RT ИНФ=179;      07.11.14.10.23.02
        00b3      Значение:179
%----- канал 5 -----
    УВТ F4_STOP_RT ИНФ=180;      07.11.14.10.23.05
        00b4      Значение:180
    УВТ F4_STOP_RT ИНФ=181;      07.11.14.10.23.06
        00b5      Значение:181
    УВТ F4_PT ИНФ=177;      07.11.14.10.23.07
        00b1      Значение:177
    УВТ F4_PT ИНФ=179;      07.11.14.10.23.08
        00b3      Значение:179
    УВТ F4_PT ИНФ=180;      07.11.14.10.23.09
        00b4      Значение:180
    УВТ F4_PT ИНФ=181;      07.11.14.10.23.10

```

Рис. 7. Развернутый исходный текст сutoчной программы полета с именованными массивами параметров (фрагмент)

Реализация подобных алгоритмов посредством СПП функционального уровня довольно затруднительна (хотя и возможна). Вместе с тем, их реализация может быть достаточно простой и эффективной, если использовать циклограмму ПВУ приборного уровня.

Циклограммы ПВУ в ЦВМ и ТВМ служебного модуля МКС обеспечивают возможность управления отдельными приборами БКУ с учетом изменения значений любых телеметрических параметров, имеющих в ЦВМ или ТВМ, соответственно. Наличие

разнообразных директив ожидания логического условия, условных и безусловных переходов, циклов, логических и арифметических выражений позволяет применять циклограммы ПВУ для реализации сложных, нестандартных процедур управления отдельными приборами и системами. Для обеспечения надежного и безошибочного формирования циклограмм был разработан формальный алгоритмический язык описания циклограмм ПВУ. На рис. 9 и 10 приведены исходный текст и МЦИ циклограммы ПВУ, реализующей алгоритм управления, представленный на рис. 8.

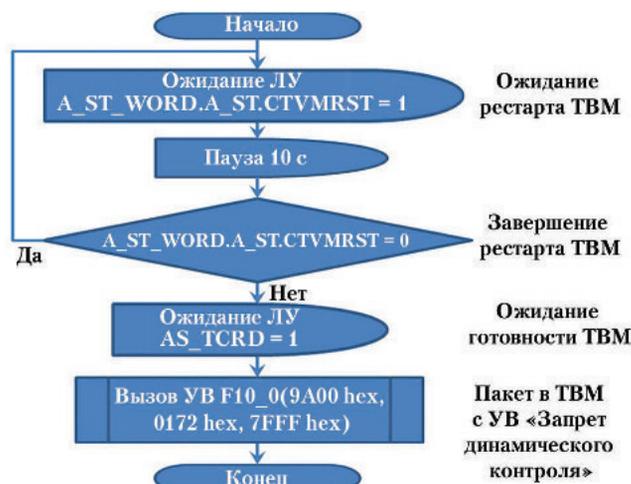


Рис. 8. Пример алгоритма циклограммы программно-временного управления центральной вычислительной машины Российского сегмента МКС

Примечание. ТВМ — терминальная вычислительная машина; ЛУ — логическое условие; УВ — управляющее воздействие.

Второй важнейшей задачей КПУ РС МКС является контроль достоверности КПИ. Большой объем управляющей информации, наличие параллельного исполнения множества циклограмм с ветвлениями, директив записи данных в переменные ПО БВС потребовали обеспечить возможность имитационного моделирования исполнения директив циклограмм (каналов) СПП, исполнения директив ПВУ. Моделирование исполнения директив отложенного управления (интерпретация КПИ) необходимо для отладки алгоритмов, реализуемых с помощью директив управления, поиска логических и операторских ошибок в массивах КПИ. Имитационное моделирование осуществляется с помощью стенда наземного комплекса отладки (НКО), основное назначение которого — отладка ПО БВС [3]. В дополнение к НКО были разработаны упрощенные модели бортовых программных комплексов прямого и отложенного управления в ЦВМ и ТВМ СМ. Разработка упрощенных моделей обеспечила возможность быстрой проверки соответствия между КПИ и детальным планом полета (ДПП) в процессе формирования КПИ. ПО моделирования размещается в персональном компьютере на рабочем месте специалиста ГОГУ, что дает возможность выполнить моделирование с минимальными затратами времени и проверить несколько вариантов КПИ до начала работы со стендом НКО.

Ранее подобные модели были применены при решении задач КПУ орбитальной станцией «Мир». Интерпретация КПИ заключается в выполнении следующих действий [4]:

- имитация исполнения директив, включенных в состав массивов цифровой информации,

поступающих в интерпретатор КПИ, содержащий набор моделей БКУ;

- формирование массивов данных, описывающих изменения состояния переменных в модели ОЗУ БКУ;
- определение моделируемого времени исполнения директив;
- формирование служебной телеметрической информации (ТМИ) о событиях, происходящих в моделях, включая изменения состояния модели ОЗУ.

На рис. 11 изображена схема технологического процесса формирования МЦИ для БВС, показывающая место имитационного моделирования на примере формирования и отработки циклограмм СПП [1]. При разработке интерпретатора КПИ для РС МКС был использован подход, ранее апробированный в интерпретаторе СУД для орбитальной станции «Мир», однако состав бортовых программных комплексов отложенного во времени управления БВС РС МКС потребовал создания большего количества программных модулей для моделирования. Имитация исполнения директив управления осуществляется в программных модулях, имитирующих бортовые программные комплексы прямого и отложенного управления в ЦВМ и ТВМ. К таким модулям относятся (рис. 12):

- модуль приема и обработки КПИ в виде пакетов *CCSDS*;
- модуль исполнения директив командной радиолинии — интерпретатор командной радиолинии;
- модуль исполнения директив СПП — интерпретатор СПП;
- модуль исполнения КВУ — интерпретатор КВУ;
- модуль исполнения расписания сеансов связи — интерпретатор расписания сеансов связи.

Программные модули имитации работы бортовых программных комплексов выполняются последовательно в порядке, определяемом частотой исполнения бортовых программ и таблицей приоритетов, которые установлены для интерпретатора КПИ. После завершения работы каждого программного модуля выполняется формирование массива моделируемой и специальной программной ТМИ.

Обработка, документирование и отображение ТМИ осуществляется в реальном времени моделирования на каждом шаге цикла моделирования, как показано на рис. 12 [1]. Результаты обработки ТМИ записываются в протокол моделирования (*log*-файл), который сравнивается с ДПП. По результатам сравнения оператор принимает решение о соответствии/несоответствии КПИ и ДПП.

```

Ц Номер=0011   Пуск=Н   Ини=Д   Нач.адр=   Удал.из К=Н   Пост.хранить=Д
.....
      06.01.80.03.00.00,000
МЕТКА=МЕТО
ЛУ   Иден=A_ST_WORD.A_ST.STVMRST
      Смещение=5   К-во бит=01   Биты=1U
П    00.00.10,000
УПВ  Иден=A_ST_WORD.A_ST.STVMRST
      Смещ=5   S=0   Метка перехода=МЕТО
ЛУ   Иден=AS_TCRD
      Смещение=0000   К-во бит=01   Биты=1U
УВ   Иден=F10_0   Контроль=Н
      Инф =9A00X 0172X 7FFFX
КОНЕЦ T=23.59.00
    
```

Рис. 9. Пример исходного текста циклограммы программно-временного управления центральной вычислительной машины Российского сегмента МКС

Код	БСП	Комментарий	(Бортовая шкала времени GPS-UTC=??)
0b1d		APID=797 ЦУП-М ЦВМ СМ	
4000		Начало сегмента;	SF=01; N пакета PSC=0
0051		Длина пакета 81 байт	
0000		В БВС СМ не используется	
0000		В БВС СМ не используется	
0068		PT=8; TID=1	
2000		PID=4 Российская информация PIDF0=0 PIDF1=0 пакеты РККЭ	
0000		Резервное поле	
*			
91be		Директива записи циклограммы, БСП= 2946	
2800		Адрес в буфере	
1704		-----	
001c	2946	Длина циклограммы 28	
000b	2947	Код имени Ц = 11 , с пост.хранением	
0000	2948	Адрес метки СТОП	
0	6600	Календарное время	
1	0000	ДМВ 06.01.80.03.00.00	
2	0000	GMT 06.01.80.00.00.00	
3	0000	-----	
4	2181	2953	Логическое условие без контр.врем., к-во бит=1
5	0005	2954	Смещение в битах от начала поля=5
6	1e00	2955	Табличная адресация: A_ST_WORD.A_ST.STVMRST
7	0003	2956	рестарт ТВМ
8	0000	2957	Поле битов: Биты:
9	0001	2958	1U
10	680a	2959	Короткая пауза 00.00.10,000
11	4965	2960	Усл.переход по биту N 5 =0 адресация- табличная
12	0004	2961	Адрес перехода: адресация по метке МЕТО 0004
13	1e00	2962	Табличная адресация: A_ST_WORD.A_ST.STVMRST
14	0003	2963	рестарт ТВМ
15	2001	2964	Логическое условие без контр.врем., к-во бит=1
16	0004	2965	Смещение в битах от начала поля=4
17	1800	2966	Абсолютная адресация: AS_TCRD
18	bb8a	2967	Готовность ТВМ
19	0000	2968	Поле битов: Биты:
20	0001	2969	1U
21	9a03	2970	Управляющее воздействие
22	0a00	2971	Нфун=10 Ндан=0 Формирование CCSDS-пакета ЦВМ -> ТВМ
23	7fff	2972	Маска режимов
24	9a00	2973	Вводимая информация: 9A00X
25	0172	2974	Вводимая информация: 0172X
26	7fff	2975	Вводимая информация: 7FFFX
27	7e00	2976	Директива конца циклограммы ПВУ
	7e00		Директива конца циклограммы КРЛ
	e0c2		Контрольная сумма
*			
0b1d		APID=797 ЦУП-М ЦВМ СМ	
8001		Конец сегмента;	SF=10; N пакета PSC=1
0029		Длина пакета 41 байт	
0000		В БВС СМ не используется	
0000		В БВС СМ не используется	

Рис. 10. Массив цифровой информации с циклограммой программно-временного управления центральной вычислительной машины служебного модуля МКС (фрагмент)

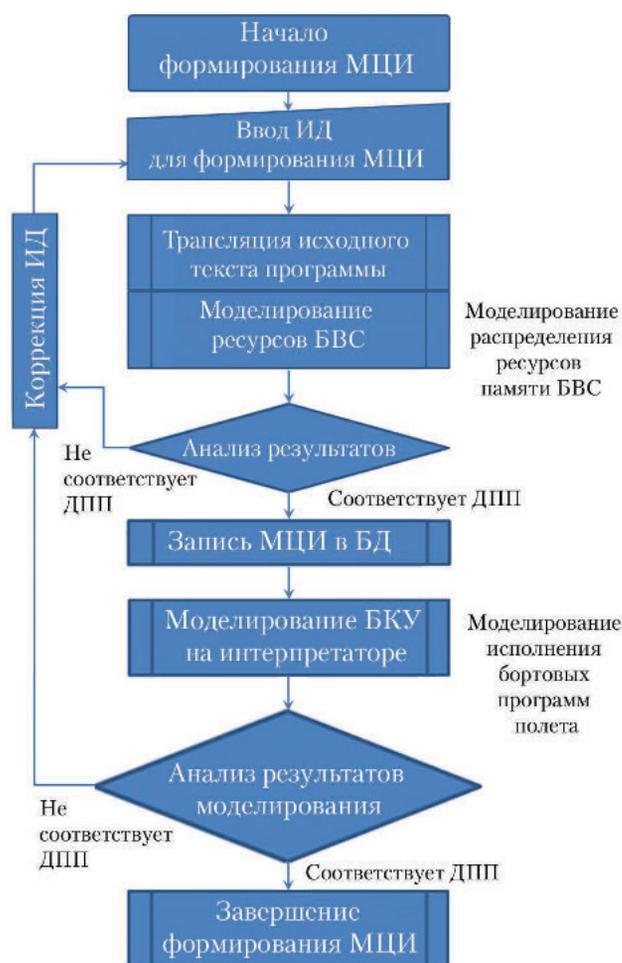


Рис. 11. Моделирование в процессе формирования командно-программной информации

Примечание. ИД – исходные данные; МЦИ – массив цифровой информации; БВС – бортовая вычислительная система; БД – база данных; БКУ – бортовой комплекс управления; ДПП – детальный план полета.

Для оценки результатов реализации технологии формирования МЦИ и обеспечения контроля соответствия МЦИ исходным данным введем показатель качества формирования МЦИ $K_{\text{мци}}$ в виде отношения количества ошибочно сформированных МЦИ (считая, что каждая ошибка соответствует одному ошибочному слову) к общему количеству слов МЦИ, введенных в БКУ по командной радиолинии:

$$K_{\text{мци}} = 1 - \frac{N_f}{N},$$

где N_f – количество слов МЦИ, содержащих ошибки; N – общий объем МЦИ, введенных в БКУ.

В табл. 3 приведено распределение ошибок формирования МЦИ при управлении полетом орбитальных станций («Мир» в 1989–1998 г. и РС МКС в 2000–2014 г.) и значения качества формирования МЦИ, рассчитанные по приведенной выше формуле.

Данные для указанной таблицы были предоставлены специалистами группы КПУ (объем МЦИ РС МКС) и группы подготовки персонала ГОГУ станции «Мир» и РС МКС (ошибки формирования МЦИ). Данные по объему МЦИ для орбитальной станции «Мир» взяты из работы [1]. Под ошибками формирования МЦИ здесь понимаются не общее количество ошибок персонала ГОГУ, а только количество МЦИ, не соответствующих ДПП и введенных в БКУ.

Таблица 3

Распределение ошибок формирования массива цифровой информации (МЦИ)

Год	МЦИ, тыс. слов	Количество ошибочных МЦИ	Качество МЦИ $K_{\text{мци}}$
1989	200	28	0,8600
1990	240	22	0,9083
1991	280	18	0,9357
1992	280	16	0,9429
1993	280	11	0,9607
1994	280	3	0,9893
1995	300	2	0,9933
1996	430	6	0,9860
1997	490	6	0,9878
1998	490	4	0,9918
2000	245	20	0,9184
2001	490	8	0,9837
2002	570	12	0,9789
2003	703	1	0,9986
2004	772	3	0,9961
2005	743	2	0,9973
2006	730	1	0,9986
2007	820	0	1,0000
2008	866	3	0,9965
2009	1 250	1	0,9992
2010	1 350	1	0,9993
2011	1 253	1	0,9992
2012	1 278	1	0,9992
2013	1 525	0	1,0000
2014	1 963	1	0,9995

По данным, представленным в табл. 3, построены диаграммы распределения ошибок формирования МЦИ для БКУ станции «Мир» и РС МКС (рис. 13) и качества формирования МЦИ (рис. 14).

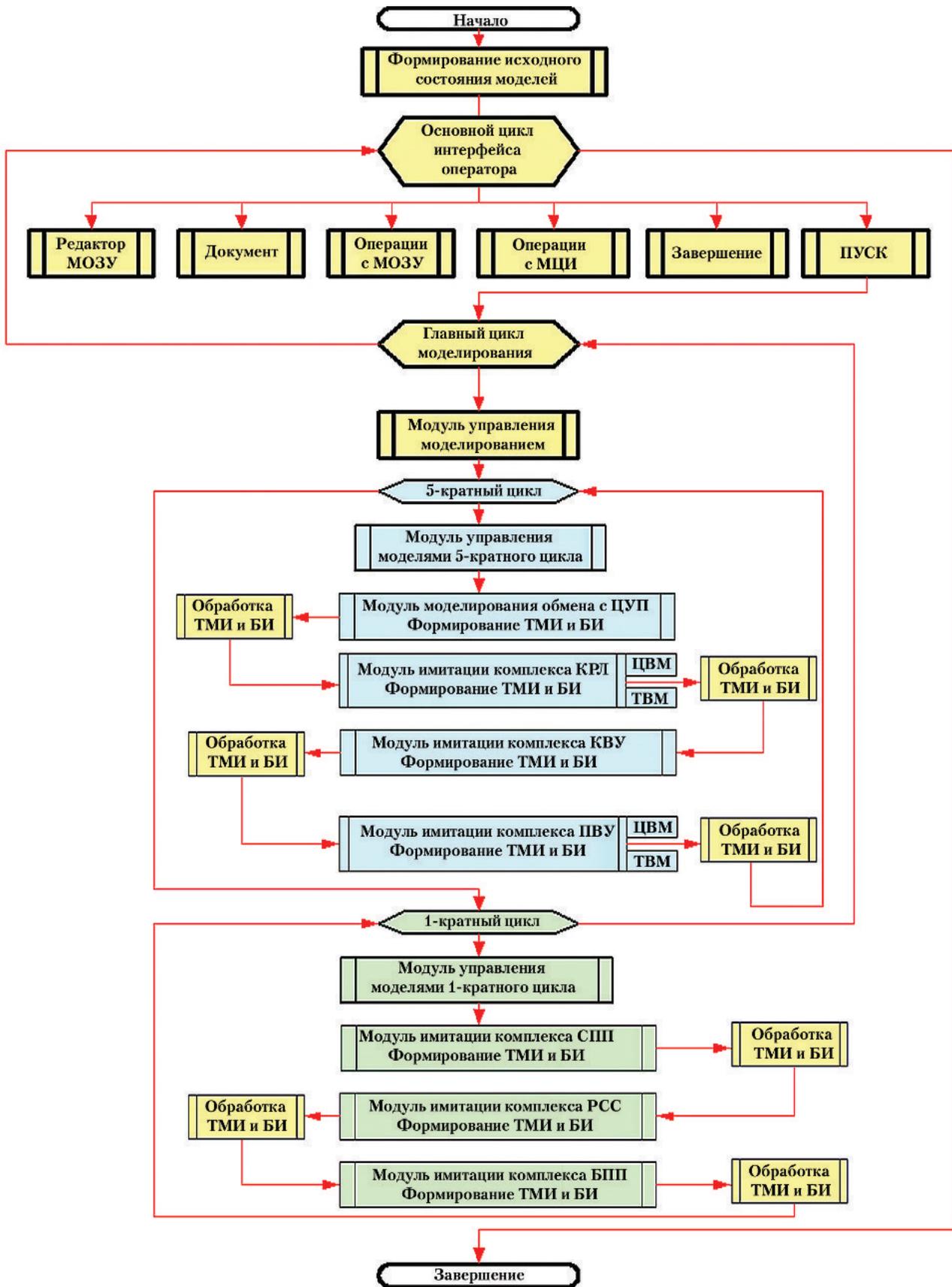


Рис. 12. Блок-схема моделирования исполнения командно-програмной информации в бортовой вычислительной системе служебного модуля МКС

Примечание. МОЗУ – модель оперативного запоминающего устройства; МЦИ – массив цифровой информации; ТМИ – телеметрическая информация; БИ – баллистическая информация; КРЛ – командная радиолиния; КВУ – команда верхнего уровня управления; ПВУ – программно-временное управление; СПП – суточная программа полета; РСС – расписание сеансов связи; ЦВМ, ТВМ – центральная и терминальная вычислительные машины.

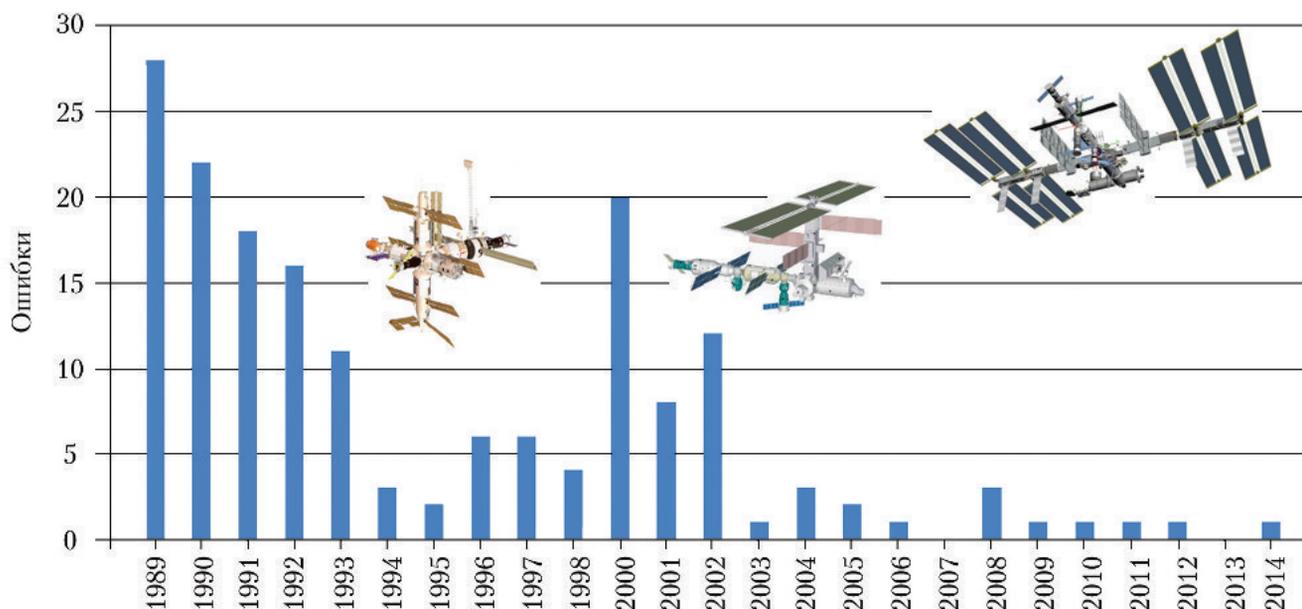


Рис. 13. Распределение ошибок формирования массива цифровой информации по годам полета станции «Мир» и Российского сегмента МКС

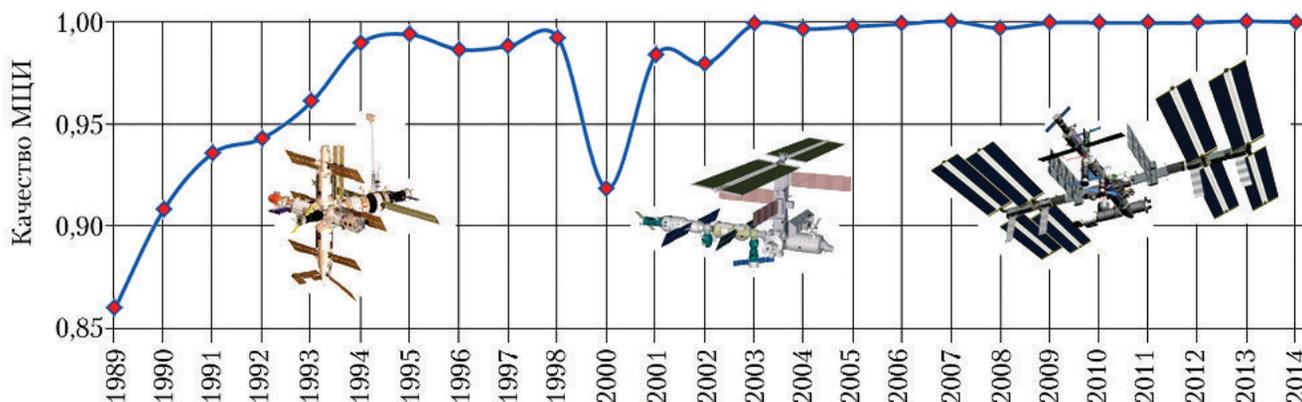


Рис. 14. Качество формирования массива цифровой информации (МЦИ) для бортового комплекса управления станции «Мир» и Российского сегмента МКС

Из приведенных графиков следует, что решения по технологическому обеспечению КПУ РС МКС в части формирования массивов цифровой управляющей информации обеспечили высокий уровень качества управления РС МКС. Это становится особенно важным в условиях постоянного роста количества полетных операций, реализуемых на борту РС МКС.

В заключение выскажем некоторые соображения по возможности применения методов формирования КПИ для РС МКС при решении задач управления полетом существующих и перспективных КА. Технология формирования КПИ для БКУ РС МКС обеспечивает независимость от типов командно-измерительных систем. Этот подход позволяет использовать единое ПО формирования КПИ как для ее передачи через средства НКУ, так и через любой спутниковый комплекс контроля и управления, включая систему на базе сети

командно-измерительных систем «Клен-Р» и единой командно-телеметрической системы в составе бортовой аппаратуры РС МКС. Этот тезис подтверждается опытом управления РС МКС через существующую спутниковую систему *TDRSS*, эксплуатируемую агентством *NASA*. Кроме того, ПО формирования МЦИ с высоким уровнем формализации описаний постоянных, переменных и оперативных исходных данных обеспечивает возможность быстрого создания ПО формирования МЦИ для управления любыми существующими и перспективными КА, требующими оперативной разработки и ввода в БКУ бортовых программ полета или полетных заданий.

Выводы

Широкое применение формализованных переменных исходных данных в виде таблиц описания переменных и именованных массивов

параметров в сочетании с созданием формальных языков описания БПП высокого уровня в процессе формирования КПИ в сочетании с оперативным имитационным моделированием работы БКУ обеспечило решение основных задач КПУ РС МКС с высоким качеством. Этот тезис подтверждается значительным снижением количества ошибок персонала управления с одновременным многократным увеличением общего объема КПИ по сравнению с аналогичными показателями для орбитальной станции «Мир». При этом численность персонала управления, задействованного в формировании КПИ, не увеличилась.

Разработка и дальнейшее совершенствование СМО КПУ РС МКС выполняется в рамках традиционной кооперации, сложившейся в период летно-конструкторских испытаний орбитальной станции «Мир». Так, СМО формирования и передачи КПИ в БКУ РС МКС было разработано специалистами ЦНИИ-маш (рис. 4–7, 9, 10 подготовлены с использованием СМО КИВК ЦУП ЦНИИмаш) с участием сотрудников РКК «Энергия». Последние выполнили разработку технических требований, методик решения задач КПУ, разработку синтаксиса и семантики формальных проблемно-ориентированных языков описания БПП. Отдельно стоит разработка программного обеспечения имитационного моделирования БКУ. Разработка ПО интерпретатора КПИ и методики его применения были выполнены

сотрудниками РКК «Энергия» с использованием результатов, полученных в ходе работы над кандидатской диссертацией одного из авторов.

Список литературы

1. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. В 2 т. / Под общ. ред. Л.Н. Лысенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. Т. 2. 426 с.
 2. Вишнеков В.Е., Кравец В.Г. Перспективы использования опыта разработки и эксплуатации системы связи со станцией «Мир» и кораблем «Буря» для Российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2013. № 3. С. 66–73.
 3. Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 336 с.
 4. Коваленко А.А., Станиславов И.В. О некоторых средствах обеспечения надежности командно-программного управления пилотируемым космическим аппаратом // К.Э. Циолковский и проблемы развития науки и техники: материалы XXXIX научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга: ИД «Эйдос», 2004. С. 80.
- Статья поступила в редакцию 18.02.2016 г.

Reference

1. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami*. In 2 vol. [Space Flight Control. In 2 vol.]. Ed. L.N. Lysenko. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman publ., 2009. Vol. 2, 426 p.
2. Vishnekov V.E., Kravets V.G. *Perspektivy ispol'zovaniya opyta razrabotki i ekspluatatsii sistemy svyazi so stantsiei «Mir» i korablem «Buran» dlya Rossiiskogo segmenta Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii* [Prospects for using the experience in development and operation of the system for communications with Mir Space Station and Buran orbiter on the Russian Segment of the International Space Station]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 66–73.
3. Mikrin E.A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami i proektirovanie ikh programmogo obespecheniya* [Onboard spacecraft control systems and design of their software]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman publ., 2003. 336 p.
4. Kovalenko A.A., Stanislavov I.V. *O nekotorykh sredstvakh obespecheniya nadezhnosti komandno-programmnogo upravleniya pilotiruемым kosmicheskim apparatom* [Some means to assure reliability of command-program control of manned spacecraft]. *K.E. Tsiolkovskii i problemy razvitiya nauki i tekhniki: materialy XXXIX nauchnykh chtenii pamyati K.E. Tsiolkovskogo*. Kaluga: Eidos publ., 2004. P. 80.