

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ ПОЛЁТОМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Лебедева Н.В.^{*}, Соловьев С.В.^{**}

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва,
ул. Ленина, 4, Королёв, Московской области, 141070, Россия*

^{}e-mail: trigonella@mail.ru*

*^{**}e-mail: sergey.soloviev@scsc.ru*

Рассматривается текущее состояние выполнения контроля космического аппарата (КА). Представлен актуальный алгоритм выявления аномалий в процессе оперативного управления КА. Выделены основные особенности контроля выполнения полётных операций. Предложен процесс автоматизации контроля и возможные виды отображения. Сравняется существующий метод анализа с интеллектуальным, выделяются достоинства и недостатки каждого.

Ключевые слова: управление полётом, космический аппарат, оперативный анализ, полётная операция, интеллектуальный анализ, формат отображения.

В условиях интенсивного развития космической техники, внедрения новых методик баллистического обеспечения быстрых схем сближения космических аппаратов на околоземной орбите, планируемых перелётов [1–3] на соседние планеты и др., требуется поддержание выполнения задач полёта КА на существующем уровне. Для этого необходимо провести анализ «узких мест» оперативного управления полётом, которые могли бы затруднить выполнение намеченных целей, а также усовершенствовать существующую методику оперативного управления полётом КА.

Приоритетной задачей оперативного управления полётом КА является обеспечение живучести и выполнения плана полёта. Для того чтобы в ходе полёта правильно принимать решения об изменении работы бортовых систем с помощью управляющих воздействий, необходимо всесторонне оценить состояние КА и прогнозировать дальнейшие изменения. В ходе полёта текущее состояние аппарата может изменяться под действием внешних факторов (агрессивная внешняя среда, физические воздействия и т.д.), что не исключает негативных последствий.

Основными задачами контроля состояния и функционирования КА являются:

- анализ штатного состояния функционирования систем;
- распознавание отклонения от штатного состояния;

— наблюдение тенденции к возникновению нештатной ситуации;

— распознавание нештатных ситуаций (НШС);

— формирование рекомендаций по предотвращению и парированию НШС;

— прогнозирование состояния КА на заданный период при штатной работе;

— анализ риска отказа взаимосвязанных систем при отклонении от штатной работы или тенденции к возникновению НШС;

— прогнозирование развития НШС на ближайшие витки;

— моделирование и оценка состояния КА в реальном времени [4].

В России и за рубежом для обеспечения решения данных задач применяется схожая и довольно типичная технология. Проанализированы принципы и методы анализа при управлении полётом в отечественной практике на примере пилотируемых (типа «Союз»), беспилотных (типа «Прогресс»), автоматических (типа «Ямал», «Казсат», «Экспресс-МД» и т.п) КА и российского сегмента международной космической станции (МКС). Зарубежный опыт был рассмотрен на основе доступных материалов в части американского сегмента МКС КА, созданных на базе космической платформы (КП) Spacebus 4000 фирмы Thales, КП Eurostar 3000 фирмы Astrium, КП DFH-4 китайского производства и некоторых КА, произведенных в США и Канаде. В результате можно с уверенностью констатировать,

что для всех перечисленных КА процесс контроля принципиальных отличий не имеет и решается за счет специализированного программного обеспечения, которое осуществляет подготовку информации для анализа. Автоматизация и тем более интеллектуализация имеют весьма ограниченное распространение, и основная масса задач анализа выполняется за счет привлечения высококвалифицированных специалистов.

Особенности управления КА

В общем случае процесс контроля можно описать следующим образом:

— информация о КА (телеметрическая — ТМИ, телевизионная — ТВ, баллистико-навигационная —

БНО и др.) поступает в главную оперативную группу управления;

— проверяется, находится ли ТМИ в допустимом диапазоне;

— проверяется, находится ли ТМИ в ожидаемом диапазоне, в соответствии с внешнетраекторными данными и элементом полётной операции;

— проверяется, находится ли ТМИ в диапазоне значений, получаемых решением функций взаимовлияния параметров систем (в соответствии с их назначением, расположением и др.).

На рис. 1 схематично представлен процесс контроля в общем виде, где S — состояние КА; P — параметр ТМИ; l — текущая операция; g — внешнетраекторная оценка текущего положения

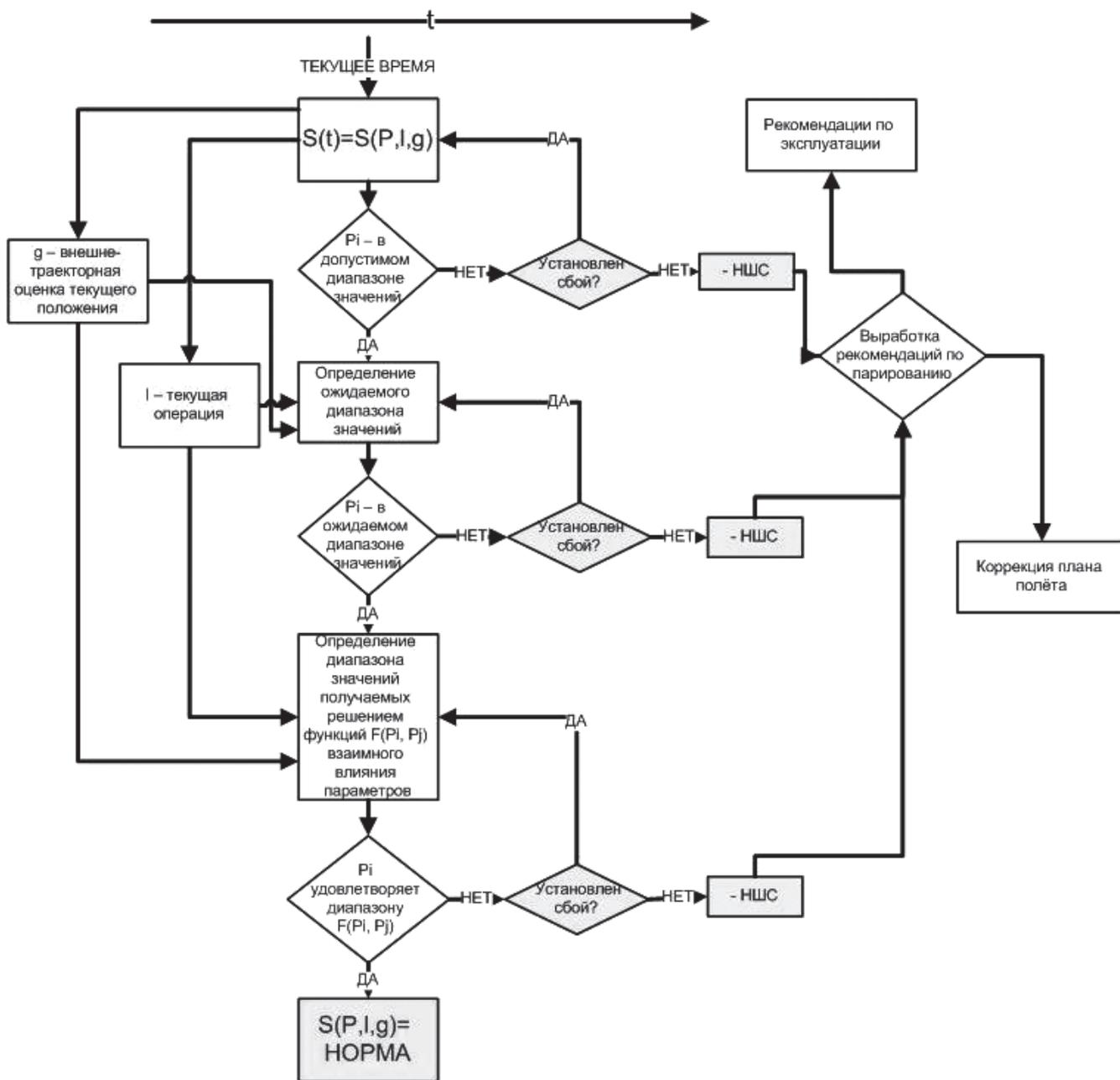


Рис. 1. Общий вид контроля КА

тируемого КА; F — функция взаимного влияния параметров, t — время.

Главным критерием технической оценки при таком контроле будет номинальное время t , затраченное на оценку, и его технологическая задержка Δt , связанная с временем поступления информации с борта КА, временем на её обработку и оценку. Это позволяет рассчитать оперативность управления при штатном процессе контроля:

$$k_{\text{опер}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_{fi} + t_{\min i}}{t_{\max i} - t_{\min i}}. \quad (1)$$

Здесь n — общее число элементов в операции; t_{fi} — фактическое время, затраченное на осуществление i -го элемента операции; $t_{\min i}$ — минимальная длительность i -го элемента операции,

$$t_{\min i} = t_{\min i}^{\text{ЭК}} + t_{\min i}^{\text{НКУ}} + t_{\min i}^{\text{БЦВК}}, \quad (2)$$

где каждый элемент $t_{\min i}$ формируется с учётом задержки Δt и является нормированной длительностью для выполнения данным звеном i -го элемента операции;

$t_{\max i}$ — максимальная длительность i -го элемента операции,

$$t_{\max i} = t_{\max i}^{\text{ЭК}} + t_{\max i}^{\text{НКУ}} + t_{\max i}^{\text{БЦВК}}, \quad (3)$$

где каждый элемент $t_{\max i}$ формируется с учётом задержки Δt и является нормированной длительностью для выполнения данным звеном i -го элемента операции.

При контроле выполнения различных операций учитываются: вид команд (команды, передаваемые по командным радиолиниям, команды, выдаваемые с пульта космонавтов, команды взаимного управления бортовых систем и др.), выдаваемых в бортовые системы для обеспечения выполнения операции; возможности их выдачи и способы технической оценки их исполнения. Для автоматизации технической оценки необходимо также учитывать запланированные возможности организованного (неслучайного) влияния на состояние КА. Проводится систематизация методов технической оценки исполнения команд и массивов управляющей цифровой информации.

Пусть КА находится в состоянии S_0 , для выполнения плана полёта это состояние требуется перевести в состояние S_{10} .

Рассмотрим алгоритм действия в виде графа (рис. 2).

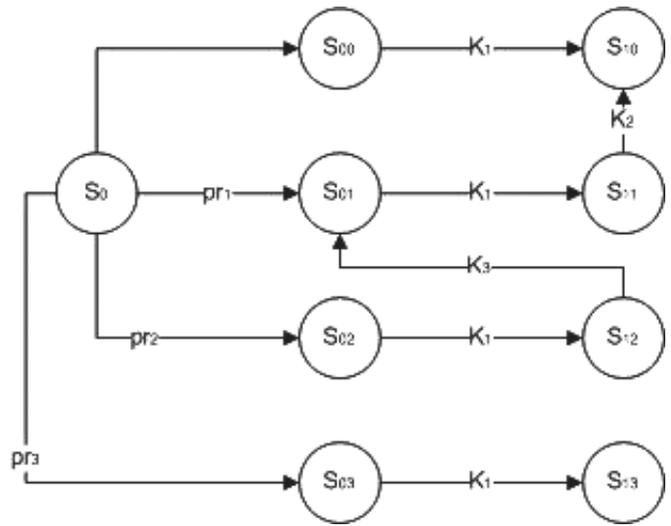


Рис. 2. Орграф условий выдачи команд

Пусть S_0 — это начальное состояние, соответствующее исходному. Для команды K_1 состояние КА при наличии внутреннего признака, чаще всего программного, изменяет состояние КА на состояния S_{00} , S_{01} , S_{02} и S_{03} . Для S_{00} — это будет отсутствие признака, для S_{01} — наличие признака pr_1 , для состояния S_{02} — признак pr_2 и для состояния S_{03} — признак pr_3 . Соответственно, состояние, которое будет получено при воздействии команды K_1 , S_{10} — требуемое, S_{11} , S_{12} и S_{13} . При этом из состояния S_{11} в требуемое состояние S_{10} возможен переход при выдаче команды K_2 . Для состояния S_{12} возможен переход в состояние S_{01} при выдаче команды K_3 . Далее возможен уже описанный алгоритм перехода, т.е. переход из состояния S_0 в состояние S_{10} возможен со значительной потерей оперативности. Для состояния S_{13} невозможно выполнение перехода состояния S_0 в состояние S_{10} .

Поскольку обработка каждой дополнительной команды увеличивает время на переход из состояния S_0 в состояние S_{10} , соответственно уменьшая критерий оперативности $k_{\text{опер}}$, задача о кратчайшем пути будет решаться согласно [5–8]. То есть, когда потенциалы вершин устанавливаются, кратчайший путь определяется методом обратного хода от выхода к входу. В общем виде кратчайший путь описывается формулой

$$\mu = (0; i_1; i_2; \dots; i_{n-1}; n), \quad (4)$$

такой что

$$\lambda_{i_{n-1}n} = \lambda_n - \lambda_{n-1}. \quad (5)$$

где λ_n — индекс выхода.

Первоначально заменяем названия вершин порядковыми номерами, обозначаем l_{ij} длину дуги

(*i; j*). Это применимо для пути, имеющего правильную, т.е. последовательную нумерацию.

Контроль состояния КА проводится оперативной группой управления (ОГУ) на протяжении всего полета после контакта отделения космического аппарата от ракетоносителя. Контроль, как элемент управления КА, является начальным этапом для выработки рекомендаций по дальнейшей работе и заключительной проверкой перед выдачей команд на борт КА. Для контроля состояния КА необходимо учитывать внешнетраекторную оценку его текущего положения. Для части параметров систем КА внешнетраекторная оценка определяет ожидаемый диапазон значений и оказывает влияние на решение функции взаимного влияния параметров. Например, для оценивания температур солнечных батарей необходимо учитывать время до захода пилотируемого КА в тень либо время выхода из тени.

Автоматизация анализа для контроля полётных операций

Для современных КА основным элементом планирования полета, как правило, является полетная операция. Это вполне естественно, так как с увеличением возможностей бортового комплекса автоматического управления (БКАУ) КА целесообразно управление строить из целых программных бло-

ков, каждый из которых является законченным действием с КА или полетной операцией [9—12].

С точки зрения анализа, полетная операция, а точнее — ее выполнение переводит КА в новое состояние. Оценка процесса выполнения полетной операции и нового состояния КА и является целью контроля полетной операции.

Оценка выполнения полетных операций частично осуществляется средствами БКАУ, который, анализируя состояние КА собственными алгоритмами, формирует специальные признаки, передаваемые на наземные средства управления. Такая методика была внедрена в системы управления КА еще в 60-е годы. С развитием вычислительных возможностей БКАУ КА подобные признаки применяются все чаще, однако контролю при этом подвергается ограниченное количество ТМИ и в основном эта методика используется для контроля операции ориентации КА в пространстве. При положительном завершении основных режимов ориентации БКАУ КА формирует соответствующие признаки, например, «ГСО», «ГСО-1», «ГСО-2» и т.п., которые широко применяются на КА типа «Союз», «Прогресс», «Ямал» и других. На рис. 3 представлен формат отображения, на котором содержится информация, формируемая БКАУ КА на основе собственных алгоритмов анализа состояния ориен-

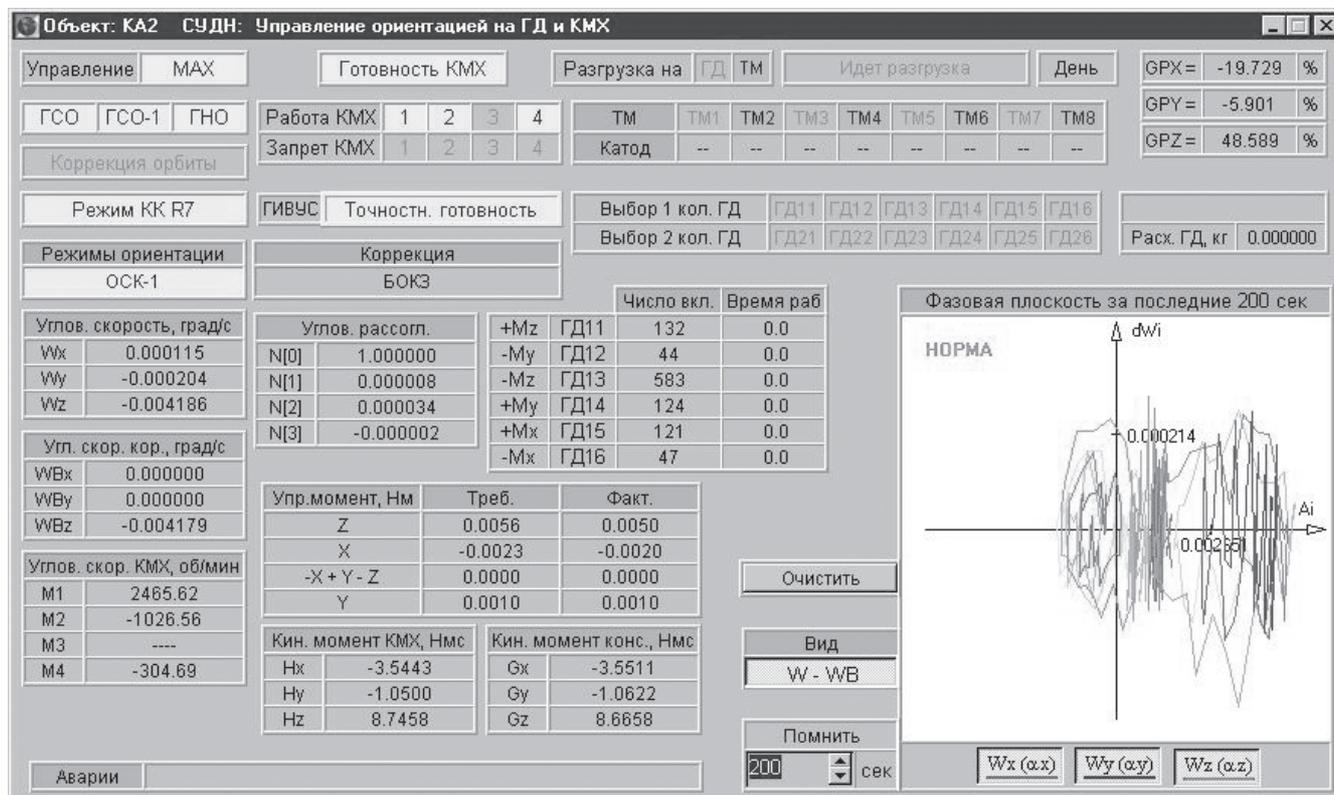


Рис. 3. Формат отображения с признаками, формируемыми БКАУ КА

тации КА и режима работы системы управления движением и навигацией.

Практика управления перечисленными КА показала высокую эффективность и удобство использования данных признаков. Также можно утверждать, что формирование этих признаков является критерием выполнения целого ряда полетных операций. Однако для большинства других полетных операций подобные признаки, формируемые средствами БКАУ КА, не применяются. Этому обстоятельству есть несколько объяснений:

- большинство полетных операций зачастую содержат несколько различных режимов работы бортовых систем КА и различную настроечную информацию (уставки);

- полетные операции могут формироваться во время полета КА и содержать различную комбинацию режимов работы бортовых систем;

- возможно изменение и дополнение полетных операций на различных этапах полета КА.

В результате учет всех перечисленных комбинаций и реализация их контроля на борту КА представляют собой чрезвычайно сложную задачу и в ряде случаев — нецелесообразную, например для пилотируемых КА. В основном это обусловлено ограниченностью ресурсов бортовых вычислительных средств, которые призваны решать сложные и ответственные вопросы управления КА. Присутствие же человека на борту КА определяет необходимость выполнения в первую очередь требований по обеспечению безопасности полета.

Наземные средства управления позволяют автоматизировать процесс контроля полетных операций. Это достигается за счет создания и размещения на вычислительных средствах центра управления полётами (ЦУПа) специализированного программного обеспечения. В отличие от бортовых вычислительных средств КА, в ОГУ имеются несоизмеримо более мощные вычислительные и программные ресурсы. Поэтому ограничений от вычислительных средств ОГУ на сложность программного обеспечения и алгоритмов анализа практически не существует. Конечно, подобные автоматизированные средства контроля полетных операций должны работать в режиме реального (псевдореального) времени, т. е. в темпе поступления ТМИ с борта КА.

В качестве основы построения алгоритма действий автоматизированных систем для контроля полетных операций можно рассматривать следующий принцип:

- определяется состояние КА до начала полетной операции по результатам анализа готовности систем КА и контроля параметров его орбитального

движения и ориентации; при этом формируется соответствующий признак готовности, по которому дается разрешение на запуск циклограммы операции или выдаются необходимые команды на борт КА;

- в процессе выполнения полетной операции автоматизированная система производит сравнение поступающей ТМИ с борта КА с эталонной (с заданными погрешностями), которая получена либо с проводимых ранее аналогичных операций, либо с модельными значениями. По результатам сравнения возможно формирование признаков «норма» или «ненорма»;

- завершение выполнения полетной операции определяется по достижении заданных значений ТМИ, по сообщениям БКАУ КА и приведению в исходное положение составных частей КА.

Особое место в данном алгоритме должно уделяться контролю времени исполнения полетной операции, которая в сложных случаях должна моделироваться при разработке её циклограммы.

Возможная форма отображения результатов контроля выполнения полетной операции с помощью такой автоматизированной системы приведена на рис. 4.

Главное в разработке подобных алгоритмов — это возможность достоверного и оперативного воспроизведения контролируемой полетной операции на моделирующих или стендовых средствах. Тем не менее, сравнение текущего состояния и эталонных значений ТМИ должно производиться по максимально возможному числу ТМИ КА (в пределах по всему объему ТМИ), что при наличии мощных вычислительных средств в ОГУ не вызывает существенных технических трудностей.

Альтернативным более простым алгоритмом может служить автоматизированный контроль сообщений БКАУ КА с учетом времени их формирования (рис. 5). Дополнительно может проводиться анализ длительности периодов времени между сообщениями на их соотношение с модельными значениями или аналогичными значениями продолжительности из предыдущих аналогичных полетных операций. Времена выполнения отдельных этапов полетной операции с учетом их допустимых разбросов принимаются эталонными после ее проведения с положительными результатами.

Исходя из опыта анализа функционирования КА, необходимо сразу отметить важность фактора длительности при выполнении полетных операций или режимов работы составных частей КА. Если при контроле выполнения полетной операции произошли отклонения от временной циклограммы, что легко определяется по сообщениям от БКАУ КА

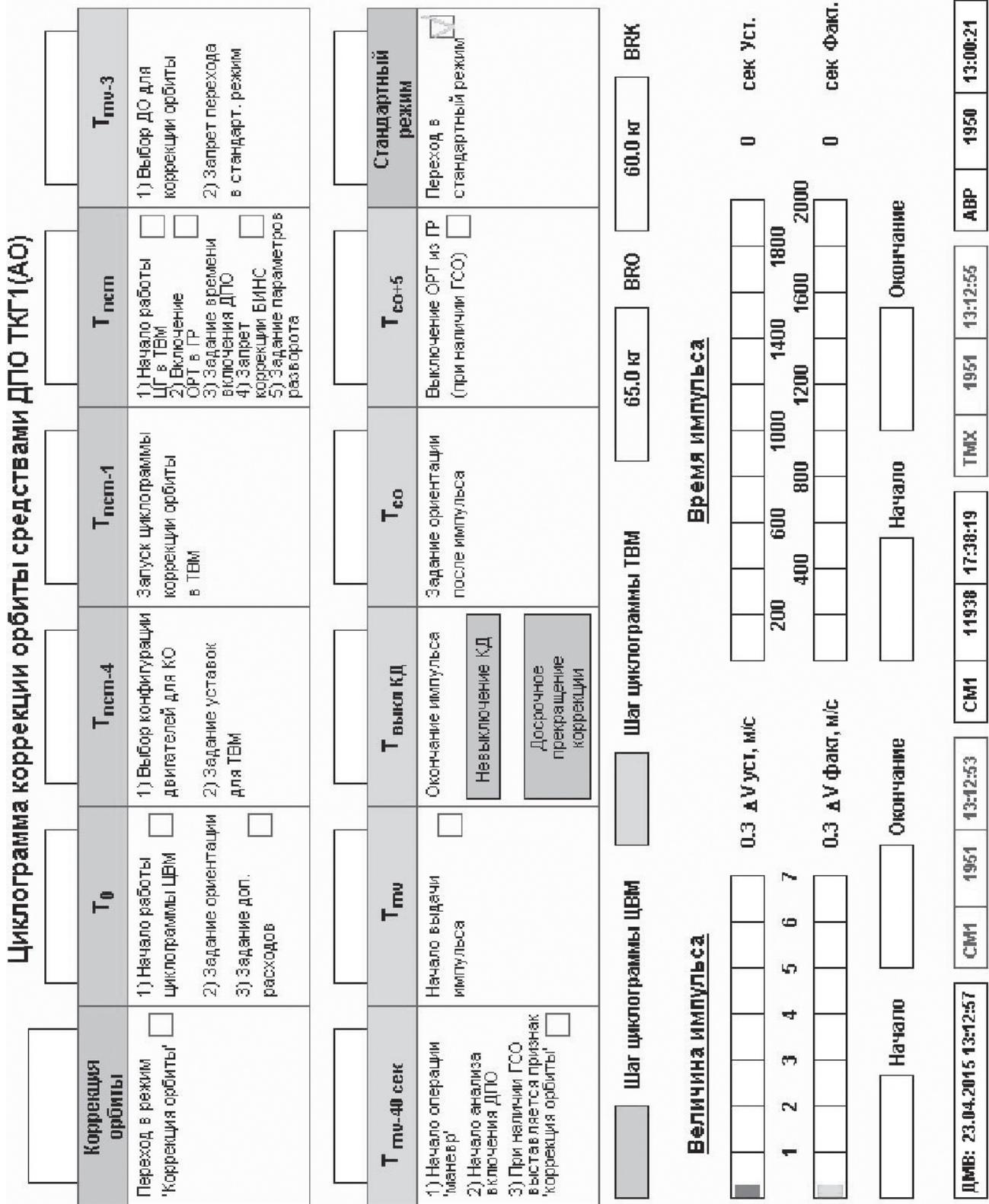


Рис. 4. Вариант формата отображения автоматизированной системы контроля полетных операций

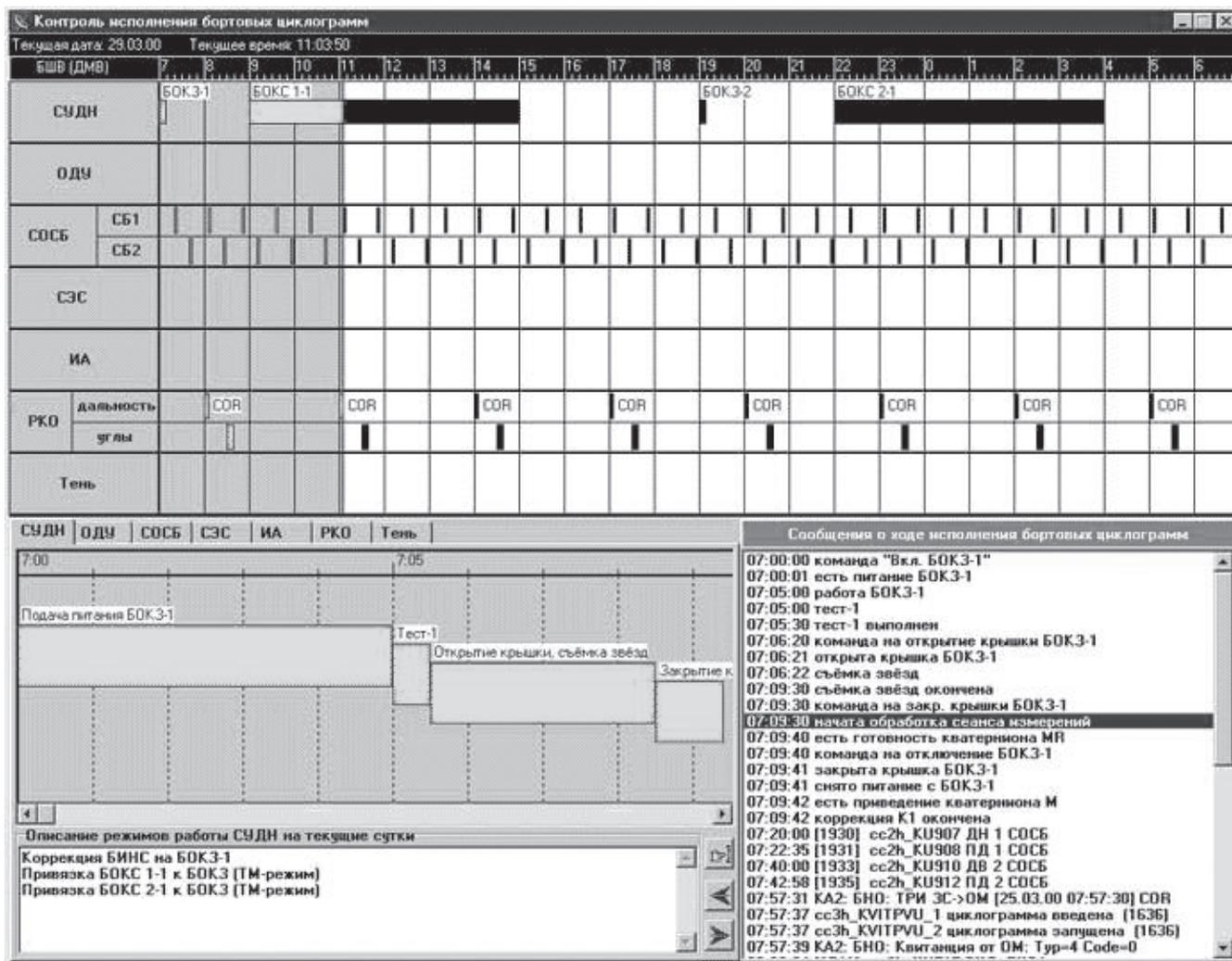


Рис. 5. Вариант формата отображения для контроля сообщений от БКАУ

(квитанциям исполнения команд), то можно утверждать, что это вызвано какой-то аномалией при выполнении полетной операции или нештатным выполнением режима. Поэтому при автоматизации контроля полетных операций в алгоритмах контроля длительность является первостепенным критерием контроля.

В целом можно отметить, что автоматизация процесса контроля полетных операций в наибольшей степени позволит снизить трудозатраты операторов при управлении полетом КА. Наибольший эффект может быть достигнут для периодически повторяющихся операций и регулярных режимов работы бортовой аппаратуры КА, что будет способствовать оптимизации численности оперативных смен. Надежность контроля и скорость реакции при возникновении аномалий в процессе проведения полетной операции в случае применения автоматизированных систем контроля должна возрасти, так как в значительной мере исключается влия-

ние человеческого фактора, уровня квалификации и навыка оперативной работы оператора.

Автоматизированное прогнозирование состояния КА

Под методом прогнозирования технического состояния КА будем понимать совокупность алгоритмов и математических действий, позволяющих на основе ретроспективных данных, известных внешних и внутренних связей КА и его составных частей, а также измерений параметров состояния и режимов работы составных частей КА, приборов и агрегатов в рамках рассматриваемых видов состояний вывести суждения определенной достоверности относительно будущего технического состояния КА.

К задачам прогнозирования [13–16] относятся, например, задачи, связанные с определением срока дальнейшего функционирования КА и его отдельных систем, запасов тех или иных ресурсов КА и с определением деградации характеристик составных частей КА. Эти задачи решаются путем опре-

деления возможных или вероятных эволюций состояния КА, с начальной точкой отсчета в текущий момент времени.

Непосредственное перенесение методов решения задач диагностирования [17] на задачи прогнозирования невозможно из-за различия моделей, с которыми приходится работать. При диагностировании моделью обычно является описание объекта, в то время как при прогнозировании необходима модель процесса эволюции технических характеристик объекта во времени.

В результате диагностирования каждый раз определяется не более чем одна «точка» состояния КА для текущего момента (интервала) времени. Тем не менее хорошо организованное диагностическое обеспечение объекта с хранением всех предшествующих результатов диагностирования может дать полезную и объективную информацию, представляющую собой предысторию (динамику) развития процесса изменения технических характеристик объекта, что может быть использовано для систематической коррекции прогноза и повышения его достоверности.

Практика работы группы контроля ОГУ показывает, что после возникновения каких-либо аномалий, появления нештатной ситуации и, как следствие, изменения программы полета КА одним из первых задаваемых вопросов был следующий: «а на какое время нам хватит оставшихся ресурсов». Ответить на этот, казалось бы простой, вопрос зачастую или сложно, или существуют различные «если», которые и приводят к значительному разбросу величины прогнозируемого времени функционирования или оставшихся ресурсов составных частей КА.

Следует сразу оговориться, что задачу прогнозирования возможно решать в основном в рамках послесекансного анализа. В процессе оперативного управления специалист ОГУ работает с текущей телеметрией и имеет инструменты для непосредственного отслеживания только расходования ресурсов КА. Достоверное определение [18, 19] абсолютного текущего значения ресурсов и прогнозирование их расхода в дальнейшем является самостоятельной задачей и требует дополнительных специальных алгоритмов обработки. Применение подобных алгоритмов в оперативном контуре управления затруднительно и не имеет особого смысла, поскольку решения по результатам подобного анализа, как правило, не бывают срочными.

Послесекансный анализ ТМИ является самостоятельным процессом, перспективы совершенствования которого весьма обширны. Основным направлением его развития представляется обеспече-

ние возможности прогнозирования функционирования КА. При длительных сроках активного существования КА это весьма востребованная задача в случае возникновения различных аномалий или изменений программы полета.

Основной метод, позволяющий сформировать количественный прогноз, состоит в длительном отслеживании изменения отдельно выбранного или группы подобных параметров. При этом период наблюдения должен иметь максимально возможную длительность, а именно — от начала полета КА. В ходе анализа целесообразно использовать и значения данного параметра при наземных испытаниях КА или при испытаниях в процессе его производства. Основным ограничением продолжительности анализа является время, в течение которого параметр не приблизится к значению, после которого еще остается необходимый запас времени для принятия и реализации решения по выходу из складывающейся нештатной ситуации. При подобном подходе четкая методика решения задачи прогнозирования состояния может быть определена только для каждого конкретного КА. При этом в процессе анализа всегда необходимо учитывать:

- предшествующую программу выполнения КА его полетных операций;
- текущую ориентацию КА;
- текущую баллистическую информацию;
- планируемые операции КА, его ориентацию и баллистические данные на последующих интервалах полета.

Традиционный анализ состояния КА построен на использовании алгоритмов, которые создаются квалифицированными специалистами или экспертами в своей области, отвечающими за создание КА или соответствующей составной части КА. В результате создается набор правил, ограничений и граничных условий, который ложится в основу математической модели КА или его составных частей. Возможна ситуация, когда этот набор изменяется в процессе эксплуатации данного КА, как правило, в сторону увеличения. Следствием является уточнение и усложнение модели. Анализ состояния КА (как объекта моделирования) возможен только после создания его корректной и достаточно полной модели, которая в обязательном порядке должна быть верифицирована.

Принципиальным отличием интеллектуального анализа данных от традиционных алгоритмов анализа является методология создания моделей. Системы интеллектуального анализа строят модели объекта автоматически на базе информации о нормальном поведении анализируемого объекта. Для своего рода калибровки или настройки систе-

мы необходимо задать определенное количество точек нормальных данных или состояний.

К основным особенностям интеллектуальных систем анализа по сравнению с традиционными алгоритмическими моделями можно отнести следующие:

- отсутствие предварительно заданных знаний (значений) о работе системы;
- определение соотношений между параметрами без привлечения сложных и малопродуктивных методов системного или традиционного анализа;
- высокая скорость реакции на появление аномалии, фактически в темпе поступления ТМИ;
- модель поведения КА имеет небольшие объемы и позволяет вести работу в режиме реального времени;
- устанавливается и отслеживается взаимосвязь между большим количеством ТМИ;
- обнаруживаются как единичные, так и комплексные отклонения ТМИ от среднестатистических или номинальных значений;
- автоматически обрабатывается и привлекается необходимая информация;
- учитываются поступающие данные о нормальном поведении системы и автоматически обновляется ранее построенная модель её поведения.

Наиболее проработаны следующие основные методы, применение которых может дать нужный эффект при проведении контроля полета с помощью интеллектуальных методов анализа:

- *Ассоциация* (или отношение) как наиболее известный и простой метод интеллектуального анализа данных. Для выявления моделей контролируемого состояния делается сопоставление двух или более элементов, часто одного и того же типа, например при отслеживании изменения тока потребления в зависимости от режима работы прибора или алгоритма его функционирования. В результате этой процедуры достаточно простой алгоритм выдает значения и направление изменения этого значения для создания ассоциаций, исследуя источник входной информации и формируя базис принятия решений и выходную информацию.

- *Классификация* или, в зарубежной терминологии, *кластеризация*, которая может быть использована для получения представления о типе отклонений в функционировании КА, описывает несколько атрибутов для идентификации определенного класса отклонений. Например, приборы легко классифицировать по типу (вычислительный, коммутирующий, оптико-электронный, аналоговый цифровой и т.п.), определив различные атрибуты (количество команд, параметров, потребление, частота). Конт-

ролируя поведение нового прибора или его работу в новых режимах, отслеживая новый или измененный режим работы КА, можно автоматизировать процесс сопоставления с уже отработанными приборами, режимами или полетными операциями. Те же принципы можно применить и к аппаратным средствам наземного комплекса управления. Учитывая практику создания подобных средств на базе типовых решений и их применение для управления разнородными и разнотипными КА, следует ожидать получения весьма значительного эффекта в управлении космическими полетами.

- *Прогнозирование* — широкое направление, которое простирается от предсказания деградации и отказов компонентов оборудования до выявления возможных изменений в программе полета. В сочетании с другими методами интеллектуального анализа данных прогнозирование требует анализа тенденций, классификации, сопоставления с моделью и использования ассоциаций. При этом оно во многом опирается на анализ прошлых событий или данных по предшествующим экземплярам КА.

- *Последовательные модели*, которые часто используются для анализа долгосрочных данных, — полезный метод выявления тенденций или регулярных повторений подобных событий. Например, по данным о колебаниях значений параметров определяется тренд изменения, и, используя планируемую программу полета, со значительной точностью можно определить диапазон изменения или деградацию конкретного параметра. По этой информации при прогнозировании изменения контролируемого параметра, основываясь на частоте и истории колебаний его значения, можно автоматически оценить длительность нахождения этих значений в допустимых пределах.

- *Дерево решений*, связанное с большинством других методов (главным образом, с классификацией и прогнозированием), можно использовать либо в рамках критериев отбора, либо для поддержки выбора определенных данных в рамках общей структуры. Дерево решений начинают с простого вопроса, который имеет два ответа (иногда больше). Каждый ответ приводит к следующему вопросу, помогая классифицировать и идентифицировать данные или делать прогнозы.

Деревья решений часто используются совместно с системами классификации информации о свойствах и с системами прогнозирования, где различные прогнозы могут основываться на прошлом историческом опыте, который помогает построить структуру дерева решений и получить требуемый результат.

Уровень автоматизации перечисленных способов решающим образом влияет на конечный результат и эффективность их применения. И хотя задачи прогнозирования, решаемые с применением подобных методов, требуют весьма длительных периодов анализа для единичных КА, для однотипных КА с близкими программами полета анализ их телеметрических данных этими методами в целях прогнозирования вполне осуществим.

Следует отметить, что существующие мощные вычислительные технологии [20] позволяют применять в технике широкий спектр статистических методов анализа. Рассмотрение тенденций по увеличению сроков эксплуатации КА или количества однотипных КА, по крайней мере в части конструкции и функционирования бортовых систем, позволяет считать, что статистические методы будут использоваться при контроле полета в послесезонном анализе и, тем более, при анализе аномалий, отклонений и отказов в приборах и системах КА. Применительно к случайным событиям на борту КА (например, воздействие тяжелозаряженных частиц на электрорадиоделия), не приводящим к катастрофическим отказам в элементах, данный вид анализа является единственно возможным способом установления причины сбоя.

Выводы

Для использования в перспективе можно выделить следующие основные направления применения интеллектуальных методов анализа или технологий для задач управления полетом КА:

— обработка архивов ТМИ КА в процедурах послесезонного анализа с целью определения тенденций и построения прогнозов для последующих этапов полета КА;

— обработка ТМИ в реальном времени в процедурах оперативного управления полетом с целью выявления аномалий в работе КА на ранних стадиях их возникновения.

Первое направление позволит автоматически, без участия специалистов-разработчиков составных частей КА построить математическую модель нормального поведения КА, которую в дальнейшем можно будет использовать как эталонную. Применяя эталонную модель КА и анализируя фактическую ТМИ, можно выявить скрытые закономерности данных, которые позволят задним числом проанализировать неисправность и определить симптомы и причины ее возникновения. Также могут быть определены предшествующие действия операторов по управлению КА, которые, возможно, породили данное отклонение, и соответственно раз-

работать иные действия с КА для исключения подобных ситуаций в дальнейшем.

Работа интеллектуальной системы в режиме реального времени позволит увеличить скорость реакции на появление аномалий и на их развитие во времени, с четкой фиксацией направления развития отклонения в данных. Существенным достоинством подобных систем может быть невосприимчивость к случайным сбоям, пропадающим ТМИ или зависаниям при первичной обработке ТМИ, а также определение неочевидных изменений, которые могут быть предтечей отказов.

В отечественной практике и доступных материалах по зарубежным КА отсутствуют примеры успешной реализации интеллектуальных систем для задач оперативного управления полетом. А наибольший прогресс во внедрении подобных систем отмечен в авиационной технике.

На начальных этапах внедрения интеллектуальных систем в практику применения при управлении полетом КА имеет смысл их использовать в качестве вспомогательных. Результаты их работы при этом должны учитываться в процессе принятия решений. По мере накопления данных, актуализации модели и верификации результатов работы автоматизированной системы возможно ее использование при автоматизации принятия решений для ряда ситуаций, где важна оперативность действий.

Анализ развития подобных систем и все возрастающие объемы ТМИ позволяют считать, что технологии интеллектуального анализа должны применяться для обеспечения высокой эффективности управления полетом КА и количество задач их использования будет увеличиваться.

Библиографический список

1. *Кравец В.Г., Любинский В.Е.* Основы управления космическими полётами. — М.: Машиностроение, 1983. — 256 с.
2. *Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е.* Управление космическими полётами (в 2-х ч.): Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. Часть 1 — 476 с. Часть 2 — 426 с.
3. *Ушаков А.П., Брега А.Н., Коваленко А.А., Чернобровкин С.Г.* Управление полетом орбитальной станции «Мир». Концепция автоматизированного планирования и управления. — Калининград: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 1995. — 243 с.
4. *Леонов А.Г., Довгодуш С.И., Петровский В.С.* О системном подходе к организации создания и использования космической техники в проектах международного сотрудничества // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 208-216.

5. Берж К. Теория графов и ее применения. — М.: Иностранная литература, 1962. — 320 с.
6. Muggleton S., De Raedt L. Inductive Logic Programming: Theory and methods // The Journal of Logic Programming. 1994. Vol. 19-20, pp. 629-679. DOI: 10.1016/0743-1066(94)90035-3
7. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining: Учебное пособие. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 336 с.
8. Деревянко В.В. Применение Data Mining в космических приложениях // Исследования наукограда. 2012. № 1. С. 47-51.
9. Соловьев С.В., Мишурова Н.В. Анализ текущего состояния процесса контроля при управлении полётом космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 3(51). URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1474.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2016-3-1474
10. Наземный комплекс управления дальними космическими аппаратами. Перспективы развития / Под ред. Ю.М. Урличич. — М.: Радиотехника, 2012. — 214 с.
11. Лукин Ф.А., Шахматов А.В., Мушовец К.В., Зеленков П.В. Механизм управляемой телеметрии космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2012. № 5(45). С. 140-143.
12. Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В., Обрученков В.П., Древин А.В. Современная телеметрия в теории и на практике: Учебный курс. — СПб.: Наука и техника, 2007. — 672 с.
13. Милицин А.В., Самсонов В.К., Ходак В.А., Литвак И.И. Отображение информации в центре управления космическими полетами. — М.: Радио и связь, 1982. — 194 с.
14. Соловьев С.В. Интеллектуальный метод анализа для автоматизированного прогнозирования состояния КА // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 2(50). URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1469.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1469
15. Олейников И.И., Павлов В.П., Ковалева М.В. Методы выявления и оценки параметров опасных ситуаций при обеспечении безопасности полета космических аппаратов в околоземном космическом пространстве // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 32-37.
16. Князев А.В. Теоретико-графовое моделирование информационных процессов в АСУ испытаниями // Вестник Московского авиационного института. 2002. Т. 9. № 2. С. 38-43.
17. Писаренко В.Н. Управление контролепригодностью при эксплуатации объекта // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 1. С. 67-75.
18. Миронова К.В. Методы математического моделирования управления малыми космическими аппаратами на основе траекторной информации: дисс. ... канд. техн. наук. — Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2015. — 184 с.
19. Абрамов Н.С., Ардентов А.А., Емельянова Ю.Г., Талаев А.А., Фраленко В.П., Шишкин О.Г. Архитектура системы мониторинга и прогнозирования состояния космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. Т. 6. № 2(25). С. 85-99.
20. Ступак Г.Г., Любинский В.Е., Корянов В.В. и др. Автоматизированная система управления полётом перспективных космических аппаратов и комплексов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Ч. 3. — 439 с.

INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATION WHILE SPACECRAFT FLIGHT OPERATIONAL CONTROL

Lebedeva N.V.* , Solov'ev S.V.**

*Rocket and Space Corporation "Energia" named after S.P. Korolev,
4, Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia*

** e-mail: trigonella@mail.ru*

*** e-mail: sergey.soloviev@scsc.ru*

Abstract

To perform automation of a spacecraft state control, it is necessary to define the scope of tasks, which are most dangerous from the viewpoint of their accuracy of estimate. Intelligent systems application while operational flight control does not assume the complete waiving from human in the control loop. It should complement his activities by in-depth and rapid evaluation of a vast amount of information, and help to

elaborate the correct reaction to the current state of a spacecraft.

While operational efficiency computation, the nominal time t and its technological delay Δt , spent for evaluation, is assumed as the main control criterion. This technological delay is associated with the time of data receiving from the spacecraft. The spacecraft normal operation evaluation is important as the main reference point for monitoring of its state changing.

While various operations execution the type of commands issued to the onboard systems to ensure the operation execution, capability of their issuing, as well as the ways of technical evaluation of the state of their execution are accounted for. For control automation, it is necessary also to account for the pre-planned possibilities of organized (nonrandom) effecting affecting its state. From the analysis viewpoint, the flight operation execution switches the spacecraft to a new state. Evaluation of the flight operation and the new state of the spacecraft is the purpose of the flight operation controlling.

The monitoring process includes also performing diagnostics of the spacecraft state. More than one "point" of its state herewith is determined for the current time (interval). Intelligent system application allows employ all previous diagnostic results and represents the dynamics of the development of the process of changing the technical characteristics of the spacecraft in the past, which can be used to the forecast systematic correcting and increasing its validity.

Operation of the intelligent system in real time mode will allow increase the response rate to anomalies occurrence and their development in time with accurate fixation of the drift of data deviation development. An essential advantage of such systems can be the immunity to accidental failures, such as information loss, as well as the determination of non-obvious changes, which might become a forerunner of failures.

Keywords: flight control, spacecraft, on-line analysis, flight operation, mining, display format.

References

1. Kravets V.G., Lyubinskii V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi poletami* (Basics of Space Flight Control), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 256 p.
2. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* (Space flights control), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2009. Part 1 - 476 p. Part 2 - 426 p.
3. Ushakov A.P., Brega A.N., Kovalenko A.A., Chernobrovkin S.G. *Upravlenie poletom orbital'noi stantsii "Mir". Kontsepsiya avtomatizirovannogo planirovaniya i upravleniya*. (Orbital station "Mir" Flight control. Automated planning and control concept), Kaliningrad, RKK "Energiya" im. S.P. Koroleva, 1995, 243 p.
4. Leonov A.G., Dovgodush S.I., Petrovskii V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 208-216.
5. Berge C. *The theory of graphs and its applications*. 1962. New York, John Wiley & Sons, 247 p.
6. Muggleton S., De Raedt L. Inductive Logic Programming: Theory and methods. *The Journal of Logic Programming*, 1994, vol. 19-20, pp. 629-679. DOI: 10.1016/0743-1066(94)90035-3
7. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Stepanenko V.V., Kholod I.I. *Metody i modeli analiza dannykh: OLAP i Data Mining* (Methods and models of data analysis: OLAP and Data Mining: tutorial), St. Petersburg, BKhV-Peterburg, 2004, 336 p.
8. Derevyanko V.V. *Issledovaniya naukograda*, 2012, no. 1, pp. 47-51.
9. Solov'ev S.V., Mishurova N.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 3(51), available at: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1474.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2016-3-1474
10. Urlichich Yu.M. *Nazemnyi kompleks upravleniya dal'nimi kosmicheskimi apparatami. Perspektivy razvitiya* (Ground control complex for long-range spacecraft. Development prospects), Moscow, Radiotekhnika, 2012, 214 p.
11. Lukin F.A., Shakhmatov A.V., Mushovets K.V., Zelenkov P.V. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 5(45), pp. 140-143.
12. Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V., Obruchenov V.P., Drevin A.V. *Sovremennaya telemekhika v teorii i na praktike* (Modern telemetry in theory and in practice), St. Petersburg, Nauka i tekhnika, 2007, 672 p.
13. Militsin A.V., Samsonov V.K., Khodak V.A., Litvak I.I. *Otobrazhenie informatsii v tsentre upravleniya kosmicheskimi poletami* (Displaying information in space flight control center), Moscow, Radio i svyaz', 1982, 194 p.
14. Solov'ev S.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 2(50), available at: <http://engjournal.ru/catalog/arse/adb/1469.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2016-2-1469
15. Oleinikov I.I., Pavlov V.P., Kovaleva M.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 32-37.
16. Knyazev A.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2002, vol. 9, no. 2, pp. 38-43.
17. Pisarenko V.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2018, vol. 25, no. 1, pp. 67-75.
18. Mironova K.V. *Metody matematicheskogo modelirovaniya upravleniya malymi kosmicheskimi apparatami na osnove traektornoi informatsii* (of Mathematical modeling methods for small spacecraft control based on trajectory data). Doctor's thesis, Ryazan, Ryazanskii gosudarstvennyi radiotekhnicheskii universitet, 2015, 184 p.
19. Abramov N.S., Ardentov A.A., Emel'yanova Yu.G., Talalaev A.A., Fralenko V.P., Shishkin O.G. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 2015, vol. 6, no. 2(25), pp. 85-99.
20. Stupak G.G., Lyubinskii V.E., Koryanov V.V. et. al. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya poletom perspektivnykh kosmicheskikh apparatov i kompleksov* (Automated flight control system for advanced spacecraft and complexes), Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2012. Part 3 - 439 p.