

На правах рукописи

УДК 629.7.051

Мельников Евгений Константинович

**МЕТОД РЕШЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПИЛОТИРУЕМОЙ СТАНЦИИ
НА БОЛЬШИХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ**

Специальность 05.07.09

«Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Мельников

Москва

2006 г.

Работа выполнена в Московском авиационном институте
(государственном техническом университете)

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Почукаев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Неволько Михаил Павлович;
кандидат технических наук,
Разыграев Анатолий Павлович

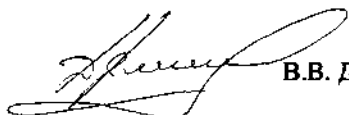
Ведущая организация: ОАО «Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» им. С.П. Королева»

Защита состоится «__» _____ 2006 г. в __ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.125.12 в Московском авиационном институте
(государственном техническом университете) по адресу: 125993, Москва, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
авиационного института (государственного технического университета).

Автореферат разослан «25» *апреля* _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.12,
кандидат технических наук, доцент


В.В. Дарнопых

2006А
10/89

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Сущность и актуальность исследования

Полёты долговременных пилотируемых станций начались в 1971 году. Станции первых двух поколений («Салют-1», «Салют-3», «Салют-4», «Салют-5») имели ограниченный ресурс, не превышавший 180 суток для станций второго поколения.

Единственная американская станция «Скайлэб», не имеющая собственных двигателей, находилась в космосе в течение 6 лет вследствие её выведения на высоту 430 км и трёх поддержаний орбиты средствами транспортных кораблей «Аполлон», доставлявших экипажи экспедиций на станцию.

Таким образом, до 1977 г. в мировой практике обеспечения функционирования станций рассматривались только задачи поддержания орбиты.

В сентябре 1977 г. была выведена на орбиту долговременная станция «Салют-6» третьего поколения, снабженная двумя стыковочными узлами и предусматривающая дозаправку топливом, доставляемым грузовыми кораблями «Прогресс». Это позволило увеличить время активного функционирования станции до нескольких лет.

Впервые перед баллистиками была поставлена задача обеспечения не только поддержания высоты полёта, но и формирования рабочей орбиты (ФРО) станции перед выведением транспортного корабля (ТК) «Союз». Необходимость ФРО была обусловлена высокими требованиями к точности фазового рассогласования между станцией и ТК «Союз» в момент выведения при односуточном сближении. Вероятность случайного выполнения указанного требования составляла менее 10%.

В дальнейшем появились дополнительные требования к параметрам орбиты станции, связанные с обеспечением оптимальных условий сближения

со станцией грузовых ТК и прохождением трассы станции через определенные районы земной поверхности.

Возникла необходимость планирования совокупности манёвров, времена и значения которых нельзя было рассматривать независимо друг от друга. Потребовался новый концептуальный подход к управлению движением станции при ФРО, в соответствии с которым должен осуществляться поиск совместных решений задачи для ряда независимых требований программы полёта к параметрам орбиты.

С появлением международной космической станции (МКС) возникли дополнительные требования к баллистическим условиям полёта со стороны членов кооперации. В практику управления полётом была введена процедура уклонения от космического «мусора», повышающая неопределённость условий решения задачи ФРО.

Таким образом, потребовалось решение новой задачи планирования управляемого движения станции, не имевшей аналогов среди существовавших задач баллистического обеспечения. Особенности новой задачи являлись многомесячные интервалы маневрирования и наличие разнесенных по времени (политерминальных) требований к параметрам орбиты.

Политерминальность условий задачи, влияние случайных вариаций плотности атмосферы и возмущений орбиты в процессе функционирования станции требовали рассмотрения всего множества возможных решений задачи с целью последующего выбора решения, устойчивого к условиям неопределённости исходных данных.

Таким образом, условия функционирования околоземных пилотируемых станций и особенность планирования их работы, связанная с распределением операций на больших интервалах времени, позволяют считать сложную научно-техническую задачу планирования долговременных схем ФРО станции актуальной.

Объектом исследования является околоземная пилотируемая космическая станция.

Предмет исследования - методы управления движением станции при ФРО.

Целью работы является повышение эффективности выполнения программы полёта околоземной космической станции за счёт разработки метода длительного планирования управления движением станции при ФРО в условиях влияния случайных флуктуаций плотности атмосферы, при политерминальных требованиях к орбитальным параметрам и неполной определенности исходных данных.

Достижение цели осуществлялось в результате проведения исследований в следующей последовательности:

- исследовалось управление движением центра масс пилотируемых станций с целью выявления всего множества ситуаций, связанных с баллистическим обеспечением выполнения требований к параметрам орбиты, и оценки особенностей, требующих неординарных методических подходов;
- проводилась классификация решавшихся баллистических задач по основным признакам, определяющим общность метода решения, и выявлялись задачи, требующие разработки новых методов решения;
- формулировались задачи ФРО;
- исследовался один из наиболее важных возмущающих параметров – влияние плотности атмосферы на движение станций в диапазоне высот их функционирования при различных уровнях солнечной активности;
- разрабатывались методики оценки характеристической скорости поддержания орбиты и определения взаимосвязи между разнесёнными по времени трассами станции;

- рассматривались вопросы снижения параметричности задачи в результате перехода к обобщенным параметрам терминальных условий при агрегировании операционных дат;
- разрабатывался метод общего решения задачи планирования управления движением станции при ФРО, позволяющий исследовать всё множество решений.

В соответствии с поставленной целью в работе решена научно-техническая задача, связанная с разработкой метода долговременного планирования управления движением станции.

Методы исследования. В работе использовались методы математической статистики, теории вероятностей, теории случайных функций, номографии.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Предложена концепция долговременного планирования многоцелевого управления движением станции, функциями которого являются выполнение разнесенных по срокам требований к параметрам орбиты станции при условии минимизации топлива на поддержание орбиты, включающая:

- многомесячные интервалы управления движением;
- необходимость парирования нерасчётных возмущений орбиты;
- удовлетворение баллистическим требованиям реализации разнесенных по срокам операций на станции при неполной определенности исходных данных.

2. На основе исследования движения станций «Салют», «Мир» и МКС получены эмпирические зависимости, позволяющие вычислять влияние атмосферы на скорость снижения высоты полета.

3. Выведена аналитическая зависимость прогноза трассы станции от высоты полёта, и получены номограммы соответствия между долготами восходящих узлов орбиты станции при выведении и спуске ТК.

При решении указанной задачи в работе получены следующие результаты, которые выносятся на защиту:

1. Постановка задачи управления движением пилотируемой станции, ранее не входившей в число задач баллистического обеспечения и вызванной необходимостью долговременного формирования рабочих орбит в стохастических условиях.

2. Аналитические соотношения, позволяющие вычислить влияние плотности верхней атмосферы Земли на скорость снижения высоты полёта околоземных пилотируемых станций в диапазоне высот их функционирования при разных уровнях солнечной активности, полученные на основе обработки результатов наблюдений за движением отечественных станций в течение 30-летнего периода.

3. Методики оценки приращения характеристической скорости, необходимой для поддержания орбиты на долговременном интервале, и определения смещения трассы в зависимости от высоты полёта станции и продолжительности прогноза.

4. Методика нахождения областей существования решений задач долговременного формирования рабочих орбит на основе разработанного способа геометрической интерпретации управления движением станции.

5. Применение разработанного метода для оценки влияния факторов, связанных с изменением продолжительности временного интервала формирования рабочей орбиты, с распределением характеристической скорости поддержания орбиты между участками маневрирования, с наличием разнесенных по времени требований и со смещением операционных дат, на области решений.

Научная значимость работы заключается в развитии методов баллистического обеспечения околоземных пилотируемых станций в части методологии долговременного планирования.

Практическая значимость результатов определяется прикладной направленностью исследований, включающей разработку метода решения новой задачи космической баллистики и внедрение его в практику управления полётов станций «Мир» и МКС. Решение задачи долговременного ФРО при одновременном поддержании высоты полёта станции широко использовалось в процессе баллистического обеспечения полёта станций «Салют» и «Мир» и показало высокую эффективность подобного подхода. Разработанный метод в настоящее время используется в практике баллистического обеспечения управления движением центра масс МКС. Внедрение результатов работы подтверждается соответствующими актами.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается соответствием математических моделей изучаемым явлениям при принятых допущениях, корректностью формализаций и подтверждается практикой успешного внедрения разработанного метода в процесс управления движением станций.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертационной работы докладывались на III и IV Международных конференциях «Малые спутники, новые технологии. Области эффективного применения в XXI веке» (г. Королев, 2002 и 2004 гг.), на XI и XV Гагаринских чтениях (г. Москва, 1981 и 1985 г.г.), а также на научных семинарах ЦУП-М ФГУП «ЦНИИмаш» и кафедры 604 МАИ. По теме диссертации опубликовано 5 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобразования России, а также подготовлена глава 10 для монографии «Навигационное обеспечение полёта орбитального комплекса «Салют-6» - «Союз» - «Прогресс» под редакцией Б.Н.Петрова и И.К.Бажинова.

Вклад автора в проведение исследований заключается:

- в разработке концепции и постановке задач долговременного планирования управления движением станции при ФРО;
- в разработке метода решения задач долговременного ФРО и выводе приближенных аналитических соотношений для оценки влияния атмосферы на движение станции на основе обработки результатов наблюдений за движением российских станций в течение 30-летнего периода;
- в организации работы и личном участии в формировании рабочих орбит станций «Салют», «Мир» и МКС;
- в подготовке исходных данных и анализе результатов реализации схем ФРО и поддержания орбит станций.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка из 15 наименований и трёх приложений. Общий объем диссертации – 153 страницы машинописного текста, в том числе: 140 страниц основного текста и 13 страниц приложений, 18 рисунков, 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется выносимая на защиту задача долговременного планирования управления движением станции в целях формирования рабочих орбит, проводится обоснование актуальности темы, излагаются цели и содержание исследования, оцениваются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, излагаются их реализация, апробация и публикация.

Первая глава посвящена основным особенностям управления движением центра масс станции, классификации и постановкам задач долговременного формирования рабочих орбит.

Подчеркивается, что максимальные затраты характеристической скорости (V_x) на формирование необходимых орбитальных условий полёта станции ограничены допустимой максимальной высотой полёта на рассматриваемом временном интервале. Минимизация затрат топлива на поддержание орбиты и разнесенные по времени требования к орбитальным условиям полёта станции приводят к необходимости рассмотрения долговременных схем маневрирования и решения политерминальных задач управления движением.

Вопросы поиска оптимальных решений в таких задачах должны рассматриваться в условиях случайного влияния плотности верхней атмосферы Земли, учитывать нерасчётные возмущения орбиты типа отклонения от космического «мусора», а также возможные переносы требований к параметрам орбиты на рассматриваемом временном интервале.

Возникающие при этом проблемы планирования схем ФРО, связанные с различного рода неопределенностями и многофункциональностью задачи, потребовали разработки определенных приёмов решения таких задач, из которых в дальнейшем сложился метод ФРО станций.

С целью постановки задач ФРО пилотируемых станций было выявлено всё множество задач баллистического обеспечения, требующих определенных методических подходов, что позволило провести классификацию задач ФРО по общности метода решения и выделить четыре типа задач.

В *первый тип* вошли задачи, в которых отсутствуют неопределенности, вызванные продолжительностью интервала формирования орбитальных условий. Решение таких задач осуществляется с использованием известных методов космической баллистики.

Ко *второму типу* были отнесены задачи с долговременными схемами ФРО, в которых ограничена только характеристическая скорость поддержания орбиты.

Формирование рабочей орбиты станции в таких задачах осуществляется для запланированной даты проведения операции при наличии случайных возмущений плотности атмосферы.

В задачах *третьего типа* наряду с основными терминальными условиями (ТУ) существуют дополнительные требования к орбитальным параметрам в моменты, располагающиеся внутри интервала маневрирования.

Задачи, в которых на выполнение ТУ оказывают влияние требования к последующим операционным датам, отнесены к задачам *четвёртого типа*.

В практике управления движением станции, как правило, присутствуют требования, относящие их к третьему и к четвёртому типам.

Задачи *третьего и четвёртого типов*, вызванные необходимостью выполнения разнесённых по времени требований программы полёта станции к орбитальным параметрам, относятся к новым задачам баллистического обеспечения полётов. С точки зрения математических методов решения эти задачи являются нетрадиционными, что позволяет отнести их к новому классу задач. Потребовалось описание их особенностей, введение присущих им понятий и определений.

С использованием введенных понятий и определений были выполнены постановки задач долговременного планирования схем ФРО, суть которых состоит в следующем.

Для принятых в диссертации допущений по модели движения станции, модели ошибок атмосферы и модели ошибок исполнения импульсов на основании исходной программы полёта, ограничивающей высоту полёта H_{cp}

и гринвичскую долготу восходящего узла орбиты λ_0 в заданные операционные даты $D^{(i)}$, определить:

- 1) начало интервала управления движением станции D_i ;
- 2) величину маневра в начале интервала управления ΔV_i ;
- 3) вероятное количество участков управления;
- 4) вероятные диапазоны дат управления и величин маневров.

Полученное решение должно удовлетворять следующим условиям:

- энергетические затраты на интервале маневрирования

$$\sum_{i=1}^n \Delta V_i \text{ не должны превосходить заданной величины } V_{\text{г доп}};$$

- решение должно быть устойчивым к влияниям вариаций плотности атмосферы и к другим возмущениям на интервале маневрирования.

Во второй главе представлен метод решения упрощенного варианта задачи долговременного планирования схемы ФРО с монотерминальными условиями, который учитывает случайный характер воздействия плотности атмосферы на движение станции.

В качестве терминальных условий в задаче рассматриваются гринвичская долгота восходящего узла орбиты станции λ_0 и период обращения T . Требования, связанные с точностью формирования параметров орбиты при условии экономии топлива на поддержание высоты полёта, приводят к необходимости рассмотрения двух разнесённых по времени участков управления.

Подобные задачи относятся к задачам двухэтапного стохастического программирования. Как показано в работе, указанная задача может быть решена с использованием методов теории случайных функций. В модели ошибок задачи случайные вариации плотности атмосферы характеризуются

автокорреляционной функцией K_p среднегодовой плотности верхней атмосферы Земли, а решение задачи рассматривается в стохастической постановке.

Алгоритм решения задачи планирования схемы ФРО основывается на использовании матрицы ковариаций ошибок по долготе ($\delta \lambda$) и периоду (δT), вызванных случайными вариациями плотности атмосферы в заданном временном диапазоне. При допущении о нормальном законе распределения ошибок по долготе и периоду матрица ковариаций имеет следующий вид:

$$M_x = \begin{vmatrix} D[\delta \lambda(D^*)] & K[\delta \lambda \cdot \delta T(D^*)] \\ K[\delta T \cdot \delta \lambda(D^*)] & D[\delta T(D^*)] \end{vmatrix},$$

где $D[\delta \lambda(D^*)]$ и $D[\delta T(D^*)]$ – дисперсии ошибок по долготе и периоду;

$K[\delta T \cdot \delta \lambda(D^*)] = K[\delta \lambda \cdot \delta T(D^*)]$ – корреляционный момент между ошибками по долготе и периоду обращения;

δT и $\delta \lambda$ – центрированные значения отклонений.

В диссертационной работе подробно рассматривается определение элементов матрицы ковариаций M_x .

Далее определяются величины математических ожиданий рассогласований по долготе ($\Delta \hat{\lambda}_{ii}$) и периоду ($\Delta \hat{T}_{ii}$), обеспечивающие выполнение вероятностного условия $P_i(\Delta \hat{\lambda}_{ii} < 0 \cap \Delta \hat{T}_{ii} > 0) = P_{зад}$ и определяются математическое ожидание и дисперсия даты проведения заключительного манёвра, величина манёвра (ΔV_i) в начальном участке маневрирования.

Качество решения задачи, удовлетворяющее требованиям к точности выполнения терминальных условий и эффективности поддержания орбиты, достигается в результате последовательного перебора номеров витков проведения планируемой операции.

В работе показано, что этими задачами ограничен класс задач, которые могут быть решены классическими методами.

Третья глава посвящена разработке методик расчёта влияния атмосферы на движение станций в околоземном пространстве, использующихся при подготовке исходной информации для решения задач планирования схем ФРО.

Одним из элементов исходных данных является характеристическая скорость поддержания орбиты для рассматриваемого интервала управления.

С целью разработки аналитического соотношения влияния одного из главных возмущающих параметров, плотности атмосферы, на движение станций было проведено исследование результатов реальных наблюдений за движением станций в течение 30-летнего периода.

По данным среднесуточных изменений средней высоты орбиты станций «Салют-6», «Салют-7», «Мир», МКС и КА «Алмаз-1», осуществлявших полёт в диапазоне высот $300 \div 400$ км, для индексов солнечной активности $F_{107} = 75, 150, 200 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ Гц})$ были построены линии регрессии, являющиеся осредненными значениями статистических данных и характеризующие зависимость $\Delta H_{\text{ср}} = \varphi(H_T, F_{107})$.

Была получена эмпирическая зависимость суточного снижения высоты орбиты от высоты полёта и солнечной активности:

$$\Delta H_{\text{ср}} \approx \left(0.015 \exp\left(\frac{400 - H_T}{42}\right) \right) \left(1 + \frac{F_{107} - F_{107}^{\text{min}}}{12 \left(1 + \frac{400 - H_T}{75} \right)} \right) \cdot \frac{S_6}{0.03}, \quad (1)$$

где S_6 – баллистический коэффициент размерности $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$,

H_T – текущая средняя высота орбиты,

F_{107} – прогнозируемое значение индекса солнечной активности,

$F_{107}^{\min} = 70$ – минимальное значение индекса солнечной активности.

Сравнение величин реального изменения средней высоты в течение 10-суточных интервалов в процессе снижения высоты орбиты от 380 до 330 км с результатами, полученными при использовании формулы (1) и $F_{107} = const$, показало отклонения от фактического снижения высоты в диапазоне от 5.3 до 17.4 %.

На практике в целях экономии топлива на поддержание орбиты полёт станции осуществляется в узком диапазоне высот, не превышающем 10 км. Поэтому для приближенных оценок допустимо закон снижения средней высоты орбиты (ΔH_{cp}) в течение рассматриваемого периода (ΔD) принять линейным. В таком случае при известном значении ΔH_{cp} , рассчитанном по формуле (1), следует полагать $\Delta H_{cp} \approx \Delta H_{cp} \cdot \Delta D$, а затраты характеристической скорости (V_x) на поддержание орбиты – определять из соотношения $V_x = \Delta H_{cp} / H_v$, где H_v – производная средней высоты полёта по приращению скорости.

Другим не менее важным для планирования схемы ФРО аналитическим соотношением, вывод которого представлен в данной главе, является зависимость долготы восходящего узла орбиты от продолжительности прогноза, от высоты орбиты станции и от влияния атмосферы: $\lambda_{D_{up}} = \varphi(\Delta D, H, \Delta H_{cp})$. При выводе этого соотношения было использовано свойство повторяемости трассы полёта для кратных орбит.

Вследствие отличия реальных орбит станции от кратных и с учетом торможения в атмосфере указанное соотношение имеет следующий вид:

$$\lambda_{D_{up}} \approx \lambda_D + \frac{1}{n} \cdot \Delta \lambda_{D_{cp}} \cdot \Delta D - \psi \left(\frac{H - H_{cp}}{H_v} \right) \cdot \Delta D + \psi \frac{\Delta H_{cp}}{2H_v} \cdot \Delta D^2, \quad (2)$$

где H – реальное значение средней высоты орбиты;

ΔH_{cp} – средняя высота ближайшей кратной орбиты;

$\Delta H_{\text{сум}}$ – суточное снижение средней высоты орбиты;

n – кратность орбиты;

$\Delta \lambda_{\text{о.к}}$ – межвитковое расстояние кратной орбиты;

ΔD – продолжительность интервала прогнозирования;

H_v, ψ – коэффициенты пропорциональности (для диапазона высот полёта 300÷400 км эти коэффициенты равны 1,75 км/(м/с) и 0,136 град./((сут.·м/с) соответственно).

Вследствие возможных вариаций плотности атмосферы точность прогнозирования на 15-суточном интервале составляет $\sim 0,5^\circ$.

Соотношение (2) позволяет провести редуцирование терминальных условий задачи планирования схемы ФРО, при наличии нескольких близко расположенных требований к орбитальным условиям станции по параметру λ_o орбиты.

Четвёртая глава посвящена описанию метода проектирования долговременных схем управления движением станции при ФРО для задач третьего и четвёртого типов.

Основной особенностью данных задач является многомесячный процесс управления орбитальным движением и наличие разнесённых по срокам выполнения требований к параметрам орбиты.

В качестве параметров управления при решении задачи планирования используются расположения участков маневрирования, распределение допустимой характеристической скорости между участками, различные сочетания полётных номеров витков выполнения терминальных и дополнительных требований, целенаправленные сокращения допустимых диапазонов формируемых параметров.

Представляемый в диссертационной работе метод выбора схемы ФРО заключается в последовательном выполнении определенных операций,

связанных как с проектированием, так и реализацией манёвров управления движением станции.

Следует особо подчеркнуть, что задача подготовки рабочей орбиты станции может быть решена при различных схемах ФРО, отличающихся распределением управляющих воздействий на интервале управления, т.е. существует множество решений задачи. В таком случае различные решения задачи планирования схемы ФРО можно рассматривать с точки зрения точности выполнения ТУ и эффективности реализации поддержания орбиты.

Сущность представленного в работе метода планирования схемы ФРО заключается в том, что он позволяет проанализировать всё множество возможных решений.

На рис. 1 представлена структурная схема решения задачи планирования схемы ФРО, основанная на применении данного метода.

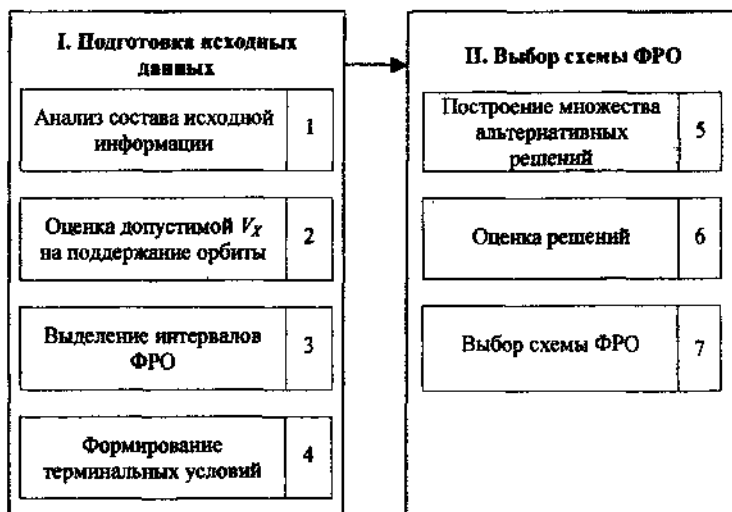


Рис. 1. Последовательность планирования схемы ФРО.

В соответствии со структурной схемой проектирование схемы ФРО осуществляется в следующей последовательности.

- 1) На основании исходных данных с использованием формулы (1) определяются допустимые затраты характеристической скорости на поддержание орбиты ($V_{X \text{ доп}}$).

При дальнейшем планировании схемы ФРО требуется учитывать условие $\sum_{i=1}^n \Delta V_i \leq V_{X \text{ доп}}$, т.е. затраты на ФРО не должны превышать рассчитанной выше величины $V_{X \text{ доп}}$.

- 2) Определяется продолжительность интервала ФРО в зависимости от $V_{X \text{ доп}}$ и расположения операционных дат, для которых введены ограничения на параметры орбиты станции.

В рассматриваемый интервал ФРО должны войти все требования к орбитальным параметрам, которые не могут быть выполнены дифференцировано без нарушения ограничения по величине $V_{X \text{ доп}}$.

- 3) Выбирается основная терминальная дата схемы ФРО с точки зрения требований по точности формирования орбитальных условий.

Рассматривается возможность агрегирования операционных дат, т.е. приведения нескольких требований, разнесенных по срокам выполнения, к одному. Подобная операция влечёт за собой редукцию терминальных условий, приводящую к сокращению размера допустимых диапазонов формируемых параметров орбиты.

В качестве примера в главе приведена построенная автором и используемая в программе МКС номограмма взаимосвязи требований к орбитальным параметрам при выведении и спуске ТК «Союз» в зависимости от средней высоты полёта станции и

от продолжительности между операциями выведения и спуска ТК (рис. 2).

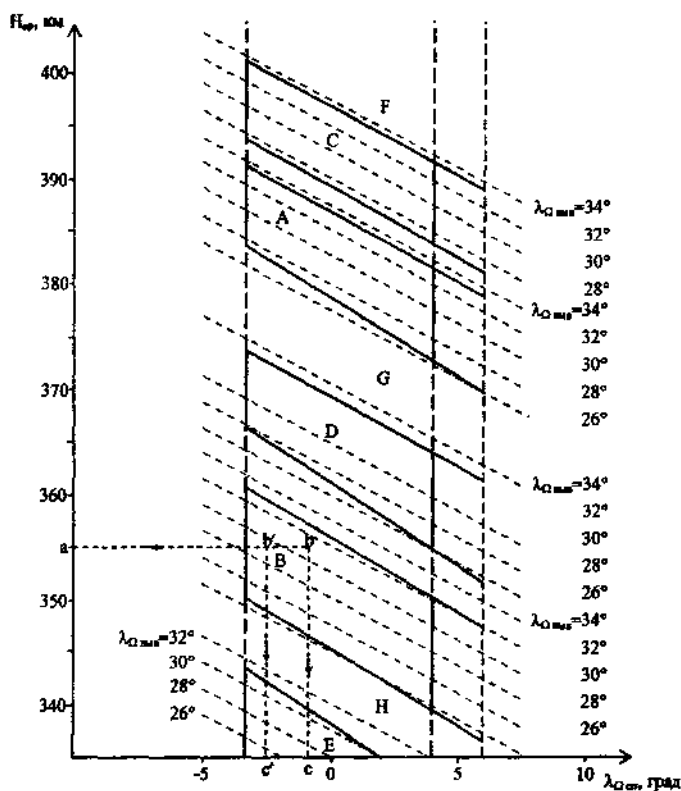


Рис.2. Зависимость условий расположения станции при операциях замены корабля-спасателя по программе МКС.

Как следует из номограммы, агрегирование орбитальных условий для двух дат операций возможно только при формировании определенных терминальных условий для даты выведения ТК, т.е. требуется их редуцирование при подготовке исходных данных.

- 4) Строится графическое представление исходных данных с отображением требований для каждой операционной даты.

Требования программы полёта к орбитальным условиям станции для операций выведения и спуска ТК сводятся к положению трассы станции относительно поверхности Земли. Поэтому основным формируемым параметром орбиты станции является долгота восходящего узла орбиты (λ_0). В таком случае в прямоугольной системе координат с временной осью абсцисс и значениями корректируемых смещений ($\Delta\lambda_0$) по оси ординат отображаются все требования к операционным датам по параметру λ_0 .

В связи с тем, что формируемые условия по параметру λ_0 могут быть выполнены для разных номеров витков полёта станции, всё множество решений задачи планирования схемы ФРО подразделяется на отдельные области решений (рис. 3).

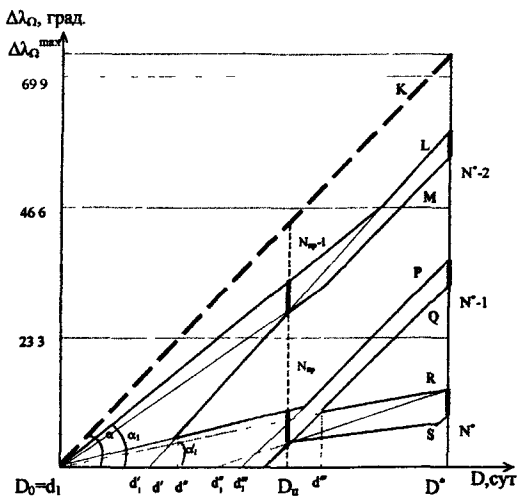


Рис. 3. Области решений при наличии промежуточного ограничения параметра λ_0 внутри интервала ФРО.

В диссертационной работе доказано следующее основное положение:

любая ломаная линия, начинающаяся от оси абсцисс системы координат $(\Delta\lambda_0, D)$, все звенья которой располагаются под острым углом к этой оси, может быть интерпретирована в качестве управления движением станции (рис. 4).

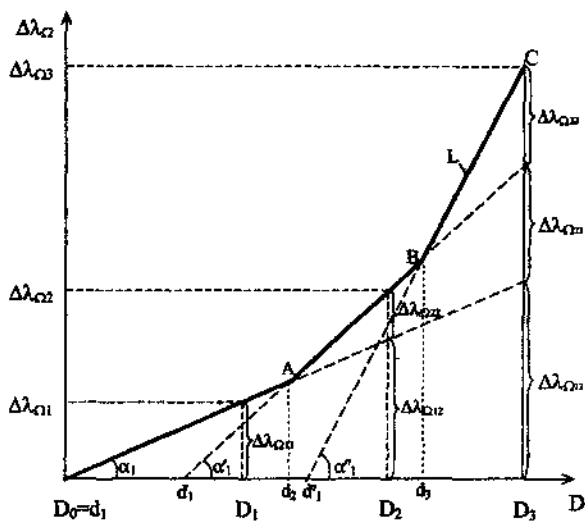


Рис. 4. Графическое представление управления движением станции.

Для решения задачи планирования схемы ФРО необходимо, чтобы ломаная пересекала допустимые диапазоны значений параметра λ_0 . Располагающаяся в области решений, одним из условий которых является поддержание орбиты, ломаная линия должна быть *выпуклой*.

- 5) Осуществляется анализ области решений, при котором рассматриваются устойчивость схем решений и эффективность поддержания орбиты.

Под устойчивостью понимается предусмотренная в схеме управления движением станции при ФРО возможность парировать случайные возмущения орбиты без нарушения требований и ограничений программы полёта к баллистическому обеспечению как на интервале ФРО, так и при выполнении дальнейших операций.

Поскольку требования устойчивости схем решений и эффективности поддержания орбиты взаимно противоречивы, на данном этапе решения задачи выбирается область решений, наилучшим образом удовлетворяющая обоим указанным требованиям.

Результатом определения области решений являются номера витков выполнения основных и дополнительных требований к формируемому орбитальным условиям.

- 6) Поиск конкретного решения внутри выбранной области решений проводится в результате решения детерминированных задач, учитывающих прогнозируемые значения математических ожиданий индексов солнечной активности, оказывающих непосредственное влияние на плотность атмосферы, и их предельные вариации.

При этом выбор участков маневрирования внутри интервала ФРО и распределение V_x поддержания орбиты между этими участками определяются расположением операционных дат и требуемой точностью формируемых параметров.

Таким образом, важной особенностью представленного в работе метода планирования схем ФРО является его наглядность, которая наряду с демонстрацией множества возможных решений выполняет определённую функциональную нагрузку – даёт возможность оценить качество областей решений. Данный метод также позволяет провести анализ влияния различных факторов на области решений. В соответствии с этим в диссертационной работе

были проведены важные для практики исследования следующих вопросов по организации управления движением станции:

- влияние расположения начала интервала маневрирования на схему ФРО;
- определение границ расположения участков маневрирования в зависимости от витков выполнения терминальных условий;
- совместимость основных и дополнительных требований к параметрам орбиты;
- влияние дополнительных требований на допустимый диапазон терминальных условий;
- изменение областей решений при смещении операционных дат.

Подобный анализ при ФРО станции позволяет проконтролировать и обосновать расположение операционных дат с точки зрения их совместимости и эффективности поддержания орбиты станции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных в работе исследований решена научно-техническая задача, связанная с управлением движения центра масс станции при долговременных формированиях рабочих орбит.

Основные результаты:

1. Выявлены особенности управления движением станции при долговременных формированиях рабочих орбит и выделено четыре типа задач по признакам общности методов решения.
2. Сформулирован новый класс ранее не рассматривавшихся при баллистическом обеспечении полёта задач управления движением станции при долговременном формировании рабочих орбит с множеством разнесённых по времени требований к параметрам

- орбит и при случайном характере вариаций плотности атмосферы, и дана их математическая постановка.
3. Разработан алгоритм решения задачи долговременного формирования рабочей орбиты при отсутствии дополнительных требований к параметрам орбиты внутри временного интервала формирования, как задачи двухэтапного стохастического программирования.
 4. Разработан метод решения многоцелевой задачи планирования долговременного управления движением станции.
 5. Исследован один из наиболее важных возмущающих факторов – влияние плотности атмосферы на движение станций. Получены аналитические соотношения, позволяющие оценить влияние атмосферы на скорость снижения высоты полёта и прогнозировать расположение плоскости орбиты относительно поверхности Земли.
 6. Разработаны методики для оценки характеристической скорости поддержания орбиты на долговременных этапах полёта станции и для сокращения параметричности задач в результате перехода к обобщенным параметрам терминальных условий.
 7. С использованием разработанного метода решения многоцелевой задачи планирования получены оценки критических ситуаций управления и проведен анализ влияния смещений операционных дат, а также изменения продолжительности формирования рабочей орбиты и затрат характеристической скорости на поддержание орбиты на схему управления.
 8. Данный метод был апробирован при баллистическом обеспечении полётов станций «Мир» и МКС и показал хорошие результаты. В течение последних 15 лет было реализовано около 30 схем формирования рабочих орбит, обеспечивших оптимальные условия сближения транспортных кораблей со станцией.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бажинов И.К., Гаврилов В.П., Мельников Е.К. и др. Навигационное обеспечение полета орбитального комплекса «Салют-6» – «Союз» – «Прогресс». – М.: Наука, 1985, стр. 255-273.
2. Колегов Г.А., Мельников Е.К. Особенности расчёта маневра формирования рабочей орбиты для долговременной орбитальной станции типа «Салют». – Москва: XV Гагаринские чтения, 1985.
3. Колегов Г.А., Мельников Е.К. Долгосрочное планирование маневров формирования рабочих орбит космических комплексов. – М.: Известия АН СССР, сер. техн. кибернетика, № 3, 1990, стр. 158-165.
4. Мельников Е.К. Особенности формирования спусковой орбиты пилотируемого комплекса «Мир». – Космонавтика и ракетостроение, 2001, – вып. 25, стр. 110-113.
5. Мельников Е.К. Особенности долгосрочного планирования поддержания высотной стратегии полета орбитальных станций. – Королев: III Международная конференция «Малые спутники, новые технологии. Области эффективного применения в XXI веке», 2002.
6. Мельников Е.К. Определение баллистических условий спуска транспортных кораблей в северный район штатного полигона посадки. – Космонавтика и ракетостроение, 2002, – вып. 4(29), стр. 176-179.
7. Мельников Е.К. Методы приближенного долгосрочного прогнозирования орбит полета пилотируемых космических станций. – Космонавтика и ракетостроение, 2004, – вып. 4(37), стр. 187-193.
8. Мельников Е.К. Стратегия маневрирования пилотируемой международной космической станции. – Космонавтика и ракетостроение, 2004, – вып. 4(37), стр. 176-186.

2006A
10189

10189