

На правах рукописи

УДК 629.783

**Старков Александр Владимирович**

**СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ  
АППАРАТАМИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПРОВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

Специальность 05.07.09

«Динамика, баллистика, управление движением  
летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

МОСКВА

2012

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: Малышев Вениамин Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)

Официальные оппоненты: Падалко Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Прикладная информатика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)

Суханов Константин Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист центра 128 Федерального государственного унитарного предприятия научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина, (ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 141400, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, д. 24).

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш, 141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, дом 4)

Защита состоится «13» декабря 2012 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Автореферат разослан «12» ноября 2012г.

Отзывы, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 125993, г. Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.125.12, к.т.н., доцент

В.В. Дарнопых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В результате человеческой деятельности количество управляемых и неуправляемых космических объектов в околоземном пространстве с каждым годом будет расти, а вероятность столкновения космических объектов друг с другом - увеличиваться. Столкновения и разрушения космических аппаратов (КА) приводят к образованию новых крупных фрагментов и осколков. По приблизительным оценкам, в околоземном пространстве находится более девяти тысяч объектов с размерами более 10 сантиметров, десятки тысяч с размерами 1-10 сантиметров и сотни тысяч с размерами менее 1 сантиметра. В последнее время «космический мусор» стал представлять все большую опасность для вновь запускаемых КА, но приемлемые способы борьбы с ним пока не разработаны. Поэтому потребность в обеспечении безопасного проведения динамических операций в околоземном пространстве очевидна. Уменьшение угрозы столкновения КА с другими космическими объектами представляет собой сложную организационно-техническую задачу, решению одной из подзадач которой посвящена данная работа.

Учитывая современный уровень засоренности околоземного пространства, следует рассматривать концепции пассивной и активной защиты КА от столкновений. Активная защита подразумевает выполнение динамических операций при выведении КА на орбиту (в том числе с использованием разгонного блока), переориентацию на орбите для использования фрагментов корпуса КА в качестве экранной защиты, выполнение на орбите маневров уклонения от столкновения, выполнение маневров по захоронению отработавших КА. Проводимые динамические операции должны быть безопасными. Под безопасностью динамической операции КА будем подразумевать выполнение им маневров, которые не ухудшают функциональные возможности надсистемы. В этом смысле «космический мусор» и другие космические объекты могут рассматриваться как дополнительные ограничения в оптимизационной задаче.

Основой обеспечения высокого уровня надежности и безопасности при проведении динамических операций является всесторонняя экспериментальная отработка изделий в условиях максимально приближенных к реальным условиям функционирования, применение математического, имитационного и физического моделирования, летных демонстраторов и комплексных стендов; сочетание математического и физического моделирования с натурными испытаниями; развитие экспериментально-испытательной базы и методов математического моделирования для обеспечения требуемого уровня надёжности и безопасности.

Одним из основных направлений развития экспериментальной базы является разработка и внедрение современных средств математического моделирования, учитывающих условия и параметры функционирования этих изделий в полёте, включая соответствующее математическое обеспечение.

Актуальность и новизна работы следует из анализа развития специализированного программного обеспечения, как на мировом рынке, так и во внутрикорпоративном сегменте (продукты Satellite Tool Kit, Bernese Software, «Orbit Determination Toolkit», «Free Flyer» и др.), который выявил тенденцию их

развития по пути универсализации. Производитель стремится включить в свой продукт все больше функций и инструментов решения задач. Это неизбежно приводит к значительному усложнению и снижению эффективности их применения конечным пользователем. Ключевая цель обеспечения функциональной полноты программных средств остается нереализованной. Разумным шагом на пути к преодолению этого недостатка является специализация решений на основе концепции открытой архитектуры, которая предлагает строить ПМК из следующих компонент:

1) системы ведения данных, основанной на собственной модели представления и интерпретации информации, которая обеспечивает исполнение системы произвольных запросов к собственной базе данных и механизм межпрограммного взаимодействия;

2) единого, стандартизованного языка высокоуровневого описания объектов моделирования, входной и выходной информации, исполнительской макропрограммы с поддержкой механизмов межпрограммного взаимодействия;

3) комплекса макропрограмм на языке высокого уровня, описывающих работу различных подсистем КА, алгоритмы функционирования которых подвержены частым модификациям, а также нестандартные, характерные именно для данного КА, особенности обработки данных, которые нецелесообразно включать в типовую систему.

Анализ публикаций на данную тему и результаты работ, выполненных авторами: В.А. Бартеневым, М.Н. Красильщиковым, А.А. Лебедевым, Л.Н. Лысенко, В.В. Малышевым, В.Н. Почукаевым, М.Ф. Решетневым, Г.М. Чернявским, Р. Шенноном, позволил определить основные особенности построения алгоритмов управления космическим аппаратом при проведении динамических операций, а также пути исследований, направленных на определение общих принципов и методов решения поставленной задачи. В работах этих авторов излагались теоретические основы и методы проектирования КА, исследовались проблемы навигационно-баллистического обеспечения полета, модели движения и принципы управления КА, работа целевой аппаратуры и служебных систем. Вместе с тем остается еще ряд задач, связанных с созданием унифицированных средств автоматизации отработки динамических операций КА.

Таким образом, вопрос создания алгоритмического и программного обеспечения для отработки безопасного проведения динамических операций КА является актуальной и практически важной задачей.

**Объект исследования.** В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается космическая система (КС). Поскольку ее базовым элементом является КА, особое внимание в работе уделяется моделированию выполняемых им динамических операций.

**Предмет исследования.** Алгоритмические средства проведения динамических операций являются предметом исследования данной диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является совершенствование алгоритмического и программного обеспечения за счет синтеза алгоритмов управления КА с учетом требований безопасности и разработке методики

построения программно-моделирующего комплекса (ПМК) для отработки динамических операций.

Для достижения поставленной цели решаются **научно-технические задачи**:

1. Исследуются требования, предъявляемые к средствам безопасного проведения динамических операций КА.
2. Разрабатываются математические модели бортовых систем КА и внешней среды.
3. Разрабатываются математические модели проведения динамических операций для КА на высокоэллиптических и круговых орбитах.
4. Определяются принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса.
5. С помощью созданного программно-моделирующего комплекса проводится математическое моделирование динамических операций выведения и изменения орбиты КА.

**Методы исследования.** В качестве методологической основы используется системный подход. На нем основывается принцип создания единой базовой подсистемы – типового унифицированного программного средства, методический и алгоритмический аппарат которого позволяет определять движение широкого множества КА ближнего и среднего космоса, гибко реагируя при этом на изменение параметров орбит КА, допустимых значений показателей качества и различных моделей измерений. Основными методами исследования, используемыми в работе, являются методы динамики полета, теории управления, статистические методы обработки данных, методы оптимального управления и обработки информации. При программной реализации математического обеспечения используются методы объектно-ориентированного программирования и мультизадачность операционных систем Windows, Linux, системы управления реляционными базами данных, а также средства обеспечения доступа в сетях Интернет и Интранет.

**Научная новизна результатов.** В работе получены следующие результаты, обладающие новизной и научной значимостью:

1. Сформированы алгоритмы управления КА с учетом требований безопасности проведения динамических операций
2. Определены математические модели проведения орбитальных коррекций КА при выполнении динамических операций.
3. Сформирована адаптированная к требованиям программно-моделирующего комплекса (ПМК) математическая модель бортовых систем, внешних воздействий и контура управления.
4. Определены требования, предъявляемые к программно-математическому обеспечению для отработки средств проведения динамических операций. Разработана методика создания ПМК для отработки средств проведения динамических операций на основе концепции открытой архитектуры. Определены состав и структура базы данных, а также интерфейс ее взаимодействия с программно-моделирующим комплексом.

**Практическая значимость результатов исследования.** Результаты, полученные в диссертационной работе, могут найти дальнейшее применение как для действующих, так и для перспективных КА и систем, а именно:

1. Разработанные методики, алгоритмы и программно-моделирующий комплекс могут быть использованы для алгоритмического и программного обеспечения системы отработки и проведения динамических операций КА различных орбитальных группировок.
2. Все предложенные в работе методы и алгоритмы реализованы в виде программно-моделирующего комплекса, имеющего открытую архитектуру и позволяющего более эффективно по сравнению с существующими аналогами решать задачи отработки программ проведения динамических операций КА, а также снизить риск провоцирования нештатных ситуаций с КА из-за ошибок операторов.
3. Благодаря открытому интерфейсу появилась возможность использования независимых от разработчика ПМК модулей. При этом их разработчики могут полностью сосредоточиться на совершенствовании своих компонент программного обеспечения.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Системный анализ и управление» МАИ и рабочей деятельности ФГУП ЦНИИмаш, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Имеются соответствующие акты внедрения от МАИ, ФГУП ЦНИИмаш, ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

**Достоверность результатов** подтверждается использованием апробированного математического аппарата, обоснованием полученных результатов математическими расчетами и проведенным сравнительным анализом полученных результатов моделирования комплексами, имеющими схожий функционал.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Математические модели и алгоритмы проведения орбитальных коррекций КА при выполнении динамических операций.
2. Методика создания программно моделирующего комплекса для отработки алгоритмов проведения динамических операций КА.
3. Методика разработки базы данных программно-моделирующего комплекса.
4. Результаты использования программно-моделирующего комплекса для отработки безопасного проведения динамических операций на высокоэллиптических и круговых геостационарных орбитах (ГСО).

**Апробация работы и публикации.** Результаты работы докладывались и получили одобрение на научно-технических конференциях: 16-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (Евпатория, 2011 г.), 17-ой Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (Евпатория, 2012 г.)

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в трех статьях [1-3] в журналах, входящих в рекомендованный ВАКом Минобрнауки России перечень изданий, и в четырех работах [4-7] в сборниках тезисов докладов на научно-технических конференциях.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 51 наименования. Текст диссертации изложен на 218 машинописных страницах, включает 80 рисунков и 12 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы. Проведен обзор трудов отечественных и зарубежных ученых в области проведения динамических операций космическими аппаратами различного назначения. Описана структура диссертации и дано краткое содержание ее разделов.

**В первой главе** работы проводится анализ требований, предъявляемых к средствам безопасного проведения динамических операций КА. В целом, основные проблемы с безопасностью связаны с отслеживаемыми и потенциально отслеживаемыми объектами. Рассматриваются основные причины опасных ситуаций с КА в околоземном космическом пространстве, приводящие к возможности их столкновений. В соответствии с принципом декомпозиции весь перечень опасных ситуаций привязывается к фазам активного существования КА: выведения, испытания, эксплуатации и захоронения. Формируются требования к средствам безопасного проведения динамических операций для каждой фазы с учетом орбитального построения и целевой задачи.

В главе определены требования, предъявляемые к средствам отработки проведения динамических операций, которые предложено условно разделить на две большие группы.

Первая группа – требования к алгоритмическому обеспечению, а именно требования к типам задач, для чего был определен перечень основных динамических операций, которые необходимо отрабатывать, а именно:

- ввод спутника в заданное место (слот) орбитальной структуры после выведения носителем на промежуточную орбиту;
- коррекция относительного положения спутников, когда искажение орбитальной структуры приводит к снижению целевой эффективности системы;
- поддержание относительного положения спутников в заданных пределах при проведении экспериментов;
- перевод спутника из одного слота структуры в другой, например – при замене вышедшего из строя спутника резервным;
- удержание спутника в окрестности номинального положения слота в течение длительных промежутков времени (например, удержание спутника на ГСО, удержание долготы восходящего узла высокоапогейной синхронной орбиты);
- сближение с другим КА для инспекции;
- выполнение маневров уклонения на фоне решения КА его основной задачи;
- регулирование относительного положения спутников при проведении экспериментов и т.п.

Приведенный перечень технических требований может быть сведен к двум базовым задачам:

1. Задаче приведения вектора начального состояния КА группировки в заданную область пространства.

2. Задаче выполнения маневров в заданной области пространства в течение срока активного существования.

Перечисленные постановки задач управления и терминальные требования предложено рассматривать как первоначальные по отношению к стохастическому и минимаксному подходам, которые должны применяться при построении рабочих алгоритмов.

Вторая группа требований это требования к программному обеспечению, которое должно:

- обеспечить возможность автоматической генерации циклограммы коррекции в детерминированной, стохастической и минимаксной постановках с получением соответствующих оценок принятого критерия оптимальности;
- обеспечить возможность назначения пользователем критерия оптимальности или взвешенного обобщенного критерия с коэффициентами предпочтения;
- использовать математические модели, учитывающие основные возмущения, характерные для орбит рассматриваемых классов;
- обеспечить возможность поиска управления как при фиксированной, так и при свободной ориентации вектора тяги;
- обеспечить «прозрачность» (понятность) генерируемых решений для конечного потребителя.

Требования, предъявляемые к средствам отработки динамических операций КА для исключения возникновения опасных ситуаций, позволили сформулировать две взаимосвязанные между собой задачи синтеза алгоритмов управления КА с учетом безопасности проведения динамических операций и формирования методики построения программно-моделирующего комплекса (ПМК) для их отработки.

**Вторая глава** посвящена вопросам формирования математических моделей и алгоритмов проведения орбитальных коррекций КА при выполнении динамических операций. Приводятся математические модели бортовых систем КА и внешней среды. При этом основное внимание уделяется учету факторов существенно влияющих на проведение динамических операций. В качестве исходных уравнений рассматриваются общие нелинейные уравнения движения КА. Приводятся математические модели влияния нецентральности гравитационного поля Земли, гравитационных полей Луны и Солнца, давления солнечного ветра. Приводятся соотношения для вычисления координат Луны и Солнца. Формируется модель вектора тяги с учетом действия случайных мультипликативных и аддитивных возмущений. К использованию в рамках ПМК предложены следующие варианты формирования проекций управляющих ускорений на орбитальные оси: трехосная система стабилизации с ориентацией КА по орбитальным осям и в инерциальной системе координат.

Далее рассматривается постановка задачи управления при проведении следующих динамических операций:

- обеспечение начальной орбиты с заданными параметрами (задача выведения);
- перевод на промежуточную и возвращение на опорную орбиту при выполнении маневра уклонения;
- удержание КА на расчетной орбите.



Эти задачи в основном сводятся к формированию (поддержанию) гринвичских долгот восходящих узлов орбит в заданном ограниченном диапазоне, который определяет возможные колебания трасс полета и, следовательно, колебания зон радиовидимости. Поэтому при построении космических систем необходимо решать задачу приведения и стабилизации трасс полета КА. Приводятся решения поставленной задачи, как в классической, так и стохастической постановках.

*Классическое решение* предполагает проведение орбитальных коррекций с целью изменения двух параметров – высоты перигея орбиты и периода обращения КА. Задача об изменении высоты перигея формулируется следующим образом. Задана исходная орбита. Полагается, что она определяется апогейным и перигейным расстояниями соответственно  $r_{п1}, r_{а1}$ . Требуется определить величину, направление и точку приложения управляющего импульса скорости, обеспечивающего изменение перигейного расстояния с  $r_{п} = r_{п1}$  на  $r_{п} = r_{п2}$  при условии сохранения апогейного расстояния орбиты, т.е. при условии  $r_{а1} = r_{а2}$ . Оптимальный маневр при изменении большой полуоси орбиты характеризуется известным трансверсальным импульсом, приложенным в перигее орбиты.

Принятый в работе *стохастический подход* к решению задачи управления подразумевает линеаризацию исходных уравнений движения в окрестности средней долготы. Это позволяет синтезировать алгоритм управления для проведения динамических операций в окрестности опорной орбиты. Так как главными возмущениями, изменяющими драконический период обращения КА по орбите, являются возмущения вследствие резонанса с долготными членами разложения гравитационного потенциала и доминирующими являются компоненты возмущений с индексами (2,2,1,1) в разложении геопотенциала, то уравнения движения можно выделить уравнения, описывающие эволюцию средней долготы и периода обращения (скорости дрейфа). С учетом ошибок реализации управляющего ускорения при корректировании средней долготы и возмущений от коррекции наклона уравнение движения долготы восходящего узла представимы в дискретном виде:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= y_k + [\vartheta_k + (1 + \mu_k)u_k]\Delta t_k + b_s \Delta t_k^2 + b_r \Delta t_k + \xi_{y_k}, \quad (1) \\ \vartheta_{k+1} &= \vartheta_k + (1 + \mu_k)u_k + 2b_s \Delta t_k + \xi_{\vartheta_k} ; \quad k = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где  $k$  – индекс, соответствующий моменту начала проведения маневра;  $N$  – количество коррекций;  $y_k$  – отклонение географической долготы восходящего узла (ГДВУ) от требуемого значения (в град.);  $\vartheta_k$  – скорость изменения  $y_k$  или скорость дрейфа ГДВУ (в град./зв.сут.);  $u_k$  – корректирующее воздействие или приращение скорости дрейфа, обусловленное работой корректирующей двигательной установки (в град./зв.сут.);  $\mu_k$  – мультипликативная ошибка реализации корректирующего воздействия  $u_k$ ;  $\xi_{y_k}, \xi_{\vartheta_k}$  – случайные аддитивные возмущения;  $b_s, b_r$  – постоянные на интервале времени  $\Delta t_k$  коэффициенты, вычисляемые по формулам

$$b_r = -\frac{2(\Delta g_{rr} + \Delta g_{msr})}{V_0}, \quad b_s = -\frac{3\pi}{V_0}(\Delta g_{rs} + \Delta g_{mss}),$$

где  $r, s$  – направления радиус-вектора КА и трансверсали соответственно,  $\Delta g_{rr}, \Delta g_{rs}$  – проекции гравитационного возмущающего ускорения;  $\Delta g_{msr}, \Delta g_{mss}$  – проекции осредненного на интервале  $\Delta t_k$  возмущающего ускорения от гравитационных полей Луны и Солнца.

Статистические характеристики случайных факторов  $\mu_k, \xi_{y_k}, \xi_{\vartheta_k}$  считаются известными:

$$M[\mu_k] = M[\xi_{y_k}] = M[\xi_{\vartheta_k}] = 0, \quad M[\xi_{y_k}^2] = \sigma_{y_k}^2, \quad M[\xi_{\vartheta_k}^2] = \sigma_{\vartheta_k}^2, \\ M[\xi_{y_k} \xi_{\vartheta_k}] = E_k; \quad M[\mu_k^2] = \sigma_k^2,$$

где  $M[\cdot]$  – математическое ожидание

Система уравнений плоского движения в матричном виде:

$$x_{k+1} = A_k x_k + (1 + \mu_k) B_k u_k + D_k + \xi_k, \quad (2)$$

где  $k$  – число маневров;  $x_k$  –  $n$ -мерный вектор состояния системы;  $u_k$  –  $m$ -мерный вектор управления;  $A_k$  – квадратная  $n \times n$  матрица;  $B_k$  – прямоугольная  $n \times m$  матрица;  $D_k$  –  $n$ -мерный неслучайный вектор;  $\mu_k$  – мультипликативная ошибка управления;  $\xi_k$  – случайный вектор ошибок прогноза вектора состояния  $x_{k+1}$ ,

$$x_k = (y_k \vartheta_k)^T, \quad \xi_k = (\xi_{y_k} \xi_{\vartheta_k})^T, \quad A_k = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t_k \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_k = \begin{pmatrix} \Delta t_k \\ 1 \end{pmatrix}, \\ D_k = \Delta t_k \begin{pmatrix} b_r + b_s \Delta t_k \\ 2b_s \end{pmatrix}.$$

В качестве характеристики конечной точности принимается величина

$$J = \min_{\{u_k\}} M[x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}], \quad (3)$$

где  $\lambda$  – симметричная матрица с известными элементами  $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{22}$ .

Таким образом, задача оптимизации состоит в определении такого алгоритма коррекций  $\{u_k(x_k), k = \overline{1, N}\}$ , который позволит перевести КА из произвольного начального положения  $x_0$  в некоторое конечное  $x_{N+1}$  и обеспечит минимум критерия (3). Отметим, что предложенная модель движения содержит два типа аддитивных возмущений – систематические неслучайные  $D_k$  и случайные  $\xi_k$ . Этим она отличается от традиционных моделей, содержащих только случайные аддитивные возмущения. Решение поставленной задачи возможно в стохастической и минимаксной постановках.

В стохастической постановке оптимальное управление – линейная функция:

$$u_k = -L_k x_k - d_k, \quad (4)$$

где коэффициенты обратной связи  $L_k$  и смещение  $d_k$  вычисляются с помощью рекуррентных соотношений:

$$L_k = \gamma_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1} A_k, \\ d_k = \gamma_k^{-1} B_k^T (\lambda_{k+1} D_k + G_{k+1}), \\ \gamma_k = (1 + \sigma_k^2) B_k^T \lambda_{k+1} B_k, \\ \lambda_k = A_k^T \lambda_{k+1} A_k - L_k^T \gamma_k L_k, \\ G_k = A_k^T \lambda_{k+1} D_k + A_k^T G_{k+1} - \gamma_k d_k L_k^T, \\ c_k = c_{k+1} + sp[F_k^T \lambda_{k+1} F_k E_k] + D_k^T \lambda_{k+1} D_k - \gamma_k d_k^2 + 2G_{k+1}^T D_k$$

с граничными условиями на правом конце:

$$\lambda_{N+1} = \lambda; \quad G_{N+1} = 0; \quad c_{N+1} = 0.$$

В минимаксной постановке, когда задача состоит в поиске оптимального управления  $\{u_k(x_k)\}$ , которое обеспечивает минимакс критерия

$$u_k = \arg \min_{u_k} \max_{\mu_k} M[(x_{N+1}^T \lambda x_{N+1})], \quad (5)$$

оптимальное управление также является линейной функцией:

$$u_k = -\frac{f_{2k}}{f_{1k}} = -(B_k^T \lambda_{k+1} A_k x_k + B_k^T \lambda_{k+1} D_k + G_{k+1}^T B_k) / (B_k^T \lambda_{k+1} B_k), \quad (6)$$

которое с точностью до слагаемого  $\sigma_k^2$  совпадает с решением задачи в стохастической постановке.

Полученные результаты были адаптированы для выполнения динамических операций на фоне решения задачи удержания, т.е., когда КА находится в допустимой области пространства. В этом случае для стабилизации долготы восходящего узла необходимо не более одной коррекции в течение достаточно длительного интервала времени между коррекциями (сутки или несколько суток) и КА постоянно находится в состоянии фиктивного равновесия относительно некоторой точки в пространстве фазовых координат  $(y, \vartheta)$ . Величины коррекций вычисляются по формуле (4) при  $N=1$ . При этом интервалы между коррекциями  $\Delta t$  выбираются из условия

$$|y_k(\Delta t_k)| \leq \Delta \lambda_{\max},$$

где  $\Delta \lambda_{\max}$  – заданная величина, характеризующая интервал удержания по средней долготе.

Для этого случая получены скалярные соотношения для вычисления коэффициентов обратной связи и смещения:

$$\begin{aligned} L_y &= (\Delta t + \chi_2)(1 + \sigma^2)^{-1}(\Delta t^2 + 2\chi_2\Delta t + \chi_1)^{-1}, \\ L_\vartheta &= (1 + \sigma^2)^{-1}, \\ d &= [\Delta t^2(b_r + b_s\Delta t) + \chi_2\Delta t(3b_s\Delta t + b_r) + 2b_s\Delta t\chi_1](1 + \sigma^2)^{-1}(\Delta t^2 + 2\chi_2\Delta t + \chi_1)^{-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\chi_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11}}; \chi_1 = \frac{\lambda_{22}}{\lambda_{11}},$$

а индекс  $k$ , равный 1, у всех величин опущен (для сокращения записи).

Считая  $\Delta t$  постоянным, выражение для управления имеет вид

$$u = -L_y y - L_\vartheta \vartheta - d \quad (8)$$

С учетом (8) и предполагая постоянство интервалов между коррекциями  $\Delta t$ , эволюция долготы и скорости дрейфа может быть описана следующим матричным уравнением:

$$M[x_{k+1}] = \tilde{A}x_k + \tilde{C}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \begin{bmatrix} 1 - L_y\Delta t & \Delta t[1 - L_\vartheta] \\ -L_y & 1 - L_\vartheta \end{bmatrix}, \\ \tilde{C} &= \begin{bmatrix} b_r\Delta t + b_s\Delta t^2 - d\Delta t \\ 2b_s\Delta t - d \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Из соотношения (9) находим координаты КА  $x^*$  в установившемся режиме:

$$x^* = (E - \tilde{A})^{-1}\tilde{C}. \quad (10)$$

Равенство (10) показывает, что вектор состояния КА в установившемся режиме зависит лишь от интервалов времени между коррекциями  $\Delta t$  и требуемой амплитуды колебаний долготы восходящего узла и скорости дрейфа, определяемой параметрами матрицы  $\lambda_{N+1}$ . Такой подход позволяет на фоне режима удержания проводить динамические операции по незначительному изменению в нужный момент времени долготы восходящего узла орбиты КА и дальнейшему возвращению ее к расчетному значению без проведения дополнительных сложных расчетов.

Как было отмечено выше, рассмотренные алгоритмы предполагают разделение динамических операций либо на управление периодом обращения и высотой перигея, либо на управление средней долготой, на фоне которого проводятся коррекции эксцентриситета и наклона. Тем не менее, при выполнении динамических операций представляют интерес алгоритмы, целью которых является одновременное обеспечение требуемых параметров орбиты. К ним относятся терминальные алгоритмы управления движением. Среди различных подходов, реализующих терминальное управление, выделим алгоритмы с использованием идеи прогнозирования управляемого процесса.

В работе получен и предложен к использованию *терминальный алгоритм*, позволяющий по заданным параметрам требуемой орбиты определить пространственную ориентацию вектора тяги КА. Требуемая орбита при этом может быть задана как жестко (задаются все шесть элементов орбиты), так и иметь свободные переменные (задаются три параметра - наклонение, радиус апоцентра и скорость в апоцентре).

Для формирования терминального алгоритма предлагается заменить дифференциальные уравнения движения соотношениями, связывающими текущее  $t_k$  и конечное  $T$  состояния, при условии, что весь импульс скорости прикладывается в текущий момент времени:

$$\begin{aligned} S_l(T) &= S^{pr}(S_k, V_k, \Delta t_k) + (1 + \mu_k^2) \Delta V_k (P_l)_k \Delta t_k, \\ V_l(T) &= V^{pr}(l_k, V_k, \Delta t_k) + (1 + \mu_k^2) \Delta V_k (P_l)_k, \end{aligned}$$

где  $l = x, y, z$ ,  $\Delta t_k = T - t_k$ ;  $S_l, V_l$  – проекции векторов положения и скорости на оси выбранной системы координат,  $P_l$  – проекции единичного вектора направления действия управляющей силы на оси выбранной системы координат (ориентация двигательной установки);  $\Delta V_k (P_l)_k$  – вектор проекций полного приращения скорости КА, вызванного работой двигательной установки на интервале  $\Delta t_k$ , на оси выбранной системы координат;  $S^{pr}, V^{pr}$  – векторные функции прогноза состояния КА на интервал времени  $\Delta t_k$ , вычисляемые по кеплеровской теории;  $(1 + \mu_k)$  – мультипликативная ошибка, вызванная работой двигательной установки, причем  $M[\mu_k^2] = \sigma_k^2$

Определение пространственной ориентации корректирующей двигательной установки (ДУ) в этом случае сводится к задаче минимизации линейной функции

$$F = F_0 + 2R_k^T P_k \rightarrow \min_{|P_k|=1}, \quad (11)$$

где  $k$  – номер коррекции,

$$\begin{aligned} R^T &= (R_x, R_y, R_z), \\ R_l &= b_1 [S_l(T) - S_l^*] + b_2 [V_l(T) - V_l^*], \\ F_0 &= [S(T) - S^*]^T [S(T) - S^*] + b_1^2 + b_2^2, \\ b_1 &= (1 + \sigma_k^2) \Delta V_k / V_0, \quad b_2 = (1 + \sigma_k^2) \Delta t_k \Delta V_k / r_0, \end{aligned}$$

$S^*, V^*$  – векторы требуемых положения и скорости КА,  $\Delta V_k$  – приращение характеристической скорости за время  $\Delta t_k$ . Решение задачи определяет пространственную ориентацию вектора тяги:

$$P_k = \frac{R_k}{\|R_k\|}.$$

В результате получили, что требуемое направление вектора ориентации  $P_k$  инвариантно к величинам полных приращений вектора скорости  $\Delta V_k$  и зависит лишь от текущего и требуемого вектора состояния КА, а также выбранной функции прогноза. Полученные формулы служат для определения обобщенного алгоритма терминального управления в случае, когда параметры требуемой орбиты задаются всего тремя составляющими: наклоном, радиусом и скоростью в апоцентре.

Таким образом, во второй главе сформированы математические модели движения, используемые в задаче анализа управляемого движения КА и предложено алгоритмическое обеспечение, предназначенное для формирования начальной орбиты с заданными параметрами (задача выведения), перевода на промежуточную и возвращение на опорную орбиту при выполнении маневра уклонения, удержание КА на расчетной орбите.

**В третьей главе** автором предложена методика построения и технический облик программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций КА.

Основным функциональным назначением ПМК является:

- создание математических моделей систем КА и внешней среды с использованием языка или команд моделирования и набора проблемно ориентированных программных модулей;
- организация дискретно-событийного взаимодействия моделей в модельном и в реальном времени с возможностью розыгрыша отказов и помех;
- управление процессом моделирования, как в диалоговом, так и в пакетном режиме работы, написание сценариев моделирования;
- оперативное отображение результатов моделирования в графическом и табличном виде;
- регистрация и обработка результатов моделирования, взаимодействие с бортовыми регистраторами.

Предлагаемая методика включает в себя:

- определение состава и структуры ПМК в целом
- определение состава, структуры и набора данных управляющего модуля
- определение состава и структуры системы ввода, хранения и первичной обработки данных
- определение перечня макропрограмм, учитывающих особенности функционирования конкретного КА и отдельных его подсистем в интересах решаемой задачи.

В работе на основе технической декомпозиции КА предлагается состав и иерархическая структура программно-моделирующего комплекса (см. рис. 1).

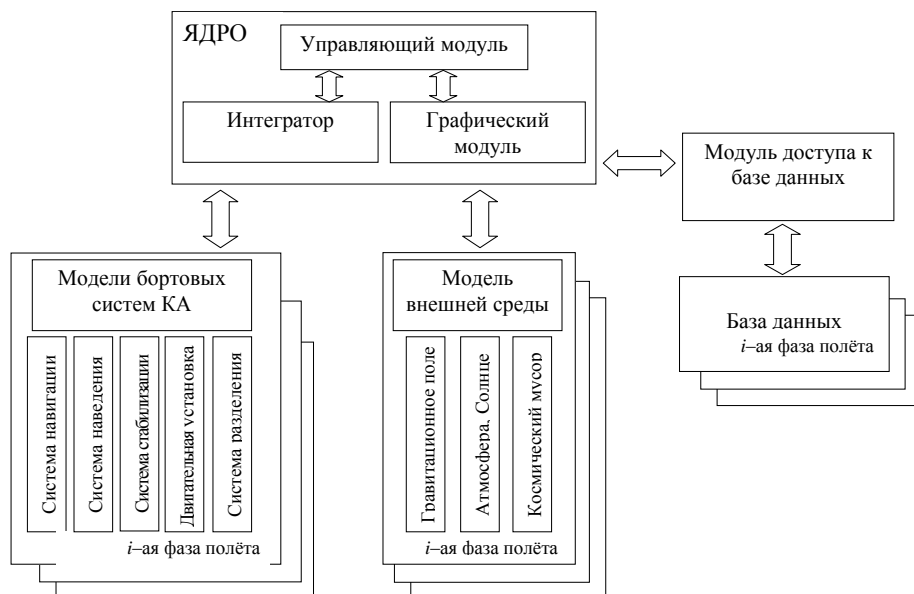


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса

полета или постановки решаемой задачи, не меняя при этом сущности моделирования. В состав ядра ПМК входят управляющий модуль, графический модуль и интегратор.

В базе данных все необходимые параметры КА и внешней среды задаются в зависимости от фазы полёта. При этом предлагается считать, что процесс ввода КА в группировку, удержания, схода с орбиты и т.п. состоит из «элементарных» событий – фаз полета. В работе под фазой полета понимается участок траектории, характеризующийся выполнением одной динамической операции.

На следующем уровне иерархии находятся блоки моделирования функционирования бортовых систем КА и воздействия внешней среды, которые в свою очередь делятся на конкретные модели. Эти блоки созданы независимо от ядра и конкретной БД. В них моделируются различные алгоритмы работы систем и создаются модели внешних воздействий различной точности. В ядре при организации моделирования возможно использование любой созданной модели той или иной бортовой системы КА уже для конкретной динамической операции. Моделирование возмущений осуществляется с помощью одной из созданных моделей в зависимости от выбранного режима (номинальный, предельный, стохастический) и требуемой точности расчёта.

Принятая структура программного комплекса позволяет без труда варьировать параметры и алгоритмы работы любого компонента ПМК, не изменяя при этом другие компоненты. Это обеспечивает возможность разработки отдельных блоков ПМК независимо друг от друга.

*Модели бортовых систем (БС)* представлены в виде динамически подключаемых модулей, имеющих входные и выходные параметры, определяемые требованиями ПМК, с которым они взаимодействуют. В тело каждой такой процедуры заложен алгоритм функционирования соответствующей бортовой системы. В зависимости от фазы полёта в ПМК моделируется работа таких бортовых систем, как система ориентации; система коррекции орбиты; система навигации; двигательная установка с исполнительными органами, система разделения и т.п. *Модель внешней среды* включает в себя: модель гравитационного

На верхнем уровне находится ядро ПМК, которое взаимодействует с базой данных (БД), хранящей исходные данные для моделирования. Заложенный в нем принцип объектно-ориентированного программирования позволяет легко модифицировать исходное ядро в зависимости от фазы

влияния Земли, модель гравитационного влияния Луны, модель гравитационного влияния Солнца, модель влияния давления солнечного света, модель атмосферы, модель представления случайных воздействий.

*Управляющий модуль* обеспечивает: вывод на экран многоканального меню, запуск расчёта, координацию работы всех компонентов ПМК, передачу данных между компонентами ПМК, вывод полученных результатов, запуск графического модуля. Управляющий модуль ПМК предлагается реализовать в виде многоуровневого приложения с элементами новизны, которые состоят в том, что отдельные элементы могут выполняться независимо и связываться между собой по стандартным протоколам обмена. В нашем случае предлагается использовать трехуровневую модель клиент-сервер, которая реализует пользовательский интерфейс и посылает запросы на выполнение нужных действий, сервера приложений, обеспечивающего синхронизацию работы всех компонентов системы и организации связей между ними, удаленного сервера баз данных, выполняющего запросы от сервера приложений и не работающий напрямую с клиентскими программами.

Такой подход позволяет разгрузить компьютеры клиентов, повысить отказоустойчивость и безопасность системы. При этом благодаря тому, что удастся выделить детали логики приложения в отдельные компоненты, клиентские программы могут обращаться к одним и тем же компонентам для решения различных задач, а серверы приложений снимают все проблемы по синхронизации их работы. Кроме того, в этом случае мы можем дальше «отойти» от проблем совместимости операционных систем (ОС), поскольку все составные части

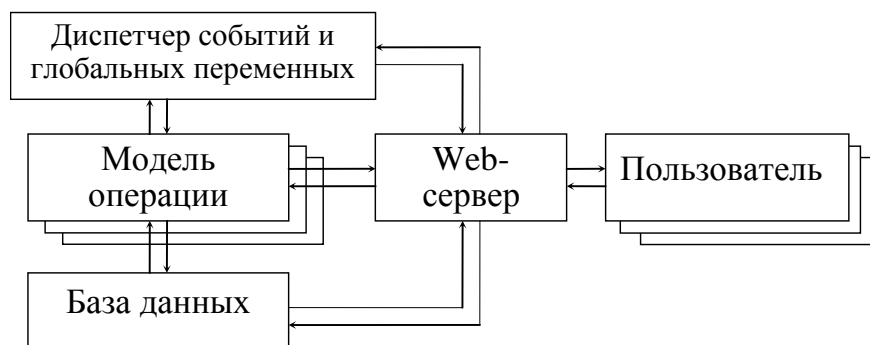


Рис. 2. Архитектура управляющего модуля

выполнены в соответствии со стандартами, поддерживаемыми различными ОС. Более подробно архитектура управляющего модуля представлена на рис. 2. Модель операций реализована в соответствии со стандартом языка программирования и представляет собой

информационную модель субъектов операции, отдельные элементы которых могут быть представлены дифференциальными уравнениями, алгебраическими зависимостями, функциями времени, таблицами и т.д.

*База данных* предназначена для информационного обеспечения комплекса. Для более эффективного взаимодействия как пользователя, так и программных модулей с БД предложены и реализованы: программные средства контроля доступа; программные средства организации связи с другими программными модулями ПМК и рабочий стол пользователя БД, реализующий объектно-ориентированный и процедурно-ориентированный интерфейсы.

Основой управляющего модуля является разработанный автором *диспетчер событий и глобальных переменных*, который реализует механизм межпрограммного

взаимодействия между отдельными модулями системы. Такой механизм необходим по нескольким причинам: невозможно заранее точно определить интерфейс всех библиотек программ; невозможно заранее определить степень изменений, которые библиотеки могут вносить в программный комплекс; невозможно заранее определить все события, происходящие в модели и реакции на них отдельных подсистем.

Программно он представляет собой автоматически подгружаемое приложение, доступное любому другому приложению в любом месте вычислительной среды в любой момент времени и выполняет следующие важные функции:

- интеллектуальное хранилище данных моделирования;
- обеспечение межпрограммного взаимодействия.

При таком подходе работа с объектом моделирования с точки зрения разработчика программного обеспечения состоит из нескольких этапов.

На первом этапе с использованием созданной автором системой команд (языком описания): определяется объектно-ориентированная иерархическую структуру объекта моделирования; формируются исходные и текущие данные для проведения моделирования; описываются методы обработки данных; организуется сценарий межпрограммного взаимодействия.

На втором этапе разработчики программных модулей интегрируют свои приложения для работы с Диспетчером. Процесс интеграции намеренно упрощен до степени вызова определенных процедур (не более десятка) из специальной библиотеки (интерфейсного модуля), основной функцией которой является обеспечение «быстрой» передачи данных между приложением и Диспетчером.

На третьем этапе проводится моделирование, состоящее из представления объекта моделирования с необходимыми программными модулями в памяти компьютера (компиляции проекта) и непосредственно самого моделирования с обеспечением возможностей «быстрого» обмена данными и событиями.

Таким образом, результатом третьей главы можно как считать методику создания, так и программную реализацию ядра ПМК, используя которые можно сформировать объектно-ориентированное представление моделируемого объекта и логику взаимодействия его подсистем. Отличительной особенностью такого подхода является разнесение операций по формированию программной структуры моделируемой системы и реализация конкретных модулей.

Иллюстрация практического применения разработанной методики по созданию моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций КА представлена в **четвертой главе**. С использованием ПМК решены следующие практические задачи:

- Проведена отработка средств выведения КА с промежуточной круговой на рабочую орбиту.
- Проведена отработка средств выведения КА на круговую орбиту.
- Проведена отработка средств проведения динамических операций на высокоэллиптических орбитах.
- Проведена отработка средств проведения динамических операций на круговой геостационарной орбите.



Обработка средств выведения КА с промежуточной круговой на рабочую орбиту проиллюстрирована на примере выведения КА системы ГЛОНАСС. Исследуется участок траектории разгонного блока «Фрегат» с низкой круговой орбиты высотой  $H \approx 180$  км до рабочей круговой орбиты с высотой 19135 км. На этом участке проводятся два включения двигательной установки разгонного блока. Первый активный участок формирует эллиптическую орбиту с высотой апогея равной высоте рабочей орбиты КА ГЛОНАСС, а второй переводит КА на почти круговую рабочую орбиту. На первом участке циклограмма выведения задана жестко, т.е. обратной связи по измерениям параметров траектории нет. На втором участке может использоваться как жесткая циклограмма выведения, так и обобщенный терминальный алгоритм управления. На рис. 3-5 представлен характер изменения по времени орбитальных параметров как при отсутствии возмущения, так и при наличии предельных возмущений.

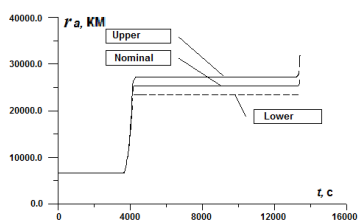


Рис. 3. Изменение радиуса апоцентра по времени.

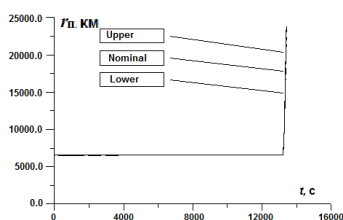


Рис. 4. Изменение радиуса перигея по времени

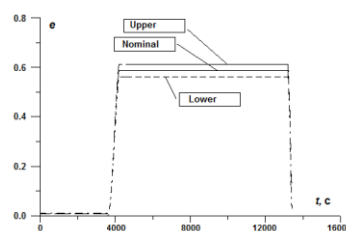


Рис. 5. Изменение эксцентриситета по времени

Ниже представлены разбросы конечных параметров орбит при использовании на втором участке как жесткой циклограммы выведения (см. рис. 6), так и обобщенного терминального алгоритма (см. рис. 7)

#### Жесткая циклограмма выведения

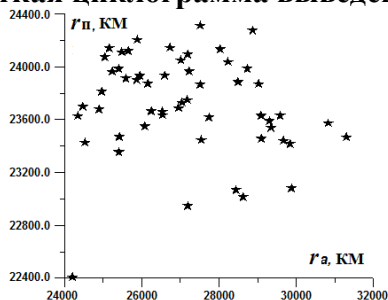


Рис. 6. Разбросы радиусов перигея и апоцентра при жесткой циклограмме выведения

#### Алгоритм терминального управления

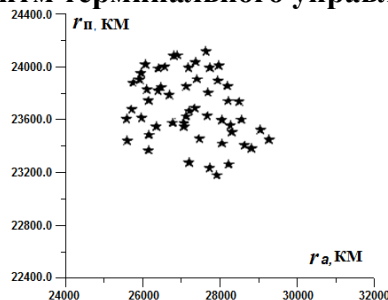


Рис. 7. Разбросы радиусов перигея и апоцентра при использовании терминального алгоритма

Обработка средств проведения динамических операций на высокоэллиптических орбитах связанных с изменением высоты перигея орбиты и периода обращения КА.

На рис. 8-11 показаны результаты изменения периода обращения и перигея орбиты с учетом и без учета проведения маневров:

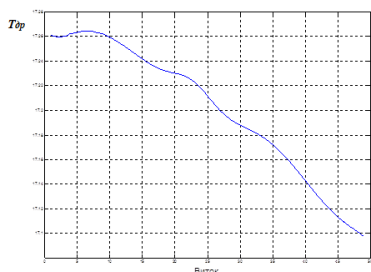


Рис. 8. Эволюция периода обращения

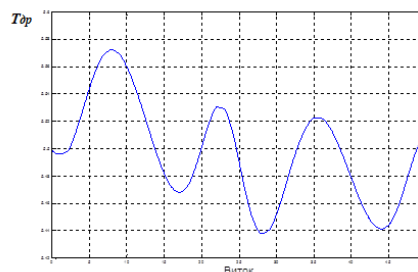


Рис. 9. Изменение периода обращения после проведения коррекции

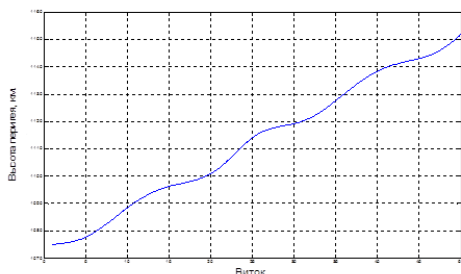


Рис. 10. Эволюция высоты перигея

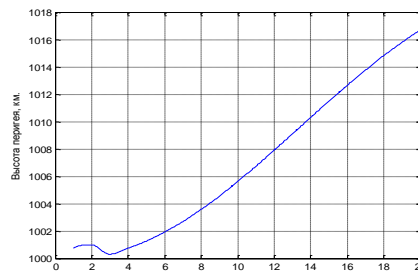


Рис. 11. Изменение высоты перигея после проведения коррекции

Отработка средств проведения динамических операций на круговой геостационарной орбите. Для их проведения имеется бортовая корректирующая установка малой тяги, причем вектор тяги ориентируется вдоль нормали к радиус-вектору и по бинормали. Коррекции средней долготы и наклона осуществляются независимо, причем алгоритм

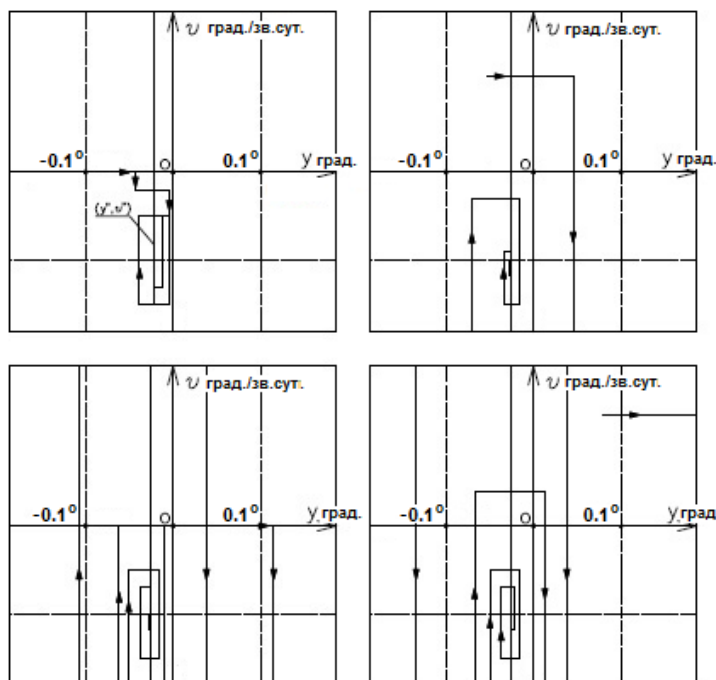


Рис. 12. Зависимость скорости дрейфа  $v$  от долготы восходящего узла  $u$ .

коррекции наклона – заранее выбранная программа компенсации суточного ухода. В этом случае процесс выполнения динамической операции представляет собой последовательность коррекций наклона, на фоне которых осуществляется коррекция средней долготы. Начало очередного сеанса коррекций средней долготы, их продолжительность рассчитывается в соответствии с алгоритмом, описанным в четвертой главе. Проведено моделирование процесса коррекций долготы восходящего узла спутника на стационарной орбите:  $r=42164\text{км}$ ,  $e=10^{-4}$ ,  $\Omega=30^\circ$ ,  $i=4^\circ$ ,  $\lambda_{mp}=45^\circ$ . На рис. 12 представлены фазовые портреты в координатах: долгота восходящего узла – скорость дрейфа для разных начальных условий и рассчитанной по формуле (10) точкой сходимости процесса управления  $(y^*, v^*)$ .

Таким образом, интерпретация полученных в четвертой главе результатов подтверждает правильность предложенных математических моделей и принципов построения программно-моделирующего комплекса для решения задач отработки безопасного проведения динамических операций КА на наиболее важных орбитах. А в силу открытости архитектуры перечень задач может быть еще более расширен.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В представленной работе сформулирована и решена актуальная научно-техническая задача, связанная с разработкой управления КА с учетом требований безопасности их проведения, разработкой и применением методики создания программно-моделирующего комплекса отработки средств проведения динамических операций КА, что позволило снизить затраты на их проведение за счет адаптации и совершенствования алгоритмов выполнения необходимых типовых операций. Показано, что решение исходной задачи сводится к ряду частных подзадач, последовательное решение которых позволяет обеспечить решение исходной.

Для решения упомянутых подзадач автором получены следующие результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью:

1. Сформированы требования к алгоритмическому и программному обеспечению средств отработки динамических операций.
2. Предложены математические модели бортовых систем КА и внешней среды.
3. Сформированы математические модели и синтезированы алгоритмы управления для проведения динамических операций для КА на высокоэллиптических и круговых орбитах. Предложено использовать классическое решения, модифицированный автором алгоритм проведения динамических операций на фоне решения задачи удержания долготы восходящего узла круговой и высокоэллиптической орбиты и терминальный алгоритм.
4. Определены новые принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса. С этой целью были созданы: методика формирования программно моделирующего комплекса для отработки алгоритмов и программ проведения динамических операций КА, методика разработки базы данных программно-моделирующего комплекса. По этим методикам можно сформировать объектно-ориентрованное представление моделируемого объекта и логику взаимодействия его подсистем. Отличительной особенностью такого подхода является разнесение операций по формированию программной структуры моделируемой системы и реализация конкретных модулей.
5. Создан программно-моделирующий комплекс для отработки алгоритмов и программ проведения динамических операций КА.

Для апробации полученных результатов проведено математическое моделирование динамических операций выведения и изменения орбиты КА, которое показало, что программно-моделирующий комплекс позволяет отрабатывать алгоритмы безопасного проведения следующих динамических операций:

1. Вывод КА на расчетную высокоэллиптическую и круговую орбиты, как штатными алгоритмами выведения, так и с помощью терминального метода.

2. Выполнение маневров на высокоэллиптической орбите.
3. Выполнение маневров на геостационарной орбите.

В заключении необходимо отметить, что использованные в работе подходы отличаются от известных повышенной открытостью и вычислительной эффективностью. Интерпретация полученных результатов подтверждает правильность предложенных математических моделей и принципов построения ПМК для решения поставленных в работе задач, перечень которых в силу открытости архитектуры ПМК быть еще более расширен, что в конечном итоге позволит использовать ПМК для отработки средств проведения динамических операций КА в различных космических системах на различных типах орбит.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Публикации в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:**

1. **Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.** Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов. Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, № 57.
2. **Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.** Программно-моделирующий комплекс для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов. Вестник компьютерных и информационных технологий, 2012, №9, Москва: Издательский дом «СПЕКТР», с. 7-12.
3. **Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.** Методика актуализации банков данных объектов космического назначения. Вестник Московского Авиационного Института, 2012, №4. Москва: Изд-во МАИ, с. 56-64.

**Другие публикации:**

4. **Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В.** Моделирующий комплекс для отработки средств безопасного проведения динамических операций КА. Тезисы докладов XVII международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 2012, Москва: Изд-во МАИ-ПРИНТ, с. 79.
5. **Старков А.В., Шмигирилов С.Ю.** Применение трёхмерной визуализации в задачах моделирования движения КА. Тезисы докладов XVII международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 2012, Москва: Изд-во МАИ-ПРИНТ, с. 61.
6. **Малышев В.В., Старков А.В.** Автоматизация процессов обработки данных в современных геоинформационных системах. Тезисы докладов XVI международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 2011, Москва: Изд-во МАИ-ПРИНТ, с. 96.
7. **Малышев В.В., Соколов А.А., Старков А.В.** Использование современных образовательных технологий для подготовки специалистов в области применения результатов космической деятельности. Тезисы докладов XVI международной конференции «Системный анализ, управление и навигация», 2011, Москва: Изд-во МАИ-ПРИНТ, с. 110.

Множительный центр МАИ (НИУ)  
Заказ от 09.11.2012 г. Тираж 100 экз.