

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА\*

А.В. Филатов<sup>1</sup>, И.С. Ткаченко<sup>2</sup>, А.А. Тюгашев<sup>2</sup>, Е.В. Сопченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «РКЦ «Прогресс», Самара, Россия

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва  
(национально исследовательский университет)

Математическое (программно-алгоритмическое) обеспечение является встроенным в систему управления движением и функционирует в нескольких режимах в зависимости от состояния МКА. Дано описание основных алгоритмов функционирования программного обеспечения опытно-технологического малого космического аппарата «АИСТ-2Д» (МКА).

Математическое (программно-алгоритмическое) обеспечение является неотъемлемой частью любого современного проекта в области ракетно-космической техники. Сбои и ошибки функционирования систем управления могут привести к критическим последствиям, вплоть до потери космического аппарата (КА). Как отмечают ведущие отечественные и зарубежные ученые, при длительных космических полетах основой выполнения широкого круга задач становятся вычислительные средства, имеющиеся на борту космического корабля [1]. Актуальным это является и для микро- и наноспутников, которые занимают все больший сегмент среди вновь создаваемых КА.

Система управления движением (СУД) [2] малого космического аппарата (МКА) «АИСТ-2Д» представляет собой совокупность бортовой аппаратуры (приборов, агрегатов, датчиков) и бортового программного обеспечения.

На СУД МКА возложены следующие задачи:

- успокоение МКА после отделения от средства выведения;
- ориентация МКА с заданной точностью в орбитальной системе координат (ОСК);
- ориентация с заданной точностью нормалей к поверхностям солнечных батарей в направлении на Солнце;
- сбор и формирование информации о своём функционировании и процессах ориентации МКА для передачи на Землю;
- выдача в бортовую систему контроля и управления (БСКУ) информации об угловом положении МКА по запросу из БСКУ;
- обеспечение режима работы СУД без выдачи управляющих моментов.

После отделения МКА от блока выведения или после неориентированного полета при включении комплекса исполнительных и чувствительных элементов (КИЧЭ) начинается режим гашения начальной угловой скорости. После уменьшения угловой скорости вращения КА до заданного значения автоматически начинается режим одноосной солнечной ориентации. В этом режиме СУД функционирует до момента задания из бортового комплекса управления по информационному каналу необходимости реализации режима трёхосной ориентации в орбитальной системе координат. Переключение между возможными режимами работы СУД осуществляется по заданию по информационному каналу соответствующих командных сообщений. Временная диаграмма функционирования СУД МКА представлена на рисунке 1.

В соответствии с назначением СУД можно выделить следующие подлежащие моделированию в математическом обеспечении МКА режимы:

- в режиме гашения начальной угловой скорости (РГУС);

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

- в режиме одноосной солнечной ориентации (РОСО);
- в режиме трехосной ориентации в ОСК (РТОО);
- в режиме проведения экспериментов СУД (ПЭСУД).

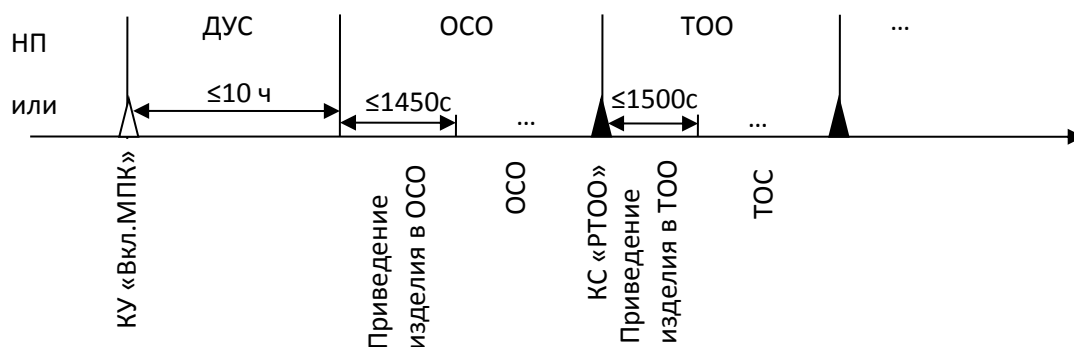


Рисунок 1 - Временная диаграмма работы СУД

**Режим гашения угловой скорости** начинается с момента включения УМВС и предназначен для гашения угловой скорости вращения МКА, полученной при отделении от средств выведения МКА или накопленной за время неориентированного полета.

При уменьшении кинетического момента аппарата до заданного значения (соответствует угловой скорости  $0,07^\circ/\text{с}$ ) происходит автоматический (без управляющих воздействий со стороны БСКУ) переход на стабилизацию с использованием в качестве исполнительных органов двигателей-маховиков. Далее на интервале времени 100 с осуществляется демпфирование угловой скорости с использованием двигателей-маховиков.

Режим ГУС завершается автоматическим переходом к режиму ОСО.

**Режим одноосной солнечной ориентации** предназначен для ориентации с заданной точностью нормалей к поверхностям солнечных батарей в направлении на Солнце.

Началом режима является либо автоматическое включение РОСО после завершения РГУС, либо включение РОСО в соответствии с заданным в УМВС из БСКУ по информационному каналу обмена командного сообщения требующего реализацию РОСО.

По включению РОСО осуществляется включение ОСД и проверка наличия Солнца в их поле зрения.

При наличии Солнца в текущем положении в поле зрения хотя бы одного из двух ОСД организуется программный поворот в СО (ППСО).

При отсутствии Солнца в исходном положении в полях зрения двух ОСД осуществляется поиск Солнца, для чего осуществляется вращение МКА.

Временная диаграмма поиска Солнца приведена на рисунке 2.

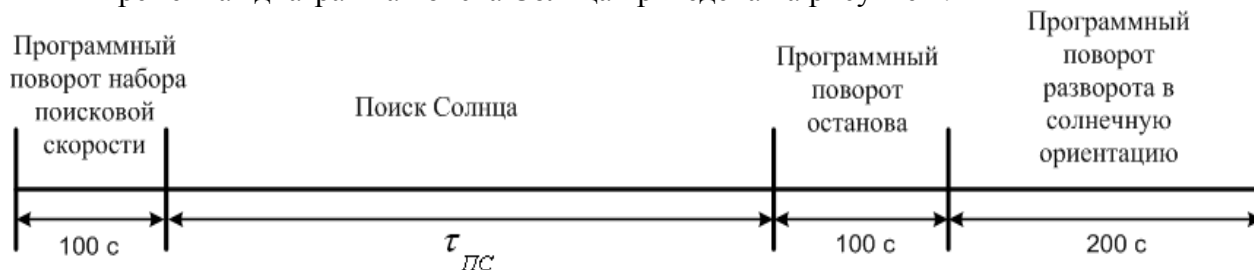


Рисунок 2 – Временная диаграмма приведения изделия в СО в случае организации поиска Солнца

Максимальное время поиска Солнца определяется поисковой скоростью и гарантированным просмотром всей сферы суммарным полем зрения ОСД и не превышает 600 с без учета времени тени.

Поисковая угловая скорость составляет 1 °/с.

После завершения ПП в СО начинается стабилизация МКА в СО, в этом случае осуществляется совмещение оси  $OY_{ССК}$  с вектором направления на Солнце в связанной системе координат (ССК).

Режим выполняется до поступления в универсальную многофункциональную вычислительную систему (УМВС) командного сообщения из БСКУ на смену режима работы.

**Режим трехосной ориентации в ОСК** предназначен для ориентации МКА с заданной точностью в орбитальной системе координат и отработки программы управления угловым движением (ПУУД), реализующей временной способ управления и задаваемой в УМВС по информационному каналу обмена из БСКУ.

Началом данного режима является командное сообщение в УМВС из БСКУ на реализацию РСУД.

По включению РТОО осуществляется включение "поиска" Земли (ПОЗ) и проверка наличия Земли в поле зрения МКА. При отсутствии Земли в исходном положении в поле зрения ПОЗ осуществляется поиск Земли вращением МКА.

Максимальное время поиска Земли определяется поисковой скоростью и гарантированным просмотром всей сферы полем зрения ПОЗ и не превышает 300 с. Поисковая угловая скорость составляет 1 °/с.

При появлении Земли в поле зрения ПОЗ последовательно организуется участок построения вертикали места и построения плоскости орбиты. По окончании участка построения плоскости орбиты МКА ориентирован в ОСК и готов к отработке ПУУД.

ПУУД может быть задана в одном из трёх видов:

- 1) массив, содержащий значение времени начала поворота и кватерниона определяющего положение ССК в ОСК на момент завершения поворота;
- 2) массив параметров  $(A_i, \omega_i, \varphi_i)$ , определяющих угловое положение ССК относительно ОСК по трем каналам. В этом варианте задания исходных данных ПУУД формируется СУД в соответствии с выражением:
- 3)  $\psi_i = A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)$ , где  $i$  = угол крена, рысканья, тангажа.
- 4) массив, содержащий значение полиномов аппроксимации - программу управления угловым движением по каждому каналу.

Режим выполняется до поступления в УМВС командного сообщения из БСКУ на смену режима работы.

**Режим проведения экспериментов СУД** предназначен для отработки бортовой аппаратуры СУД и экспериментальных алгоритмов работы СУД.

Началом данного режима является командное сообщение в УМВС из БСКУ на реализацию РПЭ СУД. БА СУД, используемая в этом режиме, и характеристики ориентации МКА определяются программой эксперимента.

Режим выполняется до поступления в УМВС командного сообщения из БСКУ на смену режима работы.

Для эффективной реализации всех режимов функционирования СУД разработка математического обеспечения изделия «АИСТ-2Д» проводится в несколько этапов, а именно:

- разработка технических описаний алгоритмов;
- программирование модулей математического обеспечения;
- автономная отладка;
- совместная отладка программ на эмуляторе наземного комплекса отладки (НКО);
- комплексная отладка программ на НКО.

Все алгоритмы БПО СУД можно разделить на несколько основных категорий:

системные алгоритмы:

- планирование работы СУД;
- накопление и выдача ТМИ СУД в БСКУ;

– формирование контрольной информации об угловом движении КА;  
алгоритмы режимов работы СУД:

- приведение МКА в ориентированное на Солнце положение;
- приведение МКА в ориентированное в ОСК положение;
- управление СУД при неисправностях;
- проведение экспериментов СУД;

алгоритмы управления приборами:

- управление волоконно-оптическими гироскопами;
- управление двигателями-маховиками;
- управление звездными датчиками;
- управление магнитными исполнительными органами;
- управление магнитометрами;
- управление оптическими солнечными датчиками;
- управление приборами ориентации по Земле;
- съем информации с оптических датчиков;

алгоритмы канала стабилизации:

- управление движением МКА с использованием двигателей-маховиков;
- сброс кинетического момента средствами МИО;
- формирование программного движения в программном повороте;
- расчет аргументов управления;
- формирование ППУД в ОСК, соответствующей ГОСК;
- алгоритмы определения ориентации;
- определение ориентации МКА в ОСК по информации ПОЗ;
- приведение в солнечную ориентацию;

алгоритмы контроля:

- управление резервами БА СУД и модулями УМВС при неисправностях;
- контроль стабилизации с использованием двигателей-маховиков;
- контроль магнитной системы;

алгоритмы проведения экспериментов:

- определение ориентации по измерениям угловой скорости и астроизмерениям;
- определение ориентации МКА в ИСК по информации ЗД.

### **Заключение**

Таким образом, математическое обеспечение СУД МКА обеспечивает:

- 1) успокоение МКА после отделения от средств выведения за время не более 3 час при приращении угловой скорости МКА от срабатывания УО не более  $7^\circ/\text{с}$  и 2 час 15 мин при приращении угловой скорости МКА от срабатывания УО не более  $3^\circ/\text{с}$ ;
- 2) ориентацию МКА в ОСК с погрешностью не превышающей ( $P = 0,96$ ):
  - а) по угловому положению
    - не хуже  $30'$  (без использования навигационной информации);
    - не хуже  $30'$  по каналам крена и тангажа и  $10'$  по каналу рыскания (с использованием навигационной информации);
  - б) по угловой скорости не более  $0,005^\circ/\text{с}$ ;
- 3) одноосную ориентацию нормалей к поверхностям солнечных батарей в направлении на Солнце с погрешностью, не превышающей ( $P = 0,96$ ):
  - по угловому положению –  $3^\circ$ ;
  - по угловой скорости -  $0,5^\circ/\text{с}$  по всем каналам;
- 4) максимальные угловые скорости МКА в программном повороте –  $1^\circ/\text{с}$ ;
- 5) максимальные угловые ускорения МКА в программном повороте  $0,029^\circ/\text{с}^2$ ;
- 6) переход из ориентации в ОСК к ориентации на Солнце или из ориентации на Солнце к ориентации в ОСК за время:

- 10 минут (при использовании параметров, определяющих положение центра масс);
- 25 минут (без использования навигационной информации).

7) достижение максимальной точности ориентации в ОСК за время не более 35мин от момента завершения перевода изделия в ориентированное в ОСК положение.

Разработка малого космического аппарата для решения задач дистанционного зондирования Земли, в том числе разработка программно-алгоритмического обеспечения, ведется в рамках комплексного проекта ОАО «РКЦ «Прогресс» и СГАУ «Создание высокотехнологичного производства маломассогабаритных космических аппаратов наблюдения с использованием гиперспектральной аппаратуры в интересах социально-экономического развития России и международного сотрудничества», реализуемого по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. №218.

#### **Литература**

1. Авиастроение. Том 6 (Итоги науки и техники, ВИНТИ АН СССР). М., 1998.
2. Н.Н.Севастьянов, В.Н.Бранец, В.А.Панченко, Н.В.Казинский, Т.В.Кондранин, С.С.Негодяев. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли. Труды МФТИ. 2009. Том 1, №3. УДК 629.7.01