

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
ПРИВЕДЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ИСЗ  
К ЗАДАННОЙ  
С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

САМАРА 1994

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С.П.КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИВЕДЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ  
ИСЗ К ЗАДАННОЙ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Методические указания к лабораторной работе

С а м а р а 1 9 9 4

Составители: С.А. Ишков, Т.Ю. Чекина

УДК 625(075)

Исследование динамики приведения ориентации ИСЗ к заданной с учетом запаздывания: Метод. указания / Самар. аэрокосм. ун-т.; Сост. С.А. Ишков, Т.Ю. Чекина. Самара 1994. 16 с.

Методические указания содержат рекомендации по выполнению лабораторной работы по курсу "Динамика полета ЛА", которая посвящена изучению динамики движения КА относительно центра масс с газореактивной системой ориентации при наличии запаздывания в исполнительных органах.

Предназначены для студентов, изучающих динамику полета космических аппаратов. Составлены на кафедре "Динамика полета и системы управления".

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Жоролева

Рецензенты: Е.И. Давыдов, А.И. Мантуров

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИВЕДЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ  
ИСЗ К ЗАДАННОЙ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Цель работы: Изучение динамики процесса приведения ориентации ИСЗ к заданной с учетом запаздывания и подбор коэффициентов усиления; исследование процесса поддержания ориентации ИСЗ с помощью системы автоматического моделирования СИАМ на ПЭВМ.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомление с физической постановкой задачи. Составление математической модели движения ИСЗ относительно центра масс.

2. Выбор исходных данных согласно коду варианта задания и расчет коэффициентов математической модели движения.

3. Проведение моделирования движения ИСЗ и подбор коэффициента демпфирования при различных запаздываниях в системе; печатание переходных процессов и их анализ.

4. Подготовка отчета по лабораторной работе на стандартном бланке.

Продолжительность лабораторной работы составляет 4 ч : первые два часа отводятся на выполнение пунктов 1-2, вторые два часа - на выполнение пунктов 3-4.

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Рассматривается процесс одноосной ориентации КА с газореактивной системой исполнительных органов в режиме приведения ориентации к заданной. Этот режим начинается после того, как ориентир найден, вращение поиска заторможено и позиционный датчик вырабатывает сигналы, говорящие об угловом отклонении соответствующей оси КА от направления, определяемого ориентиром.

Движение КА относительно центра масс при некоторых допущениях описывается динамическими уравнениями Эйлера

$$\ddot{\varphi} = \bar{M}_a \Phi_\tau[U(t)] + \bar{M}_D, \quad \bar{M}_a = \frac{M_a}{I_a}, \quad \bar{M}_D = \frac{M_D}{I_a}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  - угол ориентации КА относительно рассматриваемой оси,

$\bar{M}_a, \bar{M}_D$  - приведенные управляющий и возмущающий моменты,

$M_a, M_D$  - управляющий и возмущающий моменты,

$I_a$  - момент инерции КА относительно оси, перпендикулярной оси ориентации,

$\Phi_\tau[U(t)]$  - функция управления,

$U(t)$  - аргумент управляющей функции.

Индекс  $\tau$  учитывает временное запаздывание исполнительных органов управления системы ориентации:

$$\Phi_\tau[U(t)] = \Phi[U(t-\tau)].$$

В системах ориентации с газореактивными исполнительными органами функция управления формируется, как правило, по сигналам с датчиков угла и угловой скорости и имеет релейный характер:

$$\begin{cases}
 -1 & \text{при } U_{\text{ДУ}} + U_{\text{ДУС}} \geq U_{\text{ср}}, \\
 0 & \text{при } |U_{\text{ДУ}} + U_{\text{ДУС}}| < U_{\text{ср}}, \\
 1 & \text{при } U_{\text{ДУ}} + U_{\text{ДУС}} \leq -U_{\text{ср}},
 \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{\text{ср}}$  - пороговое значение зоны нечувствительности вычислительного устройства,

$U_{\text{ДУ}}$  - выходное напряжение датчика угла,

$U_{\text{ДУС}}$  - выходное напряжение датчика угловой скорости.

На рис. 1 показан вид нелинейной характеристики вычислительного устройства (релейный усилитель).

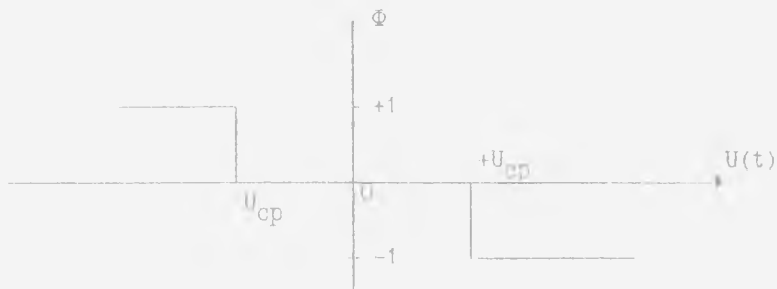


Рис. 1

Общая структурная схема одноосной системы ориентации представлена на рис. 2.

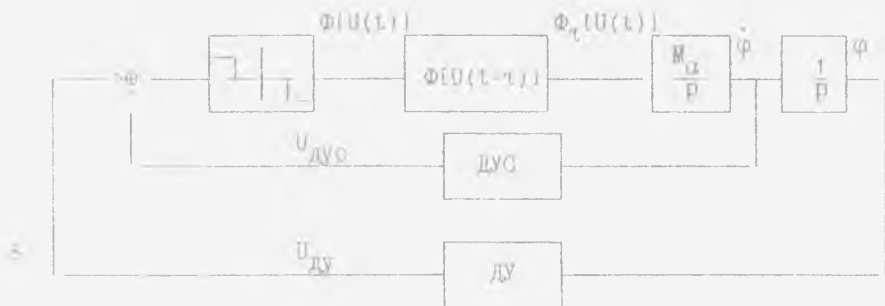


Рис. 2

Пусть  $M_D = 0$ . Тогда уравнение фазовых траекторий на плоскости  $\varphi - \dot{\varphi}$  запишется в виде

$$\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0 = 2M_A \Phi_\tau[U(t)](\varphi - \varphi_0), \quad (3)$$

где  $\varphi_0$ ,  $\dot{\varphi}_0$  - начальные значения угла ориентации и угловой скорости соответственно.

На тех участках фазовой плоскости, где  $\Phi_\tau[U(t)] = +1$ , фазовые траектории являются параболами, т.е.

$$\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_0 = \pm 2M_A(\varphi - \varphi_0).$$

Внутри зоны нечувствительности, где  $\Phi_\tau[U(t)] = 0$ , фазовые траектории являются прямыми, параллельными оси  $O\varphi$ .

Рассмотрим линейные характеристики датчиков угла и угловой скорости (рис.3).

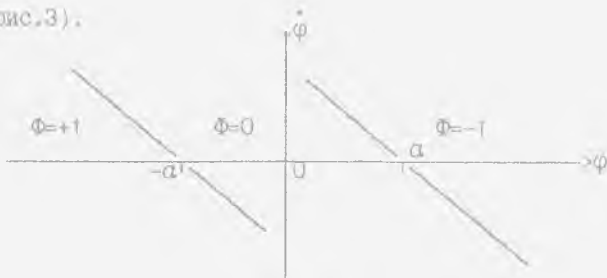


Рис. 3

$$U_{ду} = K_0 \varphi, \quad U_{дус} = K \dot{\varphi},$$

где  $K_0$ ,  $K$  - постоянные коэффициенты усиления; размерность коэффициентов  $K_0$ , В/рад;  $K$ , В/рад/с.

Таким образом, вычислительное устройство будет формировать сигнал вида

$$U(t) = U_{ду} + U_{дус} = K_0 \varphi + K \dot{\varphi}.$$

В связи с этим вся фазовая плоскость разбивается на три области (рис. 3), на которых функция управления принимает значения с помощью двух линий переключения:

$$L_1 \rightarrow K_0 \varphi + K \dot{\varphi} = U_{\text{ср}},$$

$$L_2 \rightarrow K_0 \varphi + K \dot{\varphi} = -U_{\text{ср}}.$$

Точки пересечения линий  $L_1$  и  $L_2$  с осью абсцисс имеют координаты  $a = \pm U_{\text{ср}}/K_0$ .

Если система обладает временным запаздыванием, то вид разбиения фазовой плоскости системы изменится, изменятся и уравнения линий переключения (рис. 4).

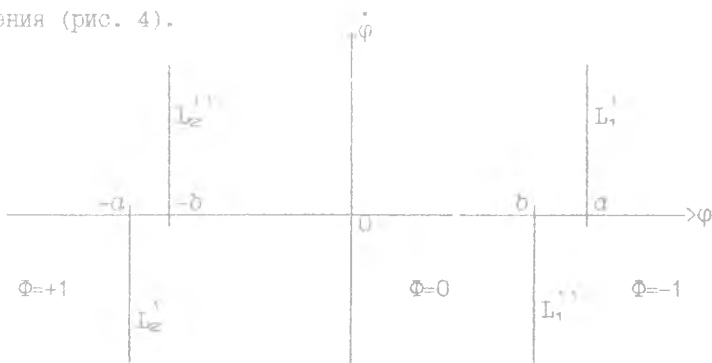


Рис. 4

Уравнения линий переключения принимают вид

$$L_1 \rightarrow K_0 \varphi + \dot{\varphi}(K - K_0 \tau_1) = U_{\text{ср}},$$

$$L_1' \rightarrow K_0 \varphi + \dot{\varphi}(K - K_0 \tau_2) = U_{\text{ср}} - KM_a \tau_2 + \frac{K_0 M_a}{2} \tau_2^2, \quad (4)$$

$$L_2 \rightarrow K_0 \varphi + \dot{\varphi}(K - K_0 \tau_1) = -U_{\text{ср}},$$

$$L_2' \rightarrow K_0 \varphi + \dot{\varphi}(K - K_0 \tau_2) = -U_{\text{ср}} + KM_a \tau_2 - \frac{K_0 M_a}{2} \tau_2^2.$$

Точки пересечения линий переключения с осью абсцисс имеют координаты

$$a = \pm \frac{U_{\text{ср}}}{K}, \quad b = \pm \frac{U_{\text{ср}} - KM_a \tau_2 + K_0 \frac{M_a \tau_2^2}{2}}{K_0},$$



где  $\tau_1$  — временное запаздывание при включении системы,  
 $\tau_2$  — временное запаздывание при выключении системы.

Рассмотрим вопрос об устойчивости процесса ориентации без учета запаздывания. Отобразим процесс управления на фазовой плоскости (рис. 5).

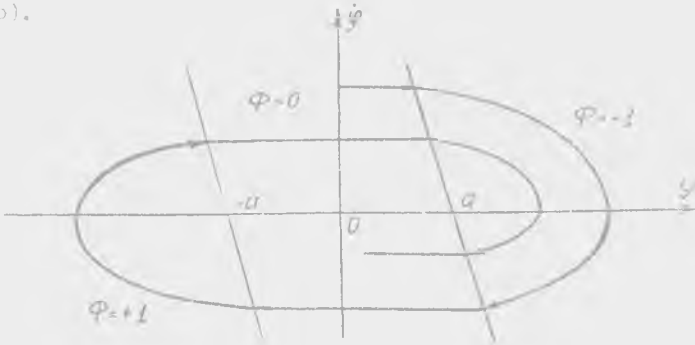


Рис. 5

Нетрудно видеть, что наклон линий переключения обеспечивает искусственное демпфирование колебаний в системе. Если линии переключения не будут иметь наклона, то при наличии запаздывания в системе возможна раскачка.

В соответствии с условием (3), уравнения для линий переключения  $L_1, L_2$  ( см. рис. 3 ) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} L_1: \dot{\varphi} &= -\frac{K}{K_0} \varphi + \frac{U_{ср}}{K_0}, \\ L_2: \dot{\varphi} &= -\frac{K}{K_0} \varphi + \frac{U_{ср}}{K_0}. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметр  $\frac{K}{K_0}$  называется коэффициентом демпфирования.

Анализ уравнений (6) и характер движения на фазовой плоскости (см. рис. 5) показывает, что положительный коэффициент демпфирования соответствует отрицательному наклону линий переключения и обеспечивает устойчивость процесса приведения ориентации к заданной.

При отрицательном коэффициенте демпфирования линия переключения будет иметь положительный наклон, что неизбежно приведет к раскачке и потери устойчивости.

При коэффициенте демпфирования равном нулю демпфирование колебаний будет отсутствовать, что также является недопустимым.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИВЕДЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ К ЗАДАННОЙ НА ПЭВМ

Представим уравнения динамики вращательного движения (1) в нормальной форме Коши:

$$\frac{d\omega}{dt} = \omega, \quad \frac{d\omega}{dt} = M_{\alpha} \Phi_{\tau}(U(t)), \quad (7)$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения КА.

Для моделирования на ПЭВМ данной системы уравнений необходимо разработать структурную схему с использованием типовых блоков системы автоматического моделирования СИАМ.

Общий вид структурной схемы моделирования представлен на рис.6.

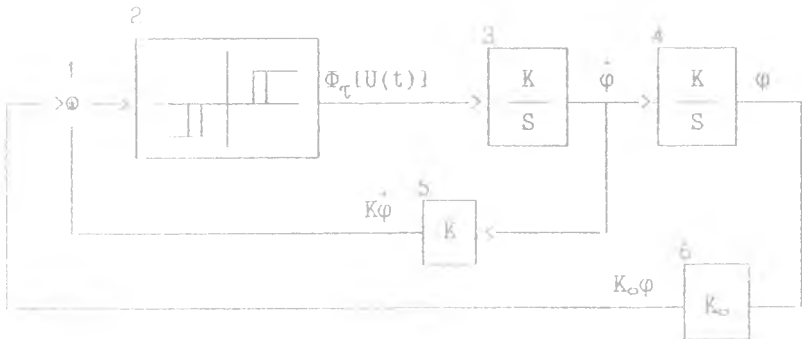


Рис. 6

Блок 2 структурной схемы моделирует функцию  $\Phi(U(t))$ , блоки 3 и 4 интегрируют значение углового ускорения и скорости. Усилители 5

и 6 формируют входной сигнал для функции  $\Phi(t)$ ]; в 5 блоке задается коэффициент  $K$ , в 6 - коэффициент  $K_0$ .

Для моделирования запаздывания в системе необходимо задать значения параметров  $U_1, U_2, U_3, U_4$  в блоке 2.

В соответствии с изменением положения линий переключения на фазовой плоскости с учетом запаздывания значения искомых параметров могут быть определены следующим образом (см. 5):

$$U_4 = U_1 - \frac{\alpha}{K}, \quad U_3 = U_2 = \frac{\alpha}{K_0} \left( KM_a \tau + \frac{KM_a \tau^2}{2} \right), \quad (8)$$

где  $\alpha$  - размер зоны нечувствительности,

$\tau$  - запаздывание в системе.

(Будем полагать, что запаздывание на выключение и включение одинаково,  $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ ).

Запаздывание в системе приведет к изменению коэффициента  $K$ . В соответствии с уравнением линий переключения значение  $K^*$  с учетом запаздывания можно определить так:

$$K^* = K - K_0 \tau. \quad (9)$$

### 3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИАМ

Моделирование задачи проводится с помощью системы автоматического моделирования СИАМ на ПЭВМ на диске F в каталоге СИАМ.

Вызов структурной схемы моделирования, представленной на рис. 6, осуществляется вводом команды

СИАМ-S.EXE STABILIS.SIS

в командной строке.

После этого на экране дисплея появляется структурная схема моде-

лирования задачи. Командой F7-Мод меню перевести задачу в режим моделирования, при этом в левом нижнем углу экрана дисплея появляется информация об используемом методе численного интегрирования. Командой F2-Мет меню необходимо выбрать метод и параметры численного интегрирования. В этом случае экран полностью очищается и в нем появляется текст, поясняющий последовательность действий для выбора метода и установки параметров. При моделировании могут использоваться следующие методы численного интегрирования:

- метод Кутты-Мерсона 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага интегрирования;
- метод Фильберга 5-го порядка точности с автоматическим выбором шага интегрирования;
- метод Рунге - Кутта 4-го порядка с фиксированным шагом;
- метод Эйлера 2-го порядка с фиксированным шагом.

Процесс интегрирования характеризуется следующими параметрами:

- $t_0$  - начальное значение модельного времени;
- $h$  - шаг интегрирования (для методов с фиксированным шагом);
- $err$  - допустимая относительная локальная погрешность (для методов с автоматическим выбором шага).

Для исследуемой задачи необходимо выбрать метод Рунге-Кутта 4-го порядка и задать следующие параметры интегрирования:

Ошб : 0.001;

t0 : 0.0;

tk : 120.

После установки требуемых параметров нажать клавишу "ENTER".

Задание параметров блоков моделирования проводится в режиме

редактирования. Режим редактирования устанавливается командой F4-Ред меню. Выбор редактируемого блока осуществляется переводом выделенного миганием блока на структурной схеме с помощью клавиш перемещения курсора и нажатием клавиши ENTER. При этом экран полностью очищается и в нем появляется текст, описывающий алгоритм активного блока и смысл используемых в нем параметров. Параметры вместе с принятыми в системе их значениями по умолчанию выводятся в нижней части экрана. Активный параметр (по аналогии с активным блоком) выделяется цветным окном. Клавишами перевода курсора вверх/вниз можно выделить нужный параметр, после чего цифровыми клавишами ввести его новое значение. При вводе параметров используется общий формат чисел вида

$$*X.XXXXXXe*XX,$$

где X - любая цифра,

\* - знак плюс или минус (отсутствие знака означает плюс),

e (или E) символ десятичного основания.

Положение десятичной точки произвольное. При вводе целочисленного значения точку можно опустить. Если десятичная точка указана, слева и справа от нее должно быть хотя бы по одной цифре. Экспоненциальная часть числа "e\*XX" или "E\*XX" также может опускаться. Она имеет смысл "умножить на 10 в степени XX". Например,  $3.14e-2$  - читается "3,14 умножить на 10 в степени минус 2". Если в числе указан символ десятичного основания "e" ("E"), справа от него должна быть хотя бы одна цифра десятичного порядка. Ошибочно введенный символ можно удалить клавишей "Забой слева" (клавиша с обозначенной на ней левой стрелкой - располагается справа в верхнем ряду основной зоны клавиатуры над клавишей "ENTER").

После установки параметров нужным образом необходимо нажать клавишу "ENTER". В этому сигналу СИАМ возвращает экран в рабочий режим.

После выхода из процедуры редактирования параметров СИАМ переходит в подрежим моделирования, давая пользователю возможность редактирования параметров других блоков.

Для отображения графиков переходных процессов любых блоков структурной схемы моделирования в нижней части экрана можно создать два небольших окна с помощью команды F5-окно меню. При нажатии на эту клавишу в верхней строке меню загорается индикатор "Окно" и один из блоков структуры выделяется мигающим изображением. Клавишами перевода курсора влево и вправо можно перемещать мигающее изображение к соседним блокам. При нажатии на клавишу "ENTER" в нижней части экрана появляется окно для выводов графиков, в его нижнем углу появляется цифра "1" и такая же цифра в правом верхнем углу пиктограммы выбранного блока на структурной схеме. Для данной задачи в окнах нижней части экрана следует отобразить графики переходных процессов блоков 3 и 4.

После задания параметров структурной схемы моделирования перейти к моделированию задачи с помощью команды F3-Счет меню. В нижней части экрана появляются графики переходных процессов блоков 3 и 4. Время моделирования задачи можно продолжить при необходимости (если переходный процесс не закончился) вводом команды F9 При меню до окончания переходного процесса в системе, который наблюдается по графикам блоков 3 и 4 в окнах нижней части экрана дисплея. Изменить масштабы графиков в окнах можно вводом команды F8-Меш меню.

Получить большой график переходного процесса блока 3 на экране можно командой F6-Грф меню. С помощью клавиш перемещения курсора выделить миганием блок 3 и нажать клавишу "ENTER", при этом на экране появится график переходного процесса блока 3. Аналогичным образом можно получить большой график переходного процесса блока 4. Убрать графики с экрана можно командой "ESC". Для получения фазовых траекторий необходимо в режиме F6-Грф с помощью клавиш перемещения курсора выделить миганием блок 3 и нажать на клавиатуре Y, а затем при выделенном миганием блоке 4 нажать на клавиатуре X, при этом на экране дисплея появится изображение фазовой траектории в координатах (Y-φ, X-φ).

Вывод графиков с экрана дисплея на печать осуществляется вводом команды "Shift+Print Screen+Enter". При этом на экране дисплея появляется диалоговое окно, содержащее следующий запрос:

Вывод копии графического экрана (ENTER- сменить, ESC - отказаться от вывода)
Начать вывод
Инверсная копия (белый фон)
Вывод на принтер
Отступ бумаги слева: 0

Одна из опций запроса выделяется указателем (негативным изображением). Клавишами смещения курсора вверх-вниз сместить указатель к той или иной опции. Нажатие на клавишу, "ENTER" инициирует вывод копии, если выделена опция "Начать вывод" или изменит значение опции - в остальных случаях. Нажатие на "Esc" отменяет копирование экрана.

#### 4. ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

Исследование проводят в рамках трех задач. В качестве номинального задается следующее значение управляющего момента:

$M_0 = 0,005 \frac{1}{s^2}$ . Размер зоны нечувствительности принимается равным  $\alpha = 2^\circ$ .

##### Задача 1

Исследуется динамика движения КА относительно центра масс с зоной нечувствительности с учетом запаздывания на включение и выключение исполнительных органов равным  $\tau_1 = 0,2c$ .

Проводится исследование поведения системы при нулевом коэффициенте демпфирования  $K=0$  и при  $0 < K < 1$ . На экране отображается фазовая траектория и дается оценка сходимости процесса. Определяется коэффициент демпфирования, при котором наблюдается на фазовой плоскости устойчивый предельный цикл. Анализируется влияние на процесс величины управляющего момента.

##### Задача 2

Исследуется динамика движения КА относительно центра масс с зоной нечувствительности с учетом запаздывания на включение и выключение исполнительных органов равным  $\tau_1 = 0,5c$ . Проводятся исследования, аналогичные исследованиям в задаче 1.

##### Задача 3

Рассматривается вариант, когда отсутствует зона нечувствительности в работе исполнительных органов. Исследования проводятся для двух вариантов запаздывания в системе:  $\tau_1 = 0,2c$  и  $\tau_1 = 0,5c$ . Коэффициент демпфирования устанавливается соответствующим устойчивому предельному циклу. В процессе моделирования анализируется характер фазовых траекторий. Вычисляется амплитуда колебаний по углу и угловой скорости и сравнивается с вариантом,



когда имеется зона нечувствительности (задача 1 и задача 2).

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткая формулировка задачи исследования.
2. Структурная схема системы управления.
3. Схема моделирования на ПЭВМ.
4. Расчет коэффициентов структурной схемы.
5. Экспериментальные фазовые траектории.
6. Выводы по работе с оценкой влияния запаздывания и коэффициента демпфирования на сходимость процесса приведения ориентации к заданной.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Математическая модель движения КА относительно центра масс с нелинейной функцией управления.
2. Элементы структурной схемы одноосной системы ориентации.
3. Линии переключения на фазовой плоскости с учетом запаздывания.
4. Понятие коэффициента демпфирования.
5. Построение структурной схемы моделирования на ПЭВМ.
6. Моделирование на ПЭВМ запаздывания на включение и выключение исполнительных органов.
7. Влияние коэффициента демпфирования на сходимость процесса приведения ориентации к заданной.
8. Влияние запаздывания на устойчивость процесса поддержания заданной ориентации.
9. Влияние зоны нечувствительности на характер траекторий на фазовой плоскости.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРИВЕДЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ  
ИСЗ К ЗАДАННОЙ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Составители: И ш к о в Сергей Алексеевич,  
Ч е к и н а Татьяна Юрьевна

Редактор Л.Я. Чегодаева  
Техн. редактор Г.А. Усачева

Подписано в печать 21.10.94 г . Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93 . Усл.кр.-отт. 1,0 . Уч.-изд. л. 1,0 .

Тираж 200 экз. Заказ 428. Арт. С-28мр/94.

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева.

443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

ИПО Самарского аэрокосмического университета.

443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.