

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

**И С С Л Е Д О В А Н И Е**  
**СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛА**  
**С НЕЛИНЕЙНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторной работе № 6  
для студентов

КУЙБЫШЕВ 1989

Авторы-составители: В. Д. Закаблукровский  
Т. Ю. Чекина

УДК 29.7.05

*Исследование системы стабилизации ЛА с нелинейным исполнительным элементом: Метод. указания /Сост. В. Д. Закаблукровский, Т. Ю. Чекина; Куйб. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 12 с.*

В данных указаниях содержится методика выполнения лабораторной работы по курсу «Системы управления ЛА», связанной с аналоговым моделированием и исследованием нелинейной системы стабилизации ЛА.

Работа предназначена для студентов, изучающих курсы «Системы управления ЛА» и «Основы теории автоматического управления»

Рецензенты: к. т. н. В. В. Дмитриев,  
к. т. н. доцент Е. И. Давыдов

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Для исполнительных элементов систем угловой стабилизации ЛА характерна нелинейная зависимость величины управляющего момента, создаваемого исполнительным элементом и действующего на ЛА, от управляющего сигнала системы стабилизации, поступающего на исполнительный элемент. Такие нелинейные зависимости обусловлены наличием упоров аэродинамических рулей, поворотных газовых рулевых или основных двигателей с соответствующими приводами.

Для КЛА нелинейность характеристик исполнительных элементов вызвана особенностью работы систем стабилизации в условиях длительного существования КЛА и относительно малых внешних возмущений. Система стабилизации включает исполнительные элементы в работу периодически при накоплении достаточно большой ошибки по угловым координатам КЛА или при его переориентации, а также во время коррекции орбиты КЛА, т. е. при включении мощного ЖРД. В качестве исполнительных элементов системы стабилизации КЛА используются неподвижные попарно расположенные на КЛА двигатели постоянной тяги, при работе которых к КЛА прикладывается постоянный управляющий момент. Стабилизация углового положения КЛА обеспечивается за счет периодического включения и выключения соответствующих пар двигателей.

Наличие существенных нелинейных зависимостей усложняет аналитический анализ нелинейных систем управления, приводит к необходимости упрощения их математических моделей при использовании методов фазовых траекторий или гармонической линеаризации. Исследование таких нелинейных систем, выбор их конструктивных параметров целесообразно производить на АВМ. Использование специальных нелинейных блоков АВМ или специальных диодных элементов позволяет достаточно точно моделировать нелинейные зависимости, выполнить проектирование и анализ системы методом аналогового моделирования.

Выполняя работу, студенты знакомятся с методикой аналогового моделирования типовых нелинейных зависимостей,

более глубоко усваивают метод фазовых траекторий. В процессе выполнения лабораторной работы проводится исследование на АВМ нелинейной системы стабилизации ЛА. По экспериментальным фазовым траекториям оценивается влияние параметров системы на ее качественные показатели.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется в следующей последовательности:

ознакомление с основными функциональными элементами системы угловой стабилизации ЛА и принципом ее работы;

ознакомление с методикой аналогового моделирования типовых нелинейных зависимостей;

подготовка аналоговой схемы моделирования нелинейной системы угловой стабилизации ЛА на АВМ МП-7 или на АБК-31 (по указанию преподавателя);

проведение исследования системы стабилизации ЛА методом фазовых траекторий, оценка влияния параметров системы на ее качественные показатели;

оформление отчета.

## СИСТЕМА УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛА

Система угловой стабилизации ЛА состоит из следующих функционально необходимых элементов:

датчика углового положения ЛА (ДУ) — свободного трехстепенного гироскопа;

усилителя-преобразователя (УП);

исполнительного элемента (ИЭ);

летательного аппарата.

С целью улучшения динамических свойств системы стабилизации в нее вводится датчик угловой скорости вращения ЛА (ДУС).

Функциональная схема системы стабилизации углового положения ЛА по одному из каналов, т. е. относительно одной из осей, приведена на рис. 1.

Требуемое, заданное угловое положение ЛА задается в виде напряжения  $U_{\text{зад}}$  на первый элемент сравнения. Действительное угловое положение ЛА измеряется датчиком углового положения. Напряжение  $U_{\text{д}}$  с ДУ подается также на первый элемент сравнения. Если действительное угловое положение ЛА отличается от заданного, то на выходе первого элемента сравнения будет напряжение соответствующего знака и величины.

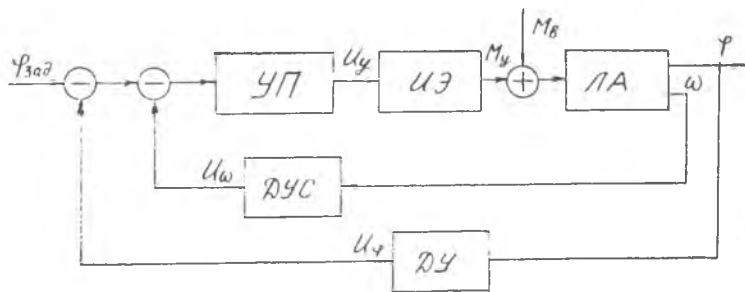


Рис. 1. Функциональная схема системы угловой стабилизации ЛА

Напряжение с датчика угловой скорости  $U_{\omega}$ , характеризующее угловую скорость вращения ЛА, подается на второй элемент сравнения.

Управляющее напряжение  $U_y$  управляет работой исполнительного элемента системы стабилизации, который в зависимости от знака и величины управляющего напряжения прикладывает к ЛА управляющий момент. Под действием управляющего момента ЛА принимает требуемое угловое положение.

Введение с помощью датчика угловой скорости дополнительной обратной связи по скорости изменения регулируемого параметра (углового положения ЛА) обеспечивает устойчивую работу системы угловой стабилизации, уменьшает колебательность переходного процесса системы.

Характер зависимости управляющего момента от управляющего напряжения  $M_y(U_y)$  определяется конструктивным исполнением и условиями работы исполнительного элемента. Для КЛА зависимость  $M_y(U_y)$  имеет нелинейный (релейный) характер. Характерный вид этой зависимости с зоной нечувствительности без учета инерционного запаздывания представлен на рис. 2.

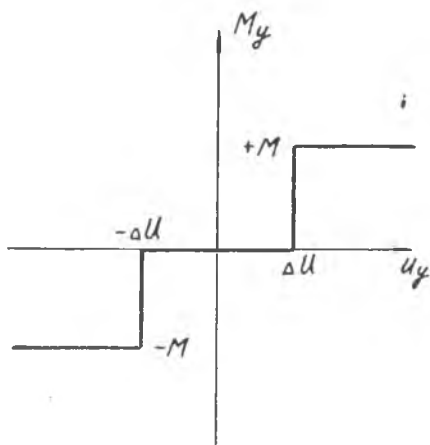


Рис. 2. Зависимость управляющего момента исполнительного элемента от управляющего сигнала

## АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КЛА С НЕЛИНЕЙНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

При аналоговом моделировании системы стабилизации КЛА датчики углового положения и угловой скорости вращения могут рассматриваться, как безынерционные звенья с коэффициентами передачи соответственно  $K_1$ ,  $K_2$ . Принимаем следующие значения этих коэффициентов:

$$K_1 = 0,5 \text{ В/град};$$

$$K_2 = 0,5 \text{ В/град/с.}$$

Уравнение углового движения КЛА относительно оси стабилизации имеет следующий вид:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_y(t) \mp M_v(t),$$

где  $J$  — момент инерции КЛА относительно оси стабилизации;

$M_y(t)$ ,  $M_v(t)$  — управляющий и возмущающий моменты.

Передаточные функции КЛА по углу поворота и по угловой скорости вращения при воздействии суммарного управляющего и возмущающего момента будут иметь следующий вид:

$$\frac{1}{Jp^2}; \quad \frac{1}{Jp}.$$

Структурная схема системы стабилизации, представляющая собой математическую модель системы, приведена на рис. 3.

Аналоговое моделирование системы стабилизации КЛА выполнено со следующими значениями масштабов представления физических параметров в напряжении:

$$\mu_\varphi = 0,066 \text{ град/В};$$

$$\mu_\omega = 2 \text{ Н} \cdot \text{м/В}.$$

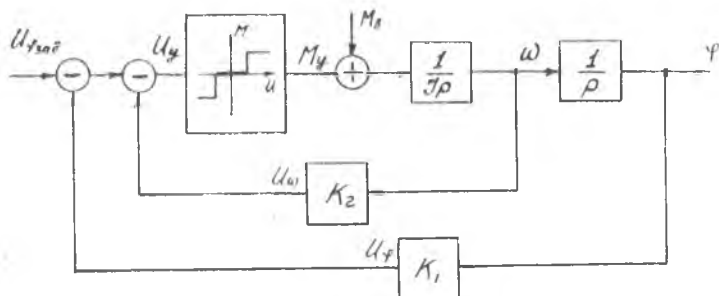


Рис. 3. Структурная схема системы угловой стабилизации КЛА

Момент инерции КЛА и моментные характеристики исполнительного элемента (см. рис. 2) имеют следующие значения:

$$J = 1,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M = \pm 40 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\Delta U = \pm 30 \text{ В}.$$

Масштаб времени  $\mu_t$  может быть произвольным, выбирается из удобства проведения эксперимента. Выбираем  $\mu_t = 1$ .

При моделировании на АВМ нелинейной характеристики исполнительного элемента системы стабилизации КЛА аналоговая модель исполнительного элемента в соответствии с рис. 2 и принятыми масштабами должна воспроизводить зависимость, представленную на рис. 4. Схемы моделирования отдельных типовых нелинейных зависимостей приведены в приложении.

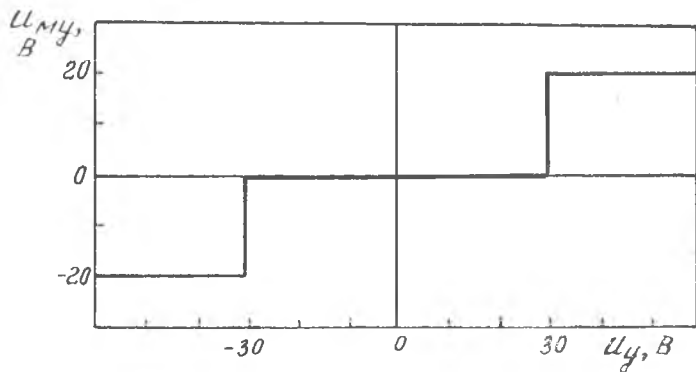


Рис. 4. Нелинейная характеристика аналоговой модели исполнительного элемента (для МН 7)

На рис. 5 приведена аналоговая схема моделирования на АВМ МН-7 системы стабилизации КЛА с нелинейным исполнительным элементом.

Аналоговая схема моделирования этой же системы на АВК-31 приведена на рис. 6.

Обе эти аналоговые схемы соответствуют структурной схеме системы стабилизации, приведенной на рис. 3. Отличия в аналоговых схемах рис. 5 и рис. 6 вызваны спецификой конструкции и работы моделирующих установок МН-7 и АВК-31.

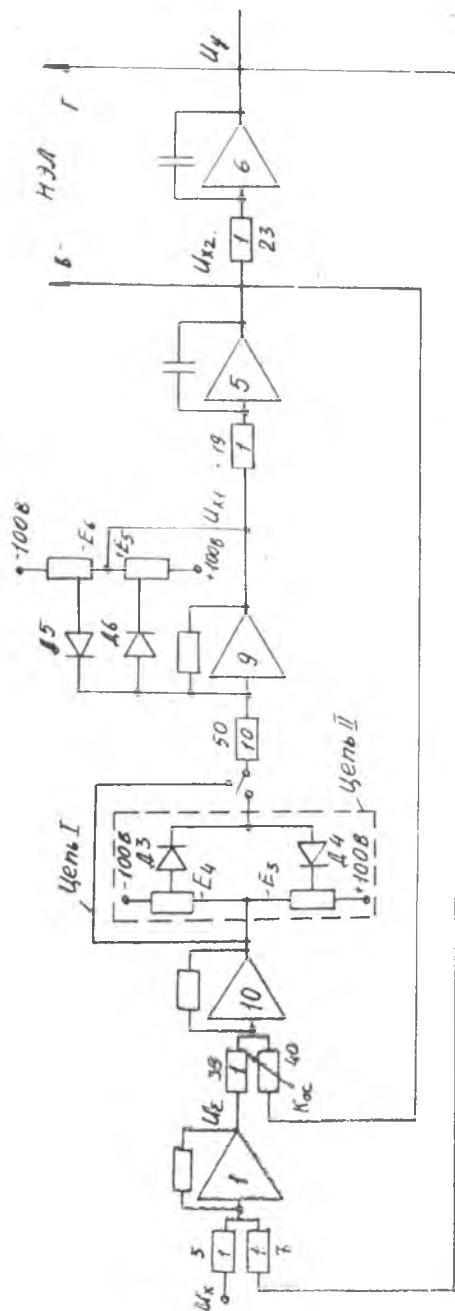


Рис. 5. Аналоговая схема моделирования системы угловой стабилизации КЛА на АВМ МН-7



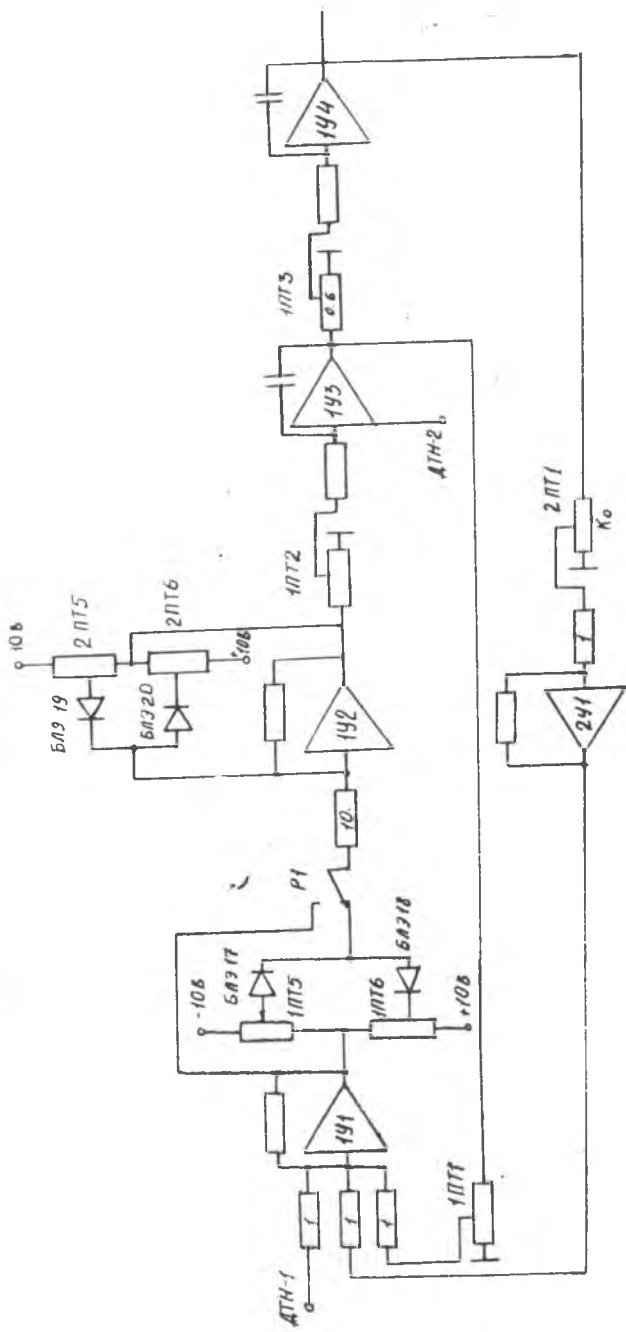


Рис. 6. Аналоговая схема моделирования системы угловой стабилизации КЛА на АВК-31

Рассмотрим аналоговую схему моделирования (см. рис. 5), подготовленную по структурной схеме (рис. 3). На схеме аналогового моделирования усилитель  $I$  с входными сопротивлениями  $3$  и  $7$  моделирует первый элемент сравнения. Усилитель  $10$  с входными сопротивлениями  $39$  и  $40$  моделирует второй элемент сравнения.

Диодные элементы  $D_3, D_4, D_5, D_6$  и усилитель  $9$  моделируют исполнительный элемент системы стабилизации и воспроизводят нелинейную зависимость, приведенную на рис. 4. Диодная цепь  $II$  моделирует зону нечувствительности  $\pm 30$  В (см. рис. 4). Ограничение  $\pm 20$  В обеспечивается усилителем  $9$  с диодными элементами  $D_5, D_6$  в обратной связи.

Для моделирования нелинейной зависимости без зоны нечувствительности вместо цепи  $II$  включается цепь  $I$ .

Усилители  $5$  и  $6$  моделируют КЛА. Напряжение с выхода усилителя  $5$  является аналогом угловой скорости вращения КЛА, а с выхода усилителя  $6$  — аналогом угла поворота.

Исследование системы стабилизации рекомендуется выполнить путем экспериментального наблюдения фазовых траекторий (фазовых портретов) поведения КЛА. Для этого отключается временная развертка осциллографа. Выход усилителя  $5$ , т. е. напряжение  $U_\omega$  — аналог угловой скорости вращения КЛА, подключается к вертикальной развертке осциллографа. Выход усилителя  $6$ , т. е. напряжение  $U_\varphi$  — аналог угла поворота КЛА, подключается к горизонтальной развертке. (Коммутация АВМ МН-7 с осциллографом выполнена отдельным кабелем. Гнезда вертикальной и горизонтальной развертки осциллографа находятся на наборном поле МН-7 около делителя напряжения  $D$  и имеют обозначения ИЭЛ — индикатор электронно-лучевой.)

Если для построения фазовых траекторий используется графопостроитель (по указанию преподавателя), то выход усилителя  $5$  подключается к гнезду  $6$  «Внешняя аппаратура», а выход усилителя  $6$  к гнезду  $5$  «Внешняя аппаратура». (Гнезда «Внешняя аппаратура» выведены с соответствующей надписью в левой верхней части наборного поля АВМ МН-7).

Установка диодных элементов аналоговой схемы производится в соответствии с рис. 4.

Для этого на вход  $3$  усилителя  $I$  подается через делитель напряжение  $+30$  В. (На наборном поле АВМ-МН-7 имеются гнезда  $\pm 100$  В. Меньшее напряжение можно получить с помощью делителя  $D$ .)

Выход усилителя  $9$  подключается к вольтметру. Повернуть потенциометр  $+E_5$  против часовой стрелки до упора. Вращая шлиц потенциометра  $-E_4$ , установить момент отпирания диода  $D_4$  (нап-

ряжение должно быть около 30 В). Потенциометром  $+E_5$  ограничить величину напряжения до 20 В.

Повторить аналогичную настройку  $+E_3, -E_6$ , подавая на вход 3 усилителя 1 напряжение — 30 В.

Схема моделирования нелинейной системы стабилизации готова к проведению исследования. Исследование поведения системы стабилизации КЛА с зоной нечувствительности исполнительного элемента проводится при включенной цепи II, без зоны нечувствительности — при включенной цепи I. Изменение коэффициента обратной связи по скорости производится на входном переменном сопротивлении 40 усилителя 10. При повороте шлица потенциометра 40 против часовой стрелки до удара коэффициент обратной связи равен нулю, т. е. моделируется система стабилизации без датчика угловой скорости.

### РАБОТА НА АВК-31

Аналоговая схема моделирования (см. рис. 6) подготовлена по структурной схеме системы угловой стабилизации КЛА (см. рис. 3). На схеме аналогового моделирования усилитель 1У1 моделирует элементы сравнения.

Диодные элементы 17, 18, 19, 20 в БЛЭ-31 с потенциометрами 1ПТ5, 1ПТ6, 2ПТ5, 2ПТ6 и усилитель 1У2 моделируют исполнительный элемент системы стабилизации и воспроизводят нелинейную зависимость, приведенную на рис. 7. (На полупроводниковой АВК-31 диапазон рабочих напряжений усилителей в 10 раз меньше по сравнению с ламповой МН-7. Поэтому при подготовке аналоговой схемы моделирования на АВК-31 масштабы переменных изменены в 10 раз). Потенциометры 1ПТ5, 1ПТ6 и диоды 17, 18 моделируют зону нечувствительности  $\pm 3,0$  В, а потенциометры 2ПТ5, 2ПТ6 с диодами 19, 20 и усилителем 1У2 предназначены для ограничения  $\pm 2$  В.

Усилители 1У3 и 1У4 моделируют КЛА.

При моделировании исполнительного элемента без зоны нечувствительности необходимо заземлить гнездо УПР Р1 БЛЭ-31. При этом происходит переключение контакта Р1.

Для визуального наблюдения фазовой траектории с помощью осциллографа выходы усилителей 1У4 и 1У3 подключить соответственно к клеммам «Вход X» и 1 «Входы Y» осциллографа. Временная развертка осциллографа отключается.

Для регистрации фазовой траектории на графопостроителе (по указанию преподавателя) выходы усилителей 1У4 и 1У3 подключаются к гнездам 1, 2 «Внешняя аппаратура» БУ-31 АВК-31. Соответствующие контакты разъема (1, 2) Ш13 или Ш14 АВК-31 должны быть соединены кабелем с графопостроителем.

Установка диодных элементов аналоговой схемы производится в соответствии с рис. 7.

Для этого шлиц потенциометра 1ПТ5 повернуть до упора влево, а 2ПТ6 — вправо. На вход усилителя 1У1 с ДТН-1, подать напряжение 3,0 В, а к выходу усилителя 1У2 подключить вольтметр. Вращая шлиц потенциометра 1ПТ5, установить момент отпирания диода 17 в БЛЭ-31 (напряжение на выходе усилителя 1У2 должно быть около 3,0 В). Потенциометром 2ПТ6 ограничить величину напряжения до 2,0 В.

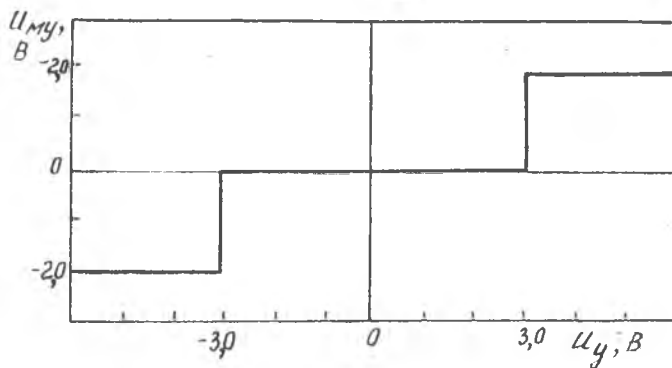


Рис. 7. Нелинейная характеристика аналоговой модели исполнительного элемента (для БВК-31)

Аналогично настраивается зона нечувствительности и ограничение для минусовых значений характеристики при помощи потенциометров 1ПТ6 и 2ПТ5. При этом на вход усилителя 1У1 с ДТН-1 подается напряжение — 3,0 В.

Схема моделирования нелинейной системы стабилизации готова к проведению исследования. Исследование поведения системы стабилизации КЛА с зоной нечувствительности исполнительного элемента проводится с незаземленным гнездом УПР Р1 БЛЭ-31, без зоны нечувствительности — при заземленном гнезде УПР Р1 БЛЭ-31. Изменение коэффициента обратной связи по скорости производится на потенциометре 1ПТ1. При повороте движка потенциометра влево до упора коэффициент обратной связи равен нулю, т. е. моделируется система стабилизации без датчика угловой скорости.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛА

Исследование системы угловой стабилизации ЛА с нелинейным исполнительным элементом выполняется методом аналогового мо-

делирования и заключается в экспериментальном снятии фазовых траекторий системы для различных режимов ее работы.

Поведение системы стабилизации анализируется в процессе переориентации КЛА. Для этого на вход аналоговой схемы моделирования подается напряжение-аналог требуемого углового положения КЛА. (Для схемы рис. 5 на сопротивление  $Z$  подается 35 В с делителя напряжения. Для схемы рис. 6 с ДТН-1 на усилитель 1У1 подается напряжение 3,5 В.)

При отсутствии обратной связи по скорости, т. е. без датчика угловой скорости, исследуется поведение системы стабилизации с зоной нечувствительности исполнительного элемента.

Повторяется исследование при отсутствии зоны нечувствительности исполнительного элемента.

Исследуется поведение системы стабилизации с зоной нечувствительности исполнительного элемента и при отсутствии зоны нечувствительности с различными значениями коэффициента обратной связи по скорости. (Значения коэффициента в пределах от 0 до 1 по указанию преподавателя.)

Для всех перечисленных режимов работы системы снимаются экспериментальные фазовые траектории.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткая формулировка задачи исследования.
2. Структурная схема системы стабилизации.
3. Схема аналогового моделирования системы.
4. Экспериментальные фазовые траектории.
5. Выводы по работе с оценкой влияния зоны нечувствительности ИЭ и обратной связи по скорости на работу системы стабилизации.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные элементы системы стабилизации ЛА, их конструктивное исполнение и принцип работы.
2. Особенности работы исполнительного элемента системы стабилизации. Математическая модель, аналоговая схема моделирования.
3. Основные методы исследования нелинейных САУ.
4. Влияние обратной связи по скорости на работу системы стабилизации с нелинейным исполнительным элементом.

Приложение


Авторы-составители: *Виктор Дмитриевич Закаблукровский,*  
*Татьяна Юрьевна Чекина*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛА С НЕЛИНЕЙНЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Редактор *Е. Г. Филиппова*  
Техн. редактор *Н. М. Каленюк*  
Корректор *Н. С. Куприянова*

Сдано в набор 10.03.89 г. Подписано в печать 12.04.89 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.  
Высокая печать. Гарнитура литературная.  
Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6. Т. 300 экз. Заказ 254.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени С. П. Королева  
443001, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

---

Тип. ЭОЗ КуАИ. 443001, Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.