

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Теоретическое и экспериментальное
исследование динамических
характеристик рулевого сопла ЖРД**

Электронные методические указания
к лабораторной работе

Самара

2010

Авторы-составители: **Гимадиев Асгат Гатьятович,**

Быстров Николай Дмитриевич

Рецензент: заведующий кафедрой «Теория двигателей»

д.т.н. профессор Матвеев В.Н.

Рассмотрены вопросы управления вектором тяги ЖРД ракеты. Показано, что одним из эффективных методов управления траекторией ракеты являются рулевые сопла с гидравлическим приводом. При определенных упрощающих допущениях выведены уравнения рулевого сопла, которые сведены в зависимость для интегрирующего типового звена системы автоматического регулирования. При подключении обратной связи рулевое сопло описывается зависимостью для апериодического типового звена. Даны исходные данные для расчета динамических характеристик рулевого сопла в разомкнутом и замкнутом состояниях. Описано лабораторное оборудование и методика проведения экспериментальных исследований рулевого сопла. Даны контрольные вопросы для проверки знаний магистрантов и студентов по лабораторной работе.

Методические указания предназначены для магистрантов в рамках магистерской программы «Энергетика, экология и двигательные установки ракетных и космических систем» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», а также для студентов специальности 160302 «Ракетные двигатели» и 150802 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» по дисциплине «Автоматика и регулирование двигательных установок ракетных и космических систем» и могут быть полезны при выполнении курсовых работ, дипломных проектов и подготовке к экзаменам.

Подготовлены на кафедре автоматических систем энергетических установок.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Цель и задачи проведения лабораторной работы	3
2. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ РАКЕТЫ	4
3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЛЕВОГО СОПЛА	5
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЛЕВОГО СОПЛА	12
5. Содержание отчета по лабораторной работе	14
6. Вопросы для проверки знаний по лабораторной работе	15
Список использованных источников	15

1 Цель и задачи проведения лабораторной работы

Цель работы: ознакомление с расчетными и экспериментальными методами исследования переходных и частотных характеристик рулевого сопла с гидроприводом, приобретение навыков проведения динамических испытаний агрегатов систем автоматического регулирования ЖРД.

Содержание работы:

1. Ознакомление с принципами получения переходных и частотных характеристик САР.
2. Построение переходной и частотной характеристик рулевого сопла с гидроприводом.
3. Изучение лабораторной установки и приемов работы на ней.
4. Экспериментальное исследование переходных и частотных характеристик рулевого сопла с гидроприводом.
5. Оформление отчета.

2 СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ РАКЕТЫ

Как известно, управление движением ракеты сводится к управлению движением ее центра массы в плоскостях тангажа, рыскания, а также движением вокруг центра массы, то есть по углу крена при помощи специальных органов управления (рис. 1, 2).

Если полет ракеты происходит с работающими двигателями, то управление движением центра масс возможно рассогласованием тяги двигателей или путем изменения их осевого углового положения относительно вектора скорости ракеты (рис. 2). Оба эти способа могут использоваться одновременно.

В качестве управляющих органов, поддерживающих заданную траекторию полета РН, могут использоваться: качающиеся основные двигатели; специальные рулевые двигатели или рулевые камеры (сопла);

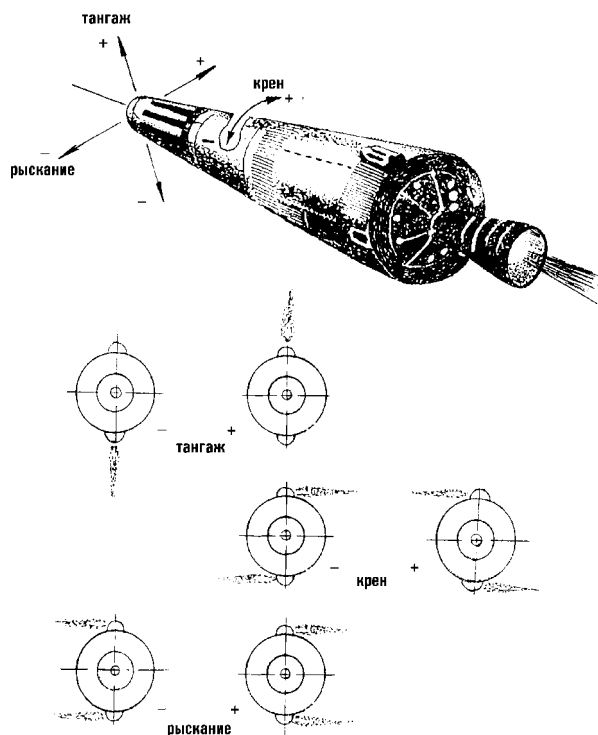


Рис. 1 Управление ракетой в плоскостях тангажа, рыскания и крена

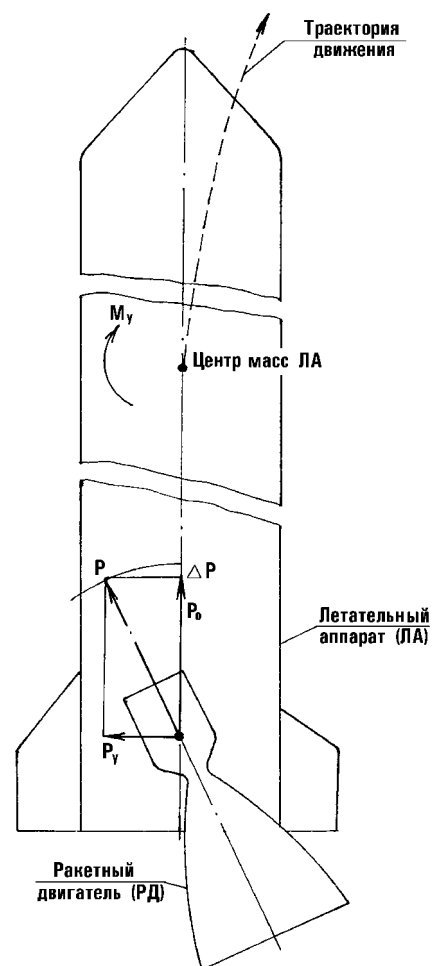


Рис. 2. Создание управляющего момента путем поворота двигателя или рулевого сопла: P – вектор тяги двигателя или рулевого сопла; P_0 – продольная составляющая тяги, обеспечивающая разгон ракеты; P_y – управляющая сила; M_y – управляющий момент; ΔP – потеря тяги на управление

аэродинамические газовые рули; устройства для отклонения выходящих из сопла основных РД струи газов путем вдува или впрыска специальных компонентов; основные двигатели с рассогласованием тяг.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЛЕВОГО СОПЛА С ГИДРОПРИВОДОМ

Рулевое сопло (РС) с гидроприводом представляет собой автономный электрогидравлический усилитель, предназначенный для преобразования электрического сигнала в перемещение выходного штока, соединенного с

корпусом рулевого сопла (рис. 3). Принцип действия рулевого сопла основан на том, что поршень 1, связанный через шток 2 с рычагом 3 рулевой машины, перемещается под действием перепада давления в полостях А и Б. Перепад давления создается за счет неодинакового перекрытия золотников 4 и 5, установленных в каналах нагнетания жидкости. Рабочая жидкость нагнетается шестеренным насосом 6. Золотники 4 и 5 соединены с качалкой 7 дифференциального реле 8, на центральную обмотку которого подается командное напряжение U_{ex} . При отсутствии командного напряжения золотники одинаково перекрывают каналы нагнетания, давления в полостях А и Б одинаковы и поршень 1 неподвижен.

При подаче командного напряжения U_{ex} качалка отклоняется от нейтрального положения и проходное сечение одного из золотников увеличивается, а другого - уменьшается. При этом давление в одной из полостей (А или Б) увеличивается, а в другой - уменьшается, что приводит к возникновению перепада давления и перемещению поршня 1. Поршень 1, действуя через шток 2 и рычаг 3, поворачивает рулевое сопло 10. Угол поворота вала измеряется потенциометром обратной связи (ПОС) 9. Напряжение, снимаемое с ПОС, пропорционально углу поворота вала $\psi_{вых}$. При изменении полярности командного сигнала вал поворачивается в другую сторону.

При выводе уравнения РС как интегрирующего ТЗ принимается ряд упрощающих допущений: сила инерции, сила трения и сила противодействия со стороны нагрузки на поршень пренебрежимо малы по сравнению с силой давления; жидкость несжимаема. Такие допущения оправданны при небольших реализующихся на практике скоростях

$$Q_B = \mu(x_0 + \Delta x)b\sqrt{\frac{2}{\rho}(P_B - P_{cl})} - Q_n$$

Q_A, Q_B — объемные расходы через полости А и Б; F_n — площадь поршня; y - координата движения поршня; Q_n — производительность насоса; x_0 — координата золотника, соответствующая равновесному состоянию РС; Δx — смещение золотника относительно нейтрального положения; b — ширина щели золотника; ρ — плотность жидкости; P_A, P_B — давление в полостях А и Б; μ — коэффициент расхода.

Имея в виду, что на равновесном режиме ($\Delta x=0$)

$$F_n \frac{dy}{dt} = Q_A = Q_B = 0, \quad (2)$$

получим

$$Q_H = \mu x_0 b \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_A - P_{cl})}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2) с учетом выражения (3), будем иметь:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\mu b \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_A - P_{cl})}}{F_n} \Delta x. \quad (4)$$

Согласно принятому допущению при смещении золотников на величину Δx происходит незначительное изменение давления P_A относительно его значения, соответствующего нейтральному положению золотников. Тогда, подставляя в числитель правой части равенства (4) значение

$$\mu b \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_A - P_{cl})} = \frac{Q_n}{x_0},$$

получим

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q_n}{F_n x_0} \Delta x. \quad (5)$$

Имея в виду, что существует однозначная связь между входным напряжением и перемещением золотников $\Delta x = k_1 U_{\text{вх}}$, а также между ходом поршня и углом поворота сопла $\psi_{\text{вых}} = k_2 y$, можно записать уравнение (5) в виде

$$\frac{d\psi_{\text{вых}}}{dt} = k U_{\text{вх}}, \quad (6)$$

где $k = \frac{Q_n k_1 k_2}{F_n x_0}$ - коэффициент передачи РС.

Как следует из формулы (6) РС представляет собой интегрирующее типовое звено с переходной характеристикой, описываемой зависимостью

$$\psi_{\text{вых}} = k \Delta U_{\text{вх}} t \quad (7)$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$ - входной сигнал в виде ступени напряжения.

Графики переходных характеристик РС представлены на рис. 3.

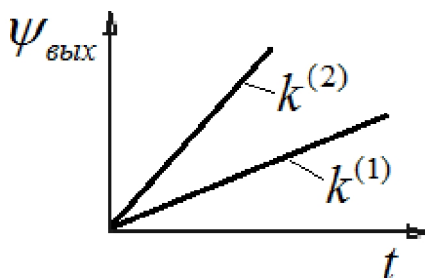


Рис. 3 Переходная характеристика РС при ступенчатом изменении входного напряжения: $k^{(2)} > k^{(1)}$

Частотные характеристики РС могут быть получены, если представить уравнение (6) в операторной форме

$$\tilde{\psi}_{\text{вых}} s = k \tilde{U}_{\text{вх}} \quad (8)$$

где $\tilde{\psi}_{\text{вых}}$, $\tilde{U}_{\text{вх}}$ - изображения по Лапласу выходного и входного параметров РС, s - переменная в изображениях Лапласа. Тогда передаточная функция РС имеет вид:

$$W(s) = \frac{\tilde{\psi}_{\text{вых}}}{\tilde{U}_{\text{вх}}} = \frac{k}{s} \quad (9)$$

Если заменить в (9) $s = j\omega$, то получим частотную функцию РС

$$W(j\omega) = \frac{\bar{\psi}_{\text{вых}}}{\bar{U}_{\text{ex}}} = -j \frac{k}{\omega} \quad (10)$$

где $\bar{\psi}_{\text{вых}}$, $\bar{U}_{\text{ex}}$ - комплексные амплитуды колебаний угла поворота РС и напряжения на входе, ω - угловая частота колебаний, $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица.

Амплитудно-частотная и фазочастотная функции РС имеют вид:

$$M(\omega) = \frac{A_{\psi}}{A_U} = \frac{k}{\omega}; \quad \varphi(\omega) = -\pi/2, \quad (11)$$

где A_{ψ} , A_U - амплитуды колебаний угла поворота и входного напряжения; $\varphi(\omega)$ - сдвиг начальных фаз колебаний угла поворота и входного напряжения.

Графики частотных характеристик представлены на рис. 4.

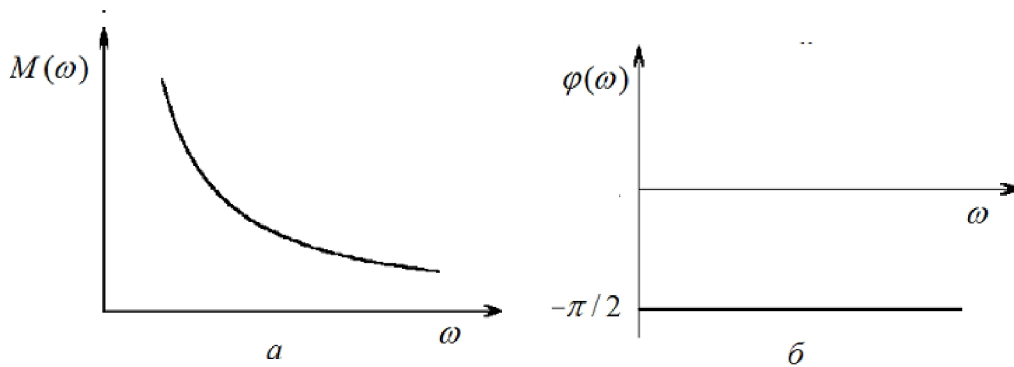


Рис. 4. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики РС

Структурная схема РС с включенной обратной связью представлена на рис 5, преобразовав которую можно определить передаточная функцию соединения звеньев

$$W(s) = \frac{\tilde{\psi}_{\text{вых}}}{\tilde{U}_{\text{ex}}} = \frac{k_3}{T_3 s + 1} \quad (12)$$

где $k_3 = 1/k_{oc}$ коэффициент передачи; $T_3 = 1/(kk_{oc})$ - постоянная времени РС с обратной связью; k_{oc} - коэффициент обратной связи РС.

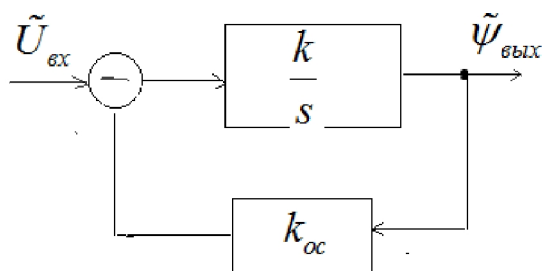


Рис. 5. Структурная схема РС с обратной связью

Из (10) следует, что РС с обратной связью представляет собой апериодическое типовое звено, переходная функция которого имеет вид

$$\psi_{\text{вых}}(t) = \Delta U_{\text{вх}} k_3 (1 - e^{-T_3 t}). \quad (13)$$

Графики переходных характеристик РС с обратной связью показаны на рис. 6.

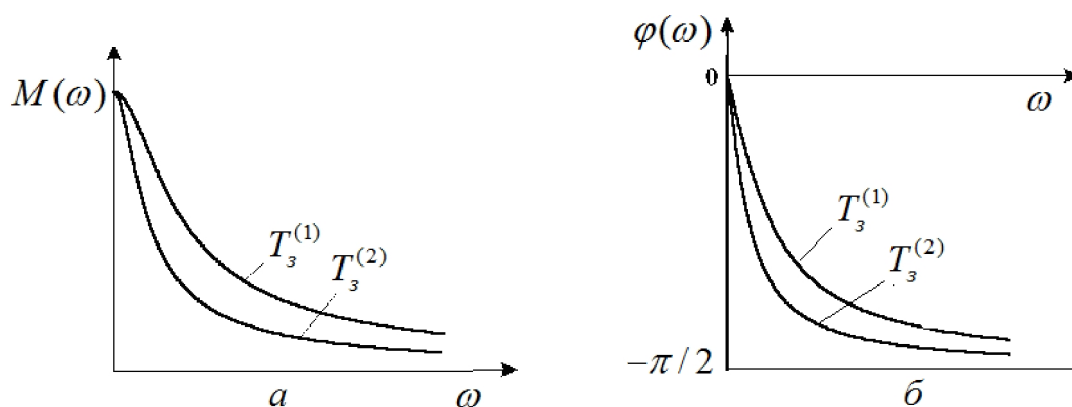


Рис. 6. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики РС с обратной связью: $T_3^{(2)} > T_3^{(1)}$

Частотную функцию РС с обратной связью определяют на основании (11), подставив $s = j\omega$

$$W(j\omega) = \frac{\bar{\psi}_{\text{вых}}}{\bar{U}_{\text{вх}}} = \frac{k_3}{1 + jT_3\omega}. \quad (14)$$

Амплитудно-частотная и фазочастотная функции РС с обратной связью имеют вид:

$$M(\omega) = \frac{A_\psi}{A_U} = \frac{k_3}{\sqrt{1 + (T_3\omega)^2}}; \quad \varphi(\omega) = -\arctg(T_3\omega), \quad (15)$$

где A_ψ , A_U - амплитуды колебаний угла поворота и входного напряжения;
 $\arctg(T_3\omega)$ - сдвиг начальных фаз колебаний угла поворота и входного
напряжения РС с обратной связью.

Частотные характеристики РС с обратной связью приведены на рис. 6.

Исходные данные для расчета переходных и частотных характеристик
приведены в приложении 1.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЛЕВОГО СОПЛА

Экспериментальное исследование переходных и частотных характеристик
рулевого сопла с гидроприводом проводится на лабораторной установке
(рис. 7), состоящей из следующих основных блоков: рулевого сопла, пульта
управления, звукового генератора низкочастотных колебаний, электронного
осциллографа, блока питания установки и измерительно-регистрационного
комплекса. Звуковой генератор используется при исследовании частотных
характеристик РС. На пульте управления установлены тумблеры включения
мотора гидравлического шестеренного насоса, тумблер подачи напряжения
 $U_{\text{вх}}$ в обмотку управления поляризованного реле гидропривода при
определении переходных характеристик; переключатель, которым
устанавливается величина входного напряжения; тумблер включения
обратной связи (используется при исследовании РС с обратной связью);
переключатель для изменения величины коэффициента обратной связи.
Электронный осциллограф позволяет наблюдать переходный процесс при
подаче ступенчатого сигнала и колебания сопла во время частотных
испытаний, а также сигналы, подаваемые в качестве стандартных во входную
электрическую цепь РС. Блок питания является источником постоянного
напряжения 27 В для электрической цепи управления мотора

гидравлического привода РС, а также для питания обмотки управления и потенциометра обратной связи.

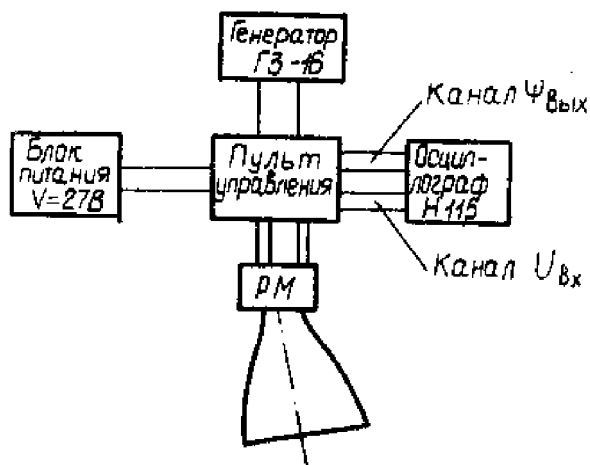


Рис. 7. Блок-схема соединения приборов при исследовании переходных и частотных характеристик рулевой машины как интегрирующего типового звена.

Для определения переходных характеристик РС необходимо выполнить следующее.

1. Тумблер «Обратная связь» установить в нейтральное положение.
2. Переключатель, с помощью которого задается величина входного напряжения $U_{вх}$, установить в положение 3 (4,5), что соответствует $U_{вх}=0,45$ В (0,9В; 1,2В) в зависимости от заданного варианта.

Произвести калибровку каналов измерительного комплекса приборов. Для этого по каналу $U_{вх}$ подается известное калибровочное напряжение, а по каналу $\psi_{вых}$ записываются сигналы, соответствующие двум заданным углам, например $\psi_{вых}=0$ и $\psi_{вых}=30^\circ$.

Установить сопло в нейтральное положение ($\psi_{вых}=0$), включить на пульте осциллографа тумблер «Двигатель», а на пульте управления — «Мотор». Включить на ПК запись сигнала и через 1 с включить на пульте управления тумблер «Качание сопла». Переходный процесс записать до достижения соплом угла поворота $\psi_{вых}=45^\circ$.

Нанести ряд экспериментальных точек $\psi_{вых}(t)$ на теоретические зависимости. Воспользовавшись экспериментальными данными и переходной функцией для РС как интегрирующего типового звена, определить

экспериментальный коэффициент передачи рулевого сопла.

Для экспериментального определения частотных характеристик рулевого сопла с гидроприводом необходимо выполнить следующее.

1. Включить генератор гармонического напряжения, прогреть приборы 10...15 минут.
2. Тумблер «Обратная связь» на пульте управления установить в нейтральное положение.
3. Произвести калибровку измерительных каналов по входу и выходу рулевого сопла. Для этого по каналу входного напряжения подается известное калибровочное напряжение, а по каналу выхода – записываются сигналы, соответствующие двум углам поворота сопла, например 0 и 30 градусов.
4. Клеммы на пульте подсоединить к выходу генератора низкочастотного напряжения и установить частоту 0,2 Гц и подать напряжение на пульт заданной величины.
5. Установить сопло в нейтральное положение, включить запись сигналов, а на пульте управления «Мотор».
6. Пункты 4 и 5 повторить для ряда частот: 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 Гц.

Обработав полученные данные, то есть, определив модули частотной функции рулевого сопла, нанести их на теоретические зависимости. Воспользовавшись экспериментальными данными, определить коэффициент передачи рулевого сопла и сравнить их с теоретически полученными результатами.

Повторить пункты 5; 6 при включенном положении тумблера «Обратная связь» на пульте управления экспериментальной установки.

5 Содержание отчета

1. Схемы, дифференциальное уравнение рулевого сопла с гидроприводом и его решение для случаев входного сигнала в виде ступенчатого напряжения

и гармонических колебаний.

2. Блок-схема лабораторной установки и кратко методика проведения экспериментальных исследований.

3. Расчетные и экспериментальные графики переходной и частотной характеристик рулевого сопла с гидроприводом.

4. Выводы, указать сходимость теоретических и экспериментальных данных.

6 Вопросы для проверки знаний магистрантов по лабораторной работе

1. Какие характеристики соплового аппарата с гидроприводом называют динамическими?
2. Как теоретически построить переходные характеристики рулевого сопла?
3. Как теоретически построить частотные характеристики рулевого сопла?
4. К какому типовому звену относится рулевое сопло с гидроприводом?
5. Как определить по экспериментальным динамическим характеристикам коэффициент передачи рулевого сопла?
6. В чем заключается методика проведения частотных испытаний рулевого сопла?

Список использованных источников

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1989. – 304 с.
2. Исследование частотных и переходных характеристик типовых звеньев САР. Методические указания к лабораторным работам 1 и 2. Авторы составители: А.Г. Гимадиев, А.Г. Конев. – Куйбышев: КуАИ, 1983. – 32 с.
3. Системы аэрокосмических аппаратов: Учеб. Пособие / С.А. Петренко, А.Г. Гимадиев, А.Н. Нечаев. Под общ. ред: д-ра техн наук С.А. Петренко и проф. Е.В. Шахматова. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2000. - 175 с.