

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**Кафедра технической эксплуатации
авиационных электросистем и
пилотажно - навигационных комплексов**

А.А. Гусев

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ

ПОСОБИЕ

по выполнению лабораторной работы
«Изучение и исследование контуров угловой стабилизации самолета»

**Для студентов IV и V курсов
специальности 160903
всех форм обучения**

Москва – 2009

Данные пособие издаются в соответствии с учебной программой дисциплины «Системы автоматического управления полетом» для студентов IV и V курсов специальности 160903

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры _____ г. и методического совета по специальности _____.

Рецензент профессор Константинов В.Д.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

«Изучение и исследование контуров угловой стабилизации самолета»

Цель работы.

Целью работы является изучение и исследование методом математического моделирования свойств системы «Самолет – автопилот (АП)» с различными законами управления, а также оценка влияния отказов в контурах угловой стабилизации на динамические свойства система «Самолет – автопилот».

Программа работы.

1. Знакомство с основными теоретическими положениями и подготовка исходных данных для выполнения лабораторной работы.
2. Знакомство с персональным компьютером и программой «MARS».
3. Экспериментальное исследование контуров угловой стабилизации самолета, описываемых различными законами управления.
4. Анализ полученных результатов, выводы.
5. Оформление отчета.

Исходным материалом для подготовки к лабораторной работе являются значения коэффициентов математической модели самолета типа ТУ-154 представленные в табл.1 и табл.2, соответственно, для продольного и бокового движений.

Номер задания выдается преподавателем при проведении лабораторной работы.

Таблица 1

№ задания	Исходные данные					
	Коэффиц.	$a_{m_z}^{\omega_z}$	$a_{m_z}^{\dot{\alpha}}$	$a_{m_z}^{\alpha}$	$a_{m_z}^{\delta_B}$	$a_{m_z}^{\alpha_y}$
Размерн.	c^{-1}	c^{-1}	c^{-2}	c^{-2}	c^{-1}	c^{-2}
1	0,8	0,18	3,4	1,9	0,9	$9,5 \cdot 10^{-7}$
2	0,7	0,15	2,4	1,3	0,6	$9,5 \cdot 10^{-7}$
3	0,6	0,17	3,6	1,7	0,8	$9,5 \cdot 10^{-7}$
4	0,5	0,19	2,9	1,6	0,7	$9,5 \cdot 10^{-7}$
5	0,4	0,16	2,2	1,5	0,5	$9,5 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2

№ задания	Исходные данные								
	Коэффиц.	$a_{m_y}^{\omega_y}$	$a_{m_y}^{\beta}$	$a_{m_y}^{\delta_n}$	$a_{m_x}^{\omega_x}$	$a_{m_x}^{\delta_{\alpha}}$	a_z^{β}	$a_{m_y}^{M_y}$	$a_{m_x}^{M_x}$
Размерн.	c^{-1}	c^{-2}	c^{-2}	c^{-1}	c^{-2}	c^{-1}	c^{-2}	c^{-2}	c^{-2}
1	0,15	1,22	0,53	1,62	1,3	0,09	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	
2	0,09	0,99	0,39	0,95	1,1	0,09	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	
3	0,17	1,60	0,68	2,45	2,3	0,19	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	
4	0,19	1,40	0,50	1,33	1,6	0,10	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	
5	0,10	1,30	0,43	1,48	1,4	0,13	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	

1. Знакомство с основными теоретическими положениями и подготовка исходных данных для выполнения лабораторной работы.

При подготовке к лабораторной работе студентам необходимо изучить материал, изложенный в [1] на страницах 266-314.

По заданию преподавателя, используя исходные данные, приведенные в табл.1 и табл.2, произвести расчет передаточных чисел, входящих в исследуемый закон управления контура угловой стабилизации самолета.

Расчет передаточных чисел выполняется по выражениям, представленным ниже, в настоящем методическом пособии.

Номера расчетных формул представлены в соответствующих ячейках табл. 3÷5

Результаты расчетов передаточных чисел для исследуемых в лабораторной работе законов управления занести в табл. 3÷5.

1.1. Автопилоты стабилизации угла тангажа.

Наиболее распространенными автопилотами стабилизации угла тангажа являются автопилоты с законами управления представленными в табл.3.

Таблица 3

№ п/п	Законы управления	Параметры законов управления				
		k_ϑ	k_{ω_z}	$k_{\ddot{\vartheta}}$	T_ϑ	T_i
1	$\delta_B = k_\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$	(1-2)	(1-1)	-	-	-
2	$\delta_B = k_\vartheta \frac{T_\vartheta p + 1}{p} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$	(1-4) или (1-7)	(1-3) или (1-6)	-	(1-5) или (1-8)	-
3	$p\delta_B = k_\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z + k_{\ddot{\vartheta}} p^2 \vartheta$	(1-10)	(1-9)	(1-1)	-	-
4	$\frac{T_i p}{T_i p + 1} \delta_B = k_\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$	(1-14)	(1-12) или (1-13)	-	-	1-2 с

1.1.1 Автопилот стабилизации угла тангажа, с законом управления $\delta_B = k_\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$

Исследуемый АП представляет собой ПД регулятор, у которого в качестве исполнительного устройства используется сервопривод с жесткой обратной связью (СПЖОС).

Структурная схема моделирования системы «Самолет - АП» изображена на рис. 1

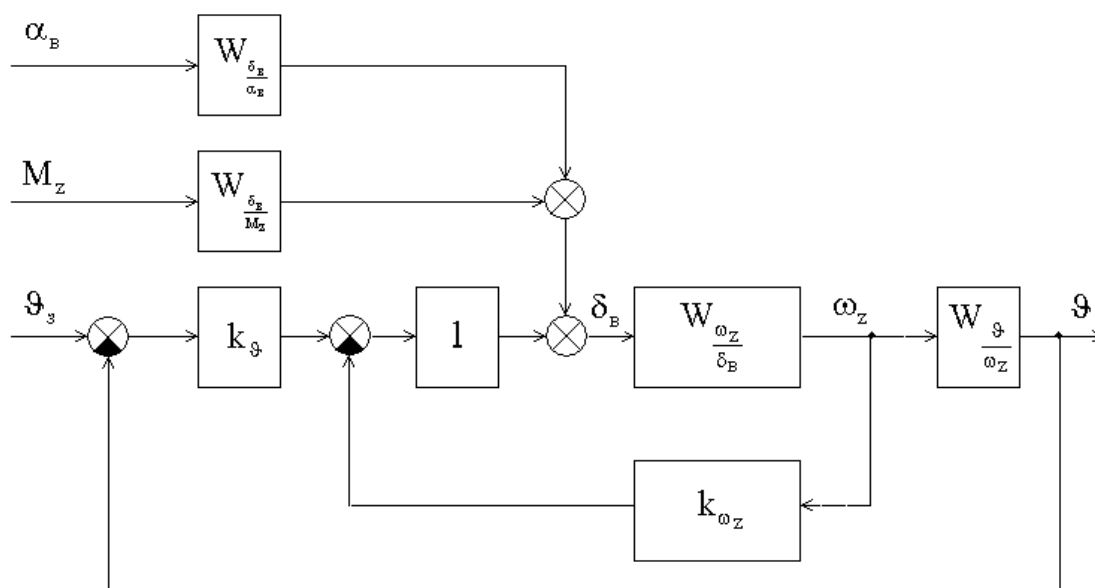


Рис.1 Структурная схема замкнутой системы «самолет - автопилот» с СПЖОС

Представленная на рис.1 структурная схема замкнутой системы «Самолет - АП» описывается системой уравнений представляющей собой совокупность уравнений объекта и регулятора (АП).

$$\begin{cases} (p^2 + a_{m_z}^{\omega_z} p) \vartheta + (a_{m_z}^{\dot{\alpha}} p + a_{m_z}^{\alpha}) \alpha + a_{m_z}^{\delta_B} \delta_B = a_{m_z}^{M_z} M_z + a_{m_z}^{\dot{\alpha}} p \alpha_B \\ - p \vartheta + (p + a_y^{\alpha}) \alpha = p \alpha_B \\ - (k_{\vartheta} + k_{\omega_z} p) \vartheta + \delta_B = -k_{\vartheta} \vartheta_3 \end{cases}$$

Расчет передаточных чисел выполним по методике изложенной в [2], согласно которой передаточное число по угловой скорости определим из условия обеспечения потребного коэффициента затухания для скорректированного контуром демфера тангажа самолета равного $\dot{\xi}_{\alpha} = (0,7 \div 1)$. Тогда

$$k_{\omega_z} = \frac{-(s_1 - 2\dot{\xi}_{\alpha}^2 a_y^{\alpha}) \pm 2\dot{\xi}_{\alpha} \sqrt{(\dot{\xi}_{\alpha} a_y^{\alpha})^2 - s_1 a_y^{\alpha} + s_2}}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-1).$$

Величину передаточного числа по углу определим по выражению

$$k_{\vartheta} = (0,9 \div 1)(s_2 + k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B} a_y^{\alpha}) \cdot \frac{1}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-2).$$

1.1.2 Автопилот стабилизации угла тангажа, с законом

управления
$$\delta_B = k_{\vartheta} \frac{T_{\vartheta} p + 1}{p} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$$

Исследуемый АП представляет собой ПДИ регулятор, у которого в качестве исполнительного устройства используется сервопривод с жесткой обратной связью (СПЖОС).

Структурная схема моделирования системы «Самолет - АП» изображена на рис.2

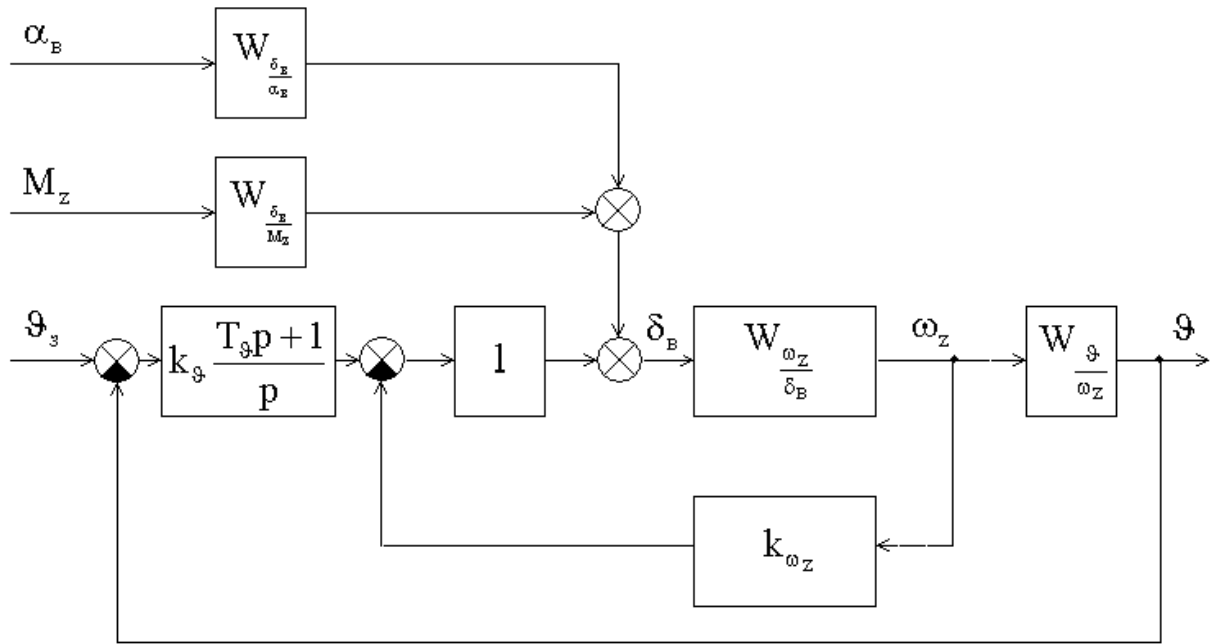


Рис.2 Структурная схема замкнутой системы «самолет - автопилот»

Система уравнений, описывающая представленную структуру имеет вид

$$\begin{cases} (p^2 + a_{m_z}^{\omega_z} p) \vartheta + (a_{m_z}^{\alpha} p + a_{m_z}^{\alpha}) \alpha + a_{m_z}^{\delta_B} \delta_B = a_{m_z}^{M_Z} M_Z + a_{m_z}^{\alpha} p \alpha_B \\ - p \vartheta + (p + a_y^{\alpha}) \alpha = p \alpha_B \\ - (k_g \frac{T_g p + 1}{p} + k_{\omega_z} p) \vartheta + \delta_B = - k_g \frac{T_g p + 1}{p} \vartheta_3 \end{cases}$$

В соответствии с методикой по выбору и расчету параметров закона управления, изложенной в [2], вначале следует проанализировать

отношение $\frac{\sqrt{s_2 + k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B} a_y^{\alpha}}}{a_y^{\alpha}}$.

Если $\frac{\sqrt{s_2 + k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B} a_y^{\alpha}}}{a_y^{\alpha}} \geq 10$, то параметры закона управления следует

определять по выражениям:

$$k_{\omega_z} = \frac{-(s_1 - 2\xi_{\alpha}^2 a_y^{\alpha}) \pm 2\xi_{\alpha} \sqrt{(\xi_{\alpha} a_y^{\alpha})^2 - s_1 a_y^{\alpha} + s_2}}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-3)$$

$$k_g = 5 \cdot (s_2 + k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B} a_y^{\alpha}) \cdot \frac{a_y^{\alpha}}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-4)$$

$$T_{\vartheta} = \frac{0.1}{a_y^{\alpha}} \quad (1-5)$$

Если $\frac{\sqrt{s_2 + k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B} a_y^{\alpha}}}{a_y^{\alpha}} < 10$, то параметры закона управления следует

определять по выражениям:

$$k_{\omega_z} = \frac{-(s_1 - 2\xi_{\alpha}^2 a_y^{\alpha}) \pm 2\xi_{\alpha} \sqrt{(\xi_{\alpha} a_y^{\alpha})^2 - s_1 a_y^{\alpha} + s_2}}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-6)$$

$$k_{\vartheta} = (0,09 \div 0,1) \cdot (s_2 + k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B} a_y^{\alpha}) \cdot \frac{a_y^{\alpha}}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-7)$$

$$T_{\vartheta} = \frac{10}{a_y^{\alpha}} \quad (1-8)$$

1.1.3 Автопилот стабилизации угла тангажа, с законом управления

$$p\delta_B = k_{\vartheta}(\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z}\omega_z + k_{\ddot{\vartheta}}p^2\vartheta$$

Исследуемый АП представляет собой ПДИ регулятор, у которого в качестве исполнительного устройства используется сервопривод со скоростной обратной связью (СПЖОС).

Структурная схема моделирования системы «Самолет - АП» изображена на рис.3

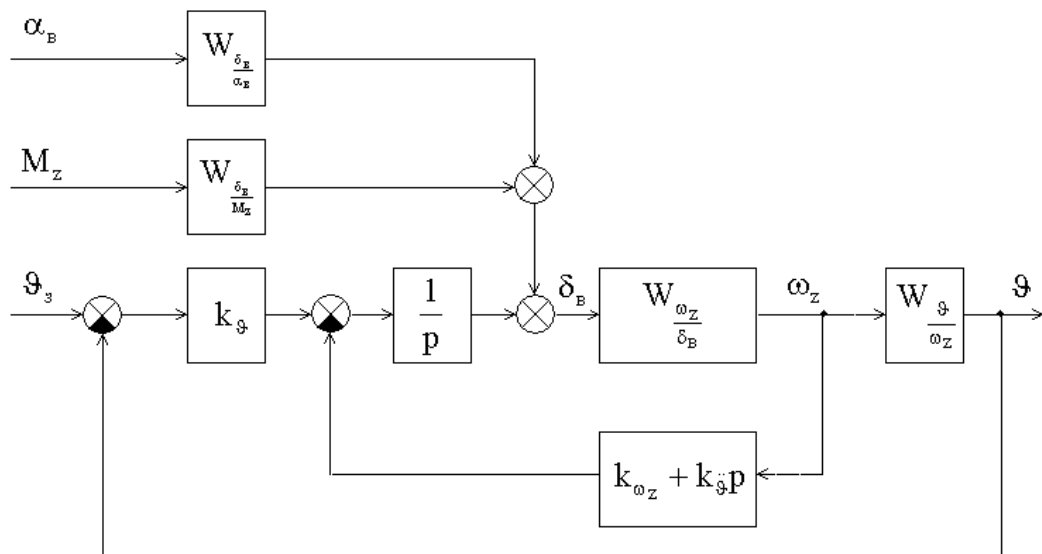


Рис.3 Структурная схема замкнутой системы «самолет - автопилот»

Система уравнений, описывающая представленную структуру, имеет вид:

$$\begin{cases} (p^2 + a_{m_z}^{\omega_z} p) \vartheta + (a_{m_z}^{\alpha} p + a_{m_z}^{\alpha}) \alpha + a_{m_z}^{\delta_B} \delta_B = a_{m_z}^{M_z} M_z + a_{m_z}^{\dot{\alpha}} p \alpha_B \\ - p \vartheta + (p + a_y^{\alpha}) \alpha = p \alpha_B \\ - (k_{\vartheta} + k_{\omega_z} p + k_{\ddot{\vartheta}} p^2) \vartheta + p \delta_B = - k_{\vartheta} \vartheta_3 \end{cases}$$

В соответствии с методикой по выбору и расчету параметров исследуемого закона управления, изложенной в [2], расчет передаточных чисел выполняем по выражениям:

$$k_{\omega_z} = \frac{(2,5 \div 5) \cdot s_2}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-9)$$

$$k_{\vartheta} = (0,7 \div 0,9) \cdot k_{\omega_z} \quad (1-10)$$

$$k_{\ddot{\vartheta}} = \frac{(0,71 \div 0,83) \cdot a_y^{\alpha} + (1,68 \div 1,57) \cdot \sqrt{k_{\omega_z} a_{m_z}^{\delta_B}} - s_1}{a_{m_z}^{\delta_B}} \quad (1-11)$$

1.1.3 Автопилот стабилизации угла тангажа, с законом управления

$$\frac{T_I p}{T_I p + 1} \delta_B = k_{\vartheta} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$$

Исследуемый АП представляет собой ПДИ регулятор, у которого в качестве исполнительного устройства используется сервопривод с изодромной обратной связью (СПИОС).

Структурная схема моделирования системы «Самолет - АП» изображена на рис.3

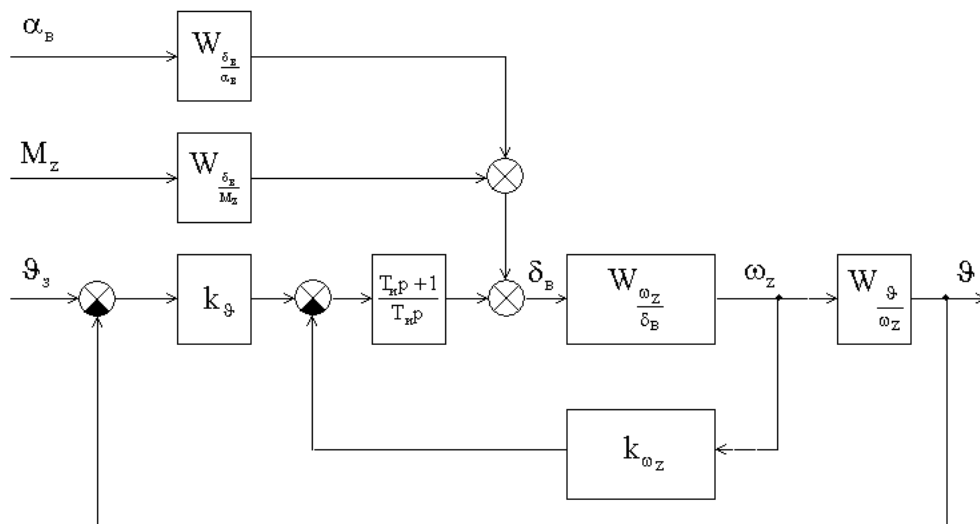


Рис.3 Структурная схема замкнутой системы «самолет - автопилот»

Система уравнений, описывающая представленную структуру имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (p^2 + a_{m_z}^{\omega_z} p) \vartheta + (a_{m_z}^{\alpha} p + a_{m_z}^{\alpha}) \alpha + a_{m_z}^{\delta_B} \delta_B = a_{m_z}^{M_z} M_z + a_{m_z}^{\alpha} p \alpha_B \\ - p \vartheta + (p + a_y^{\alpha}) \alpha = p \alpha_B \\ - (k_g + k_{\omega_z} p) \vartheta + \frac{T_{\text{и}} p}{T_{\text{и}} p + 1} \delta_B = -k_g \vartheta_3 \end{array} \right.$$

Для данного закона управления, наибольшее распространение получили автопилоты у которых $T_{\text{и}} = 1 \div 2$ с.. Поэтому, при подготовке к выполнению задания для рассматриваемого закона управления необходимо определить только два параметра k_g и k_{ω_z} .

Причем, если $\frac{1}{a_y^{\alpha}} > (1.67 \div 1.25) \cdot T_{\text{и}}$, то

$$k_{\omega_z} = (1.5 \div 4.0) \cdot \frac{s_2 + (0.36 \div 0.64) \cdot (a_y^{\alpha})^2 - (0.6 \div 0.8) \cdot a_y^{\alpha} \cdot s_1}{a_{m_z}^{\delta_B} \cdot [1 - (1.67 \div 1.25) \cdot a_y^{\alpha} \cdot T_{\text{и}}]} \cdot T_{\text{и}}. \quad (1-12)$$

Если $T_{\text{и}} > (0.6 \div 0.8) \cdot \frac{1}{a_y^{\alpha}}$, то

$$k_{\omega_z} = (1.5 \div 4.0) \cdot \frac{T_{\text{и}}^2 \cdot s_2 + (0.36 \div 0.64) - T_{\text{и}} \cdot (0.6 \div 0.8) \cdot s_1}{a_{m_z}^{\delta_B} \cdot T_{\text{и}} \cdot [a_y^{\alpha} \cdot T_{\text{и}} - (0.6 \div 0.8)]} \quad (1-13)$$

Исходя из условия, что требуемая величина времени регулирования равна $t_{\text{рег } \vartheta} \approx 3 \div 4$ с, величина передаточного числа по углу определится выражением:

$$k_g = (0.8 \div 1.0) \cdot k_{\omega_z} \quad (1-14)$$

1.2. Автопилоты стабилизации угла курса.

Наибольшее распространение на самолетах гражданской авиации получили автопилоты стабилизации курса прямой схемы с законами управления представленными в табл.4

Таблица 4

№ п/п	Законы управления	Параметры законов управления				
		k_φ	k_{ω_y}	$k_{\ddot{\varphi}}$	T_φ	T_ψ
1	$\delta_n = k_\varphi (\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y} \omega_y$	(2-2)	(2-1)	-	-	-
2	$\delta_n = k_\varphi \frac{T_\varphi p + 1}{p} (\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y} \omega_y$	(2-4) или (2-7)	(2-3) (2-6)	-	(2-5) (2-8)	-
3	$p\delta_n = k_\varphi (\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y} \omega_y + k_{\ddot{\varphi}} p^2 \varphi$	(2-10)	(2-9)	(2-11)	-	-
4	$\frac{T_\psi p}{T_\psi p + 1} \delta_n = k_\varphi (\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y} \omega_y$	(2-14)	(2-12) или (2-13)	-	-	1-2 с

Структурные схемы для каждого закона управления представленного в табл.4 и системы уравнений, описывающие их аналогичны соответствующим законам управления для автопилотов тангажа с той лишь разницей, что в качестве уравнений объекта управления необходимо использовать частную модель бокового движения «Рыскания-скольжения» имеющую вид:

$$\begin{cases} (p^2 + a_{m_y}^{\omega_y} p)\varphi + a_{m_y}^\beta \beta = -a_{m_y}^{\delta_n} \delta_n + a_{m_y}^{M_y} M_y \\ -p\varphi + (p + a_z^\beta)\beta = p\beta_B \end{cases}$$

В связи со сказанным, ниже приводятся только выражения для определения передаточных чисел АП курса.

1.2.1 Автопилот стабилизации угла курса, с законом управления

$$\delta_n = k_\varphi (\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y} \omega_y$$

Передаточные числа для исследуемого закона управления определяем по выражениям:

$$k_{\omega_y} = \frac{-(f_1 - 2\xi_\beta^2 a_z^\beta) \pm 2\xi_\beta \sqrt{(\xi_\beta a_z^\beta)^2 - f_1 a_z^\beta + f_2}}{a_{m_y}^{\delta_n}} \quad (2-1)$$

$$k_{\varphi} = (0,9 \div 1)(f_2 + k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H} a_z^{\beta}) \cdot \frac{1}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-2)$$

1.2.2 Автопилот стабилизации угла курса, с законом управления

$$\delta_H = k_{\varphi} \frac{T_{\varphi} p + 1}{p} (\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y} \omega_y$$

В соответствии с методикой по выбору и расчету параметров закона управления, изложенной в [2], в начале следует

проанализировать отношение $\frac{\sqrt{f_2 + k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H} a_z^{\beta}}}{a_z^{\beta}}$.

Если $\frac{\sqrt{f_2 + k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H} a_z^{\beta}}}{a_z^{\beta}} \geq 10$, то параметры закона управления следует

определять по выражениям:

$$k_{\omega_y} = \frac{-(f_1 - 2\dot{\xi}_{\beta}^2 a_z^{\beta}) \pm 2\dot{\xi}_{\beta} \sqrt{(\dot{\xi}_{\beta} a_z^{\beta})^2 - f_1 a_z^{\beta} + f_2}}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-3)$$

$$k_{\varphi} = 5 \cdot (f_2 + k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H} a_z^{\beta}) \cdot \frac{a_z^{\beta}}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-4)$$

$$T_{\varphi} = \frac{0.1}{a_z^{\beta}} \quad (2-5)$$

Если $\frac{\sqrt{f_2 + k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H} a_z^{\beta}}}{a_z^{\beta}} < 10$, то параметры закона управления следует

определять по выражениям:

$$k_{\omega_y} = \frac{-(f_1 - 2\dot{\xi}_{\beta}^2 a_z^{\beta}) \pm 2\dot{\xi}_{\beta} \sqrt{(\dot{\xi}_{\beta} a_z^{\beta})^2 - f_1 a_z^{\beta} + f_2}}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-6)$$

$$k_{\varphi} = (0,09 \div 0,1) \cdot (a_2 + k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H} a_z^{\beta}) \cdot \frac{a_y^{\alpha}}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-7)$$

$$T_{\varphi} = \frac{10}{a_z^{\beta}} \quad (2-8)$$

1.2.3 Автопилот стабилизации угла курса, с законом управления

$$p\delta_H = k_\varphi(\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y}\omega_y + k_{\ddot{\varphi}}p^2\varphi$$

Передаточные числа для приведенного закона управления определяем по выражениям:

$$k_{\omega_y} = \frac{(2,5 \div 5) \cdot f_2}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-9)$$

$$k_\varphi = (0,7 \div 0,9) \cdot k_{\omega_y} \quad (2-10)$$

$$k_{\ddot{\varphi}} = \frac{(0,71 \div 0,83) \cdot a_z^\beta + (1,68 \div 1,57) \cdot \sqrt{k_{\omega_y} a_{m_y}^{\delta_H}} - f_1}{a_{m_y}^{\delta_H}} \quad (2-11)$$

1.2.4 Автопилот стабилизации угла курса, с законом управления

$$\frac{T_n p}{T_n p + 1} \delta_H = k_\varphi(\varphi - \varphi_3) + k_{\omega_y}\omega_y$$

Для данного закона управления, наибольшее распространение получили автопилоты у которых $T_n = 1 \div 2$ с. Поэтому в рассматриваемом законе управления определяются только два параметра k_φ и k_{ω_y} .

Причем, если $\frac{1}{a_z^\beta} > (1,67 \div 1,25) \cdot T_n$, то

$$k_{\omega_y} = (1,5 \div 4,0) \cdot \frac{f_2 + (0,36 \div 0,64) \cdot (a_z^\beta)^2 - (0,6 \div 0,8) \cdot a_z^\beta \cdot f_1}{a_{m_y}^{\delta_H} \cdot [1 - (1,67 \div 1,25) \cdot a_z^\beta \cdot T_n]} \cdot T_n \quad (2-12)$$

Причем, если $T_n > (0,6 \div 0,8) \cdot \frac{1}{a_z^\beta}$,

$$k_{\omega_y} = (1,5 \div 4,0) \cdot \frac{T_n^2 \cdot f_2 + (0,36 \div 0,64) - T_n \cdot (0,6 \div 0,8) \cdot f_1}{a_{m_y}^{\delta_H} \cdot T_n \cdot [a_z^\beta \cdot T_n - (0,6 \div 0,8)]} \quad (2-13)$$

Исходя из условия, что требуемая величина времени регулирования равна $t_{пер\varphi} \approx 3 \div 4$ с, величина передаточного числа по углу определится выражением:

$$k_\varphi = (0,8 \div 1,0) \cdot k_{\omega_y} \quad (2-14)$$

1.3. Автопилоты стабилизации угла крена.

Наибольшее распространение на самолетах гражданской авиации получили автопилоты стабилизации крена прямой схемы с законами управления представленными в табл.5

Таблица 5

№ п/п	Законы управления	Параметры законов управления				
		k_γ	k_{ω_x}	$k_{\ddot{\gamma}}$	T_γ	T_π
1	$\delta_\vartheta = k_\gamma (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x$	(3-2)	(3-1)	-	-	-
2	$\delta_\vartheta = k_\gamma \frac{T_\gamma p + 1}{p} (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x$	(3-4)	(3-3)	-	(3-5)	-
3	$p \delta_\vartheta = k_\gamma (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x + k_{\ddot{\gamma}} p^2 \gamma$	(3-7)	(3-6)	(3-8)	-	-
4	$\frac{T_\pi p}{T_\pi p + 1} \delta_\vartheta = k_\gamma (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x$	(3-10)	(3-9)	-	-	1-2 с

Структурные схемы для каждого закона управления представленного в табл.5 и системы уравнений описывающие их аналогичны соответствующим законам управления для автопилотов тангажа с той лишь разницей, что в качестве уравнений объекта управления необходимо использовать частную модель бокового движения «Чистый-крен» имеющую вид:

$$(p^2 + a_{m_x}^{\omega_x} p) \gamma = -a_{m_x}^{\delta_\vartheta} \delta_\vartheta + a_{m_x}^{M_x} M_x$$

В связи со сказанным, ниже приводятся только выражения для определения передаточных чисел АП крена.

1.3.1 Автопилот стабилизации угла крена, с законом управления

$$\delta_\vartheta = k_\gamma (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x$$

Передаточные числа для исследуемого закона управления определяем по выражениям:

$$k_{\omega_x} = \frac{9.48 - a_{m_x}^{\delta_\vartheta} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}{a_{m_x}^{\delta_\vartheta} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}, \quad \text{где } t_{\text{пер}\gamma} = 1 \div 2 \text{ с.} \quad (3-1)$$

$$k_\gamma = \frac{22,5}{a_{m_x}^{\delta_\vartheta} \cdot t_{\text{пер}\gamma}^2} \quad (3-2)$$

1.3.2 Автопилот стабилизации угла крена, с законом управления

$$\delta_{\delta_3} = k_{\gamma} \frac{T_{\gamma} p + 1}{p} (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x$$

Передаточные числа для исследуемого закона управления определяем по выражениям:

$$k_{\omega_x} = \frac{18 - a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}, \quad \text{где } t_{\text{пер}\gamma} = 1 \div 2 \text{ с.} \quad (3-3)$$

$$k_{\gamma} = \frac{216}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}^3} \quad (3-4)$$

$$T_{\gamma} = 0,41 \cdot t_{\text{пер}\gamma} \quad (3-5)$$

1.3.3 Автопилот стабилизации угла крена, с законом управления

$$p \delta_{\delta_3} = k_{\gamma} (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x + k_{\ddot{\gamma}} p^2 \gamma$$

Передаточные числа для исследуемого закона управления определяем по выражениям:

$$k_{\omega_x} = \frac{18 - a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}, \quad \text{где } t_{\text{пер}\gamma} = 1 \div 2 \text{ с.} \quad (3-6)$$

$$k_{\gamma} = \frac{108}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}^2} \quad (3-7)$$

$$k_{\ddot{\gamma}} = \frac{216}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}^3} \quad (3-8)$$

1.3.4 Автопилот стабилизации угла крена, с законом управления

$$\frac{T_{\text{и}p}}{T_{\text{и}p+1}} \delta_{\delta_3} = k_{\gamma} (\gamma - \gamma_3) + k_{\omega_x} \omega_x$$

Передаточные числа для исследуемого закона управления определяем по выражениям:

$$k_{\omega_x} = \frac{18 - a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot t_{\text{пер}\gamma}}, \quad (3-9)$$

$$k_{\gamma} = \frac{25 \div 50}{a_{m_x}^{\delta_3} \cdot T_{\text{и}}}, \quad (3-10)$$

2. Знакомство с программой «MARS»

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере любой конфигурации с использованием программы «MARS».

Рабочими файлами для проведения исследования по программе лабораторной работы являются файлы:

- AP_JOS - для исследования автопилота с законами управления вида $\delta_B = k_{\vartheta} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$;
- AP_PDI - для исследования автопилота с законами управления вида $\delta_B = k_{\vartheta} \frac{T_{\vartheta} p + 1}{p} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$
- AP_SOS - для исследования автопилота с законами управления вида $p \delta_B = k_{\vartheta} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z + k_{\ddot{\vartheta}} p^2 \vartheta$
- AP_IOS - для исследования автопилота с законами управления вида $\frac{T_{\text{и}} p}{T_{\text{и}} p + 1} \delta_B = k_{\vartheta} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$

3. Экспериментальное исследование системы «самолет-автопилот».

В экспериментальной части лабораторной работы необходимо, с использованием программы «Mars», получить серии графиков переходных процессов для системы «самолет-автопилот» с исследуемым законом управления.

Исходными данными для проведения экспериментального исследования являются передаточные функции продольного и бокового движений самолета, а также величины передаточных чисел законов управления, полученные при выполнении пункта 1 настоящего пособия.

В процессе экспериментального исследования снять переходные процессы для АП тангажа по параметрам $\vartheta(t), \omega_z(t), \delta_B(t)$, для случаев:

1. Для закона управления $\delta_B = k_g (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$ при:

- $\vartheta_3 = 1$ при исправном автопилоте;
- $\vartheta_3 = 1 \cdot t$ (автопилот исправен);
- $M_z = 1$ (автопилот исправен);
- $\alpha_B = 1$ (автопилот исправен);
- $M_z = 1$ при отказе ДУС ($K_{\omega_z} = 0$);
- $M_z = 1$ при отказе ГВ ($K_g = 0$).

2. Для закона управления $\delta_B = k_g \frac{T_g p + 1}{p} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$ при:

- $\vartheta_3 = 1$ (автопилот исправен);
- $\vartheta_3 = 1 \cdot t$ (автопилот исправен);
- $M_z = 1$ (автопилот исправен);
- $M_z = 1$ ($K_{\omega_z} = 0$);
- $M_z = 1$ ($K_g = 0$).

3. Для закона управления $p \delta_B = k_g (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z + k_{\ddot{\vartheta}} p^2 \vartheta$, при:

- $M_z = 1$ (автопилот исправен);
- $M_z = 1$ ($K_{\omega_z} = 0$);
- $M_z = 1$ ($K_g = 0$);
- $M_z = 1$ при отказе ДУУ ($K_{\ddot{\vartheta}} = 0$).

4. Для закона управления $\frac{T_I p}{T_I p + 1} \delta_B = k_g (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_z} \omega_z$, при:

- $M_z = 1$ (автопилот исправен);
- $T_I = \text{var}$ (влияние постоянной времени изодрома).

По аналогии провести исследования для автопилотов курса и крена, фиксируя при этом соответственно переходные процессы $\varphi(t), \omega_y(t), \delta_H(t)$ для автопилота курса и $\gamma(t), \omega_x(t), \delta_\gamma(t)$ для автопилота крена.

4. Анализ полученных результатов, выводы.

Анализ полученных результатов включает в себя описание полученных при моделировании переходных процессов и их сравнительный анализ для различных законов управления. Выводы по результатам анализа.

5. Оформление отчета.

Отчет по работе оформляется на отдельных листах формата А4 или в обычной ученической тетради.

В отчете должны быть представлены:

- наименование работы;
- цель работы;
- исходные данные, выданные преподавателем;
- таблицы табл. 3-5 с результатами расчетов параметров законов управления и расчетные формулы;
- структурные схемы контуров угловой стабилизации самолета, математические модели системы «самолет-автопилот» для рассмотренных законов управления, и графики переходных процессов соответствующие этим структурам;
- выводы.

6. Вопросы для самопроверки.

1. Каково назначение автопилота угловой стабилизации?
2. Для чего в закон управления вводится сигнал угловой скорости (углового ускорения)?
3. Для чего в закон управления вводится сигнал угла тангажа (курса, крена)?
4. Каково назначение сигнала интеграла от угла в законах управления автопилотов?
5. Какие типы сервоприводов используются в структурах автопилотов?
6. Как сказывается на переходном процессе величина постоянной времени в структуре сервопривода с изодромной обратной связью?
7. Как влияют величины передаточных чисел автопилота на установившееся значение стабилизируемого параметра при воздействии на систему «самолет – автопилот» управляющего воздействия ?
8. Определите величину статической ошибки в системе «самолет-автопилот» по заданию преподавателя?

7. Литература.

1. Воробьев В.Г., Кузнецов С.В. Автоматическое управление полетом самолетов. М.: Транспорт. 1995
2. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., и др. Системы автоматического управления самолетом. М.: Машиностроение. 1974