Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

И. А. МИХАЛЕВ, Б. Н. ОКОЕМОВ

ТИПОВЫЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СТРУКТУР АВТОПИЛОТА

Учебное пособие по курсу
«Проектирование автопилотов»

Москва 1985

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

И.А.Михалев, Б.Н.Окоемов

Утверждено редсоветом МВТУ
как учебное пособие

ТИПОВЫЕ ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СТРУКТУР АВТОПИЛОТА

Учебное пособие
по курсу
"Проектирование автопилотов"

Под редакцией А.К.Неусыпина

Москва 1985

Данное учебное пособие издается в соответствии с учебным планом.
Рассмотрено и одобрено кафедрой П-4 02.12.83 г., методической комиссией факультета П 21.12.83 г. и учебно-методическим управлением 27.02.84 г.

Рецензенты: к.т.н. доц. ВЗМИ Черемисинова С.Н.,
к.т.н. доц. МВТУ Карабанов В.А.

Оглавление

Редактор В.М.Царев Корректор В.Т.Карасева

Заказ 374. Объем 3 п.л.(3уч.-изд.л.) Тираж 300 экз.
Л-83656 от 28.12.84 г. Цена 11 коп. План 1984 г., № 36.

Типография МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

ВВЕДЕНИЕ

Первым вопросом, с решением которого сталкивается разработчик автопилота, является вопрос перевода требований технического задания (ТЗ) на язык характеристик автопилота (АП), обеспечивающих требуемое качество управления полетом летательного аппарата (ЛА). Решение этого вопроса связано с проведением комплекса различного рода расчетов, для выполнения которых необходимо иметь математическое описание движения ЛА и работы АП.

Математическое описание движения ЛА при управлении с учетом воздействий внешних возмущений на параметры его движения составляет математическую модель движения ЛА.

Математическое описание функционирования реального АП, характеризующее преобразование входных возмущений и начальных состояний ЛА в выходной сигнал АП, образует математическую модель АП, или его структуру.

При синтезе структуры АП чрезвычайно желательно, чтобы все переменные состояния системы были непосредственно наблюдаемы и измеряемы. Набор датчиков первичной информации (ДПИ) на борту ЛА, как правило, регламентирован, и их характеристики априорно известны. Ограничен и класс структур сервоприводов АП. Поэтому синтез структуры АП является задачей параметрической оптимизации заданной первичной структуры АП, при которой оптимизации подлежит ограниченное число ее параметров.

Трудности формирования структуры АП в основном обусловлены нестационарностью характеристик ЛА как объекта управления по режимам его полета. Поэтому процедура синтеза структуры АП является многошаговой и предусматривает:

задание первичного закона управления АП;

параметрическую оптимизацию выбранной первичной структуры АП для конкретных фиксированных режимов полета ЛА;

расчет законов изменения параметров АП по режимам полета ЛА;

моделирование системы "ЛА – АП" с учетом реальных характеристик ЛА, его проводки управления и характеристик АП.

В данном учебном пособии рассмотрены первые три этапа общей процедуры проектирования структуры АП[ж)].

ж) Основы четвертого этапа проектирования структуры АП изложены в [2].

Глава I. ОСНОВНАЯ ИСХОДНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АП

Для разработки АП необходимой начальной информацией являются тактико-технические характеристики ЛА и техническое задание на разработку АП. Процедура проектирования АП начинается с составления, утверждения и анализа этих документов.

I.I. Тактико-технические данные ЛА

Тактико-технические данные включают:

I) Геометрические данные ЛА.
2) Массовые характеристики ЛА.
3) Аэродинамические характеристики ЛА.
4) Кинематические и кинетические характеристики ЛА.
5) Эксплуатационные характеристики ЛА.
6) Характеристики управляемости пилотируемого ЛА.
7) Характеристики проводки управления ЛА.
8) Условия работы АП на ЛА.

I.2. Типовое техническое задание на разработку АП

ТЗ содержит следующие основные вопросы:

I) Назначение АП и выполняемая функция.
2) Состав (комплектность) АП.
3) Технические требования:

а) основные технические характеристики АП:

точность стабилизации ЛА в невозмущенной атмосфере. При включенном АП стабилизация курса ЛА должна осуществляться при углах крена, меньших $\pm 7^0$;

максимальная скорость эволюции ЛА при автоматическом управлении;

выход на заданную координату управления должен осуществляться с перерегулированием $\sigma_z < \sigma_{z\,зад}$;

время регулирования не должно превышать $t_{рег\,z} < t_{рег\,зад}$;

б) масса АП m, кг;
в) напряжения питания;
г) потребляемые токи;
д) время готовности АП к включению;
е) габариты АП;
ж) условия эксплуатации, применения, транспортировки и хранения;
з) ресурс и срок службы.

4) Требования к надежности АП.
5) Требования к автоматизированному контролю.
6) Конструктивные требования.
7) Взаимодействующие изделия.
8) Требования к стандартизации, нормализации и унификации узлов и деталей АП.
9) Документация, подлежащая дополнительному согласованию с заказчиком.
I0) Порядок испытаний и приемки опытного образца (или образцов).
II) Возможность использования разрабатываемого АП на других ЛА.
I2) Другие требования.

В процессе проектирования АП отдельные пункты уточняются и корректируются.

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛА

При синтезе структуры АП непосредственным объектом исследования является математическая модель движения ЛА, отражающая его реальные свойства. В [I] показано, что на ранних стадиях синтеза АП допустимо использовать линейную модель движения ЛА, что объясняется рядом причин:

формы большинства ЛА таковы, что на основных рабочих режимах справедливы линейные зависимости сил и моментов от кинематических параметров [3] ;

при правильно спроектированной системе ошибка $\varepsilon(t)$ в принципе не может быть большой;

при использовании первой теоремы Ляпунова вопрос об устойчивости нелинейной системы можно решить на основе линейной аппроксимации;

за время регулирования по координате управления для большинства случаев параметры нестационарного объекта стабилизации меняются слабо.

Все это позволяет воспользоваться уравнениями для малых отклонений относительно некоторого опорного режима полета (программы полета).

В общем виде линейная модель движения ЛА может быть представлена как

$$\dot{x}(t) = A\cdot x(t) + B\cdot u(t), \quad t \geq 0, \qquad (2.I)$$

где для продольного движения ЛА

$$A_n=\begin{Vmatrix} -c_1' & -c_2' & -e_3' & 0 & c_{10}' \\ 1 & -c_4 & -e_2' & 0 & -c_{10} \\ 0 & -c_8 & -e_1 & 0 & -c_7 \\ 0 & c_6 & c_{11} & 0 & -c_6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \qquad \begin{aligned} c_1' &= c_1+c_5 ; \\ c_2' &= c_2-c_4c_5 ; \\ c_{10}' &= c_5\cdot c_{10} ; \\ e_3' &= e_3-c_5e_1 ; \end{aligned}$$

$$x_n^T(t)=\|\omega_z(t) \quad \alpha(t) \quad \Delta V(t) \quad \Delta H(t) \quad \Delta\vartheta(t)\|$$

$$B_n^T=\begin{Vmatrix} -c_3 & c_9 & 0 & 0 & 0 \\ r_3 & r_1 & r_2 & 0 & 0 \end{Vmatrix}$$

$$u_n^T(t)=\|\delta_в(t) \quad \delta_{с.в}(t)\|$$

для бокового движения ЛА

$$A_б=\begin{Vmatrix} -b_1 & -a_6 & -b_2 & 0 & 0 \\ -b_6 & -a_1 & -a_2 & 0 & 0 \\ b_7 & a_8 & -a_4 & b_4 & 0 \\ 1 & -a_9 & 0 & b_8 & 0 \\ 0 & a_{10} & 0 & -b_9 & 0 \end{Vmatrix}$$

$$x_б^T(t)=\|\omega_x(t) \quad \omega_y(t) \quad \beta(t) \quad \gamma(t) \quad \psi(t)\|$$

$$B_б^T=\begin{Vmatrix} -a_5 & -a_3 & -a_7 & 0 & 0 \\ -b_3 & -b_5 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}$$

$$u_б^T(t)=\|\delta_н(t) \quad \delta_э(t)\|$$

здесь

$$c_1=-0{,}5m_z^{\bar\omega_z}\rho VSb_A^2I_{zz}^{-1};$$
$$c_2=-0{,}5m_z^{\alpha}\rho V^2Sb_AI_{zz};$$
$$c_3=-0{,}5m_z^{\delta_в}\rho V^2Sb_AI_{zz}^{-1};$$
$$c_4=(c_y^{\alpha}+c_x)0{,}5\rho VSm^{-1};$$
$$c_5=-0{,}5m_z^{\bar{\dot\alpha}}\rho VSb_A^2I_{zz}^{-1};$$
$$c_6=0{,}01745\,V\cos\theta_0;$$
$$c_7=0{,}01745\,g\cos\theta_0;$$

$$c_8=0{,}01745(c_x^{\alpha}-c_y)\rho V^2\frac{S}{2m};$$
$$c_9=0{,}5c_y^{\delta_в}\rho VSm^{-1};$$
$$c_{10}=gV^{-1}\sin\theta_0;$$
$$c_{11}=\sin\theta_0;$$
$$e_1=(c_x+0{,}5c_x^{M}M-P^{V}\rho^{-1}V^{-1}S^{-1})\rho VSm^{-1};$$
$$e_2=(c_y+0{,}5c_x^{M}M)\cdot 57{,}3\rho Sm^{-1};$$
$$e_3=-57{,}3\{[m_z^{M}a^{-1}+2(c_x+c_{ym}\sin\theta_0)y_pV^{-1}b_A^{-1}]\frac{\rho V^2}{2}Sb_A-P_{y_p}^{V}\}I_{zz}^{-1};$$
$$a_1=-0{,}25(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2)^{-1}[I_{xx}(-m_x^{\bar\omega_y}tg\alpha+m_y^{\bar\omega_y})+$$
$$+I_{xy}(m_x^{\bar\omega_y}+m_y^{\bar\omega_y}tg\alpha)]\rho VSl^2;$$
$$a_2=-0{,}5(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2)^{-1}[I_{xx}(m_x^{\beta}tg\alpha+m_y^{\beta})+I_{xy}(m_x^{\beta}+m_y^{\beta}tg\alpha)]\rho V^2Sl;$$
$$a_3=-0{,}5(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2)^{-1}[I_{xx}(-m_x^{\delta_н}tg\alpha+m_y^{\delta_н})+$$
$$+I_{xy}(m_x^{\delta_н}+m_y^{\delta_н}tg\alpha)]\rho V^2Sl;$$
$$a_4=-0{,}5c_z^{\beta}\rho VSm^{-1};$$
$$a_5=a_3\sin\alpha-0{,}5(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2)^{-1}[I_{yy}(m_x^{\delta_н}\cos\alpha+m_y^{\delta_н}\sin\alpha)+$$
$$+I_{xy}(m_y^{\delta_н}\cos\alpha-m_x^{\delta_н}\sin\alpha)]\rho V^2Sl;$$
$$a_6=a_1\sin\alpha-0{,}25(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2)^{-1}[I_{yy}(m_x^{\bar\omega_y}\cos\alpha+m_y^{\bar\omega_y}\sin\alpha)+$$
$$+I_{xy}(m_y^{\bar\omega_y}\cos\alpha-m_x^{\bar\omega_y}\sin\alpha)]\rho VSl;$$
$$a_7=-0{,}5c_z^{\delta_н}\rho VSm^{-1}; \qquad a_8=\cos\alpha;$$
$$a_9=tg\,\vartheta\cos\gamma; \qquad a_{10}=\sec\alpha;$$
$$b_1=b_6\sin\alpha-0{,}25(I_{xx}I_{yy}-I_{xy})^{-1}\{I_{yy}[(m_x^{\bar\omega_x}\cos^2\alpha+m_y^{\bar\omega_y}\sin^2\alpha)+$$
$$+(m_x^{\bar\omega_y}+m_y^{\bar\omega_x})\sin\alpha\cdot\cos\alpha]+I_{xy}[m_y^{\bar\omega_x}\cos^2\alpha-m_x^{\bar\omega_x}\sin^2\alpha+$$
$$+(m_y^{\bar\omega_y}-m_x^{\bar\omega_x})\sin\alpha\cos\alpha]\}\rho VSl^2;$$
$$b_2=a_2\sin\alpha-0{,}5(I_{xx}I_{yy}-I_{xy}^2)^{-1}[I_{yy}(m_x^{\beta}\cos\alpha+m_y^{\beta}\sin\alpha)+$$
$$+I_{xy}(m_y^{\beta}\cos\alpha-m_x^{\beta}\sin\alpha)\rho V^2Sl;$$

$$b_3 = b_5 \sin\alpha - 0{,}5(I_{xx} - I_{xy})^{-1}[I_{yy}(m_x^{\delta_э}\cos\alpha + m_y^{\delta_э}\sin\alpha) +$$

$$+ I_{xy}(m_y^{\delta_э}\cos\alpha - m_{x_0}^{\delta_э}\sin\alpha)]\rho V^2 S l;$$

$$b_4 = \frac{g}{V};$$

$$b_5 = -0{,}5(I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2)^{-1}[I_{xx}(-m_x^{\delta_э} tg\alpha + m_y^{\delta_э}) + I_{xy}(m_x^{\delta_э} + m_y^{\delta_э} tg\alpha)] \times$$

$$\times \rho V^2 S l;$$

$$b_6 = -0{,}25 \sec\alpha (I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2)^{-1}\{[\,[(m_y^{\bar\omega_y} - m_x^{\bar\omega_x})\sin\alpha\cos\alpha -$$

$$+ m_x^{\bar\omega_x}\sin^2\alpha + m_y^{\bar\omega_x}\cos^2\alpha] + I_{xx}[m_x^{\bar\omega_x}\cos^2\alpha +$$

$$+ m_y^{\bar\omega_y}\sin^2\alpha + (m_x^{\bar\omega_y} + m_y^{\bar\omega_x})\sin\alpha\cdot\cos\alpha]\}\rho V S l^2;$$

$$b_7 = \sin\alpha;$$

$$b_8 = \omega_z tg\vartheta;$$

$$b_9 = c_4 \Delta\alpha.$$

Примерные диапазоны изменения величин коэффициентов уравнений движения ЛА (2.I) по режимам его полета равны:

$c_1 = 0{,}1 \div 1{,}8$;	$b_1 = 0{,}3 \div 1{,}5$;
$c_2 = -0{,}05 \div 8{,}0$;	$b_2 = 0{,}8 \div 18{,}0$;
$c_3 = 0{,}3 \div 4{,}0$;	$b_3 = 0{,}6 \div 60$;
$c_4 = 0{,}08 \div 2{,}0$;	$b_4 = 0{,}012 \div 0{,}1$;
$c_5 = 0 \div 0{,}7$;	$b_5 = -3{,}0 \div 0{,}8$;
$c_6 = 1{,}3 \div 16$;	$b_6 = -0{,}01 \div 0{,}2$;
$c_7 = 0{,}1712$;	$b_7 \cong 0 \div 0{,}5$;
$c_8 = 0{,}005 \div 0{,}8$;	$b_8 = \omega_z tg\vartheta$,
$c_9 = 0{,}014 \div 0{,}25$;	$b_9 = c_4 \Delta\alpha$.
$c_{10} \cong 0$ (для $Г.П.$);	
$c_{11} \cong 0$ (для $Г.Л.$);	

$$e_1 = -0{,}03 \div 0{,}025;$$
$$e_2 = 0{,}004 \div 0{,}15;$$
$$e_3 = 0{,}003 \div 0{,}08;$$
$$a_1 = 0{,}03 \div 0{,}6;$$
$$a_2 = 0{,}4 \div 4{,}0;$$
$$a_3 = 0{,}3 \div 8{,}5;$$
$$a_4 = 0{,}03 \div 0{,}8;$$
$$a_5 = 0{,}1 \div 15{,}0;$$
$$a_6 = 0{,}03 \div 3{,}0;$$
$$a_7 = 0{,}002 \div 0{,}08;$$
$$a_8 = \cos\alpha,$$
$$a_9 = tg\vartheta \cdot \cos\gamma;$$
$$a_{10} = \sec\alpha.$$

В ряде случаев стационарная модель движения ЛА (2.I) допускает дальнейшие упрощения: продольное движение ЛА при коэффициенте $c_2 > 0$ (производная $m_z^{c_y} < 0$) может быть представлено в виде изолированных короткопериодического и длиннопериодического движений, а боковое движение при выполнении условия

$$b_1(a_1 a_4 + a_2) - b_2 b_6 + a_1 b_2 b_7 - a_6(a_4 b_6 + a_2 b_7) \geq 9 b_2 b_4$$

в виде "быстрого" бокового движения в углах рыскания - скольжения - крена (без учета спиральной составляющей $b_4 \cong 0$) и при

$$b_1(a_1 a_4 + a_2) \geq 9[a_1 b_2 b_7 - b_2 b_6 - a_6(a_4 b_6 + a_2 b_7)] \qquad (2.2)$$

в виде изолированных "быстрых" движений в углах рыскания - скольжения и по углу крена.

Для упрощенных движений ЛА матрицы A_i, x_i, B_i и u_i имеют вид:

для короткопериодического продольного движения ЛА ($\Delta V = 0$)

$$A_{пк} = \begin{Vmatrix} -c_1' & -c_2' & 0 & -c_{10}' \\ 1 & c_4 & 0 & -c_{10} \\ 0 & -c_6 & 0 & c_6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \qquad B_{пк} = \begin{Vmatrix} -c_3 \\ -c_9 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

$$x^T_{пк}(t) = \| \omega_z(t) \quad \alpha(t) \quad \Delta H(t) \quad \vartheta(t) \|$$

$$u^T_{пк}(t) = \| \delta_в(t) \|$$

для длиннопериодического продольного движения (при $c_2 > 0$)

$$A_{пД} = \left\| \begin{matrix} \cancel{0} & -c_4 & -e_3 & 0 & 0 \\ \cancel{1} & -c_2 & +e_2 & 0 & -c_{10} \\ \cancel{0} & -c_8 & -e_1 & 0 & -c_7 \\ \cancel{0} & c_6 & c_{11} & 0 & -c_6 \\ \cancel{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right\| \qquad B^T_{пД} = \left\| \begin{matrix} -c_9 & c_9 & 0\,0\,0 \\ c_5 & r_1 & r_2\,0\,0 \end{matrix} \right\| \quad C_3' \cdot -C_3''$$

$$x^T_{пД}(t) = \| \omega_z(t) \quad \cancel{\alpha(t)}\ \Delta\vartheta(t) \quad \Delta V(t) \quad \Delta H(t) \quad \cancel{\Delta\vartheta(t)} \|$$

$$u_{пД}(t) = \| \delta_в(t) \quad \delta_{c.r}(t) \|$$

для бокового движения рыскания – скольжения ($\gamma(t) \triangleq 0$)

$$A_{БРС} = \left\| \begin{matrix} a_8 & -a_4 \\ -a_1 & -a_2 \end{matrix} \right\| \qquad B_{БРС} = \left\| \begin{matrix} -a_7 \\ -a_5 \end{matrix} \right\|$$

$$x^T_{БРС}(t) = \| \beta(t) \quad \omega_y(t) \| \qquad u_{БРС}(t) = \| \delta_н(t) \|$$

для бокового движения по крену ($\beta(t) \triangleq 0$)

$$A_{БК} = \left\| \begin{matrix} -b_1 & -a_6 & 0 & 0 \\ -b_2 & -a_1 & 0 & 0 \\ 1 & -a_9 & b_8 & 0 \\ 0 & a_{10} & -b_9 & 0 \end{matrix} \right\| \qquad B_{БК} = \left\| \begin{matrix} -b_3 \\ -b_5 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right\|$$

$$x^T_{Б\gamma}(t) = \| \omega_x(t) \quad \omega_y(t) \quad \gamma(t) \quad \gamma(t) \|$$

$$u^T_{Б\gamma}(t) = \| \delta_э(t) \|$$

Глава 3. ПЕРВИЧНЫЕ ЗАКОНЫ УПРАВЛЕНИЯ АП

В учебном пособии в качестве координат управления (стабилизации) рассмотрены: $\Delta\hat{n}_y$ – приращение нормальной перегрузки; $\hat{\vartheta}(t)$ – угол тангажа; $\hat{\gamma}(t)$ – угол крена; $\hat{\psi}(t)$ – угол курса,

$$\Delta\hat{n}_y = \hat{n}_y - 1. \tag{3.1}$$

При формировании закона управления АП электрические сигналы $\Delta n_y(t), \vartheta(t), \gamma(t)$ и $\psi(t)$, пропорциональные текущим величинам

приращения нормальной перегрузки $\Delta\hat{n}_y(t)$, углам тангажа $\hat{\vartheta}(t)$, крена $\hat{\gamma}(t)$ и курса $\hat{\psi}(t)$, поступают в схему АП с соответствующих датчиков первичной информации (ДПИ), а именно: датчика линейного ускорения (ДЛУ или акселерометра), датчика угловых скоростей (ДУС), гировертикали (ГВ) и курсовой системы (КС).

Таким образом, разработчик АП оперирует не самими параметрами движения ЛА ($\Delta\hat{n}_y(t), \hat{\omega}_z(t)$ и т.д.), а их электрическими аналогами – выходными сигналами ДПИ: $\Delta n(t), \omega_z(t)$ и т.д. В первом приближении связь между действительным значением параметра движения ЛА и его электрическим аналогом с учетом динамических характеристик ДПИ в операторной форме записывается следующим образом:

$$\Delta n_y(s) \cong \frac{K_{ДЛУ}}{T^2_{ДЛУ} s^2 + 2\xi_{ДЛУ} T_{ДЛУ} s + 1} \cdot \Delta\hat{n}_y(s); \tag{3.2}$$

$$\omega_k(s) \cong \frac{K_{ДУС}}{T^2_{ДУС} s^2 + 2\xi_{ДУС} T_{ДУС} s + 1} \hat{\omega}_k(s), \quad k = x, y, z; \tag{3.3}$$

$$\vartheta(s) \cong K_{ГВ} \cdot \hat{\vartheta}(s); \tag{3.4}$$

$$\gamma(s) \cong K'_{ГВ} \hat{\gamma}(s); \tag{3.5}$$

$$\Delta\psi(s) \cong K_{КС} \Delta\hat{\psi}(s). \tag{3.6}$$

При правильно подобранных динамических характеристиках ДПИ, например при собственной частоте ДПИ, равной

$$\left.\begin{aligned} \Omega_{ДЛУ} &\geq (8 \div 10)\,\Omega_{\alpha ЛА}, \\ \Omega_{ДУС} &\geq (8 \div 10)\,\Omega_{\alpha ЛА}; \\ \Omega_{ДУС} &\geq (8 \div 10)\,\Omega_{\beta ЛА}, \end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

где $\Omega_{ДЛУ} = 1/T_{ДЛУ}$; $\Omega_{ДУС} = 1/T_{ДУС}$,

влиянием динамики ДПИ на качество управления системы "ЛА – АП" можно пренебречь. Тогда допустимо принять, что

$$\Delta n_y(s) \approx K_{ДЛУ} \Delta\hat{n}_y(s), \tag{3.8}$$

$$\omega_k(s) \approx K_{ДУС} \hat{\omega}_k(s). \tag{3.9}$$

Заданные сигналы $\Delta n_{y\,зад}(t), \vartheta_{зад}(t), \gamma_{зад}(t)$ и т.д. –

электрические аналоги параметров $\Delta \hat{n}_{y\,зад}(t)$, $\hat{\vartheta}_{зад}(t)$, $\hat{\gamma}_{зад}(t)$ и т.д. – вводят в АП от соответствующих задатчиков, причем

$$\Delta n_{y\,зад}(t) \cong K_{\Delta n y_0} \cdot \Delta \hat{n}_{y\,зад}(t); \qquad (3.10)$$
$$\vartheta_{зад}(t) \cong K_{г.в}\, \hat{\vartheta}_{зад}(t).$$

Автопилот стабилизации и управления приращением нормальной перегрузки (АП $_{n_y}$) имеет, как правило, сервопривод с жесткой обратной связью (СПЖОС), поэтому первичный закон управления АП $_{n_y}$ формируется как интегральный закон, который в операторной форме записывается как

$$\delta_в = W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu\omega_z + i_{n_y}\Delta n_y + \frac{\nu_{n_y}}{s}(\Delta n_y - \Delta n_{y\,зад})\right] \qquad (3.11)$$

или

$$\delta_в = W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu\omega_z + i_{n_y}(\Delta n_y - \Delta n^*_{y\,зад}) + \frac{\nu_{n_y}}{s}(\Delta n_y - \Delta n^*_{y\,зад})\right], \qquad (3.12)$$

где $W_{сп}^{жос}(s)$ – передаточная функция сервопривода с жесткой обратной связью,

$$\Delta n^*_{y\,зад} = \frac{1}{T_ф s + 1}\,\Delta n_{y\,зад};$$
$$\mu, \frac{град \cdot \delta_в}{град/с \cdot \omega_z}; \quad i_{n_y}, \frac{град \cdot \delta_в}{ед \cdot \Delta n_y}; \quad \nu_{n_y} = \frac{град/с \cdot \delta_в}{ед \cdot \Delta n_y} \qquad (3.13)$$

– передаточные числа АП $_{n_y}$ по сигналам угловой скорости ЛА $\omega_z(t)$, отклонению и интегралу отклонения приращения нормальной перегрузки от ее заданного значения;

$T_ф$ – постоянная времени фильтра нижних частот в цепи сигнала $\Delta n_{y\,зад}$. Интегральный член $\frac{\nu_{n_y}}{s}(\Delta n_y - \Delta n^*_{y\,зад})$ введен в закон управления АП $_{n_y}$ для обеспечения астатизма вывода системы "ЛА – АП $_{n_y}$" на заданное значение приращения нормальной перегрузки. Член $\mu\omega_z$ обеспечивает требуемое демпфирование системы "ЛА – АП $_{n_y}$" в переходных процессах.

Сервопривод автопилота стабилизации и управления углом тангажа ЛА может быть с жесткой (СПЖОС), скоростной (СПСОС) и изодромной (СПИОС) обратными связями.

Первичные законы управления АП имеют вид

$$\delta_в \cong W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu\omega_z + i_\vartheta(\vartheta - \vartheta_{зад})\right]; \qquad (3.14)$$

$$\delta_в = W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_\vartheta\omega_z + \nu_в\frac{T_\vartheta s + 1}{s}\left(\vartheta - \frac{1}{T_ф s + 1}\vartheta_{зад}\right)\right], \qquad (3.15)$$

где $\nu_в$ – передаточное число АП $_\vartheta$ по сигналу интеграла тангажа;

$$T_\vartheta = \frac{i_в}{\nu_в}. \qquad (3.16)$$

<u>АП$_\vartheta$ сос</u>

$$\delta_в \cong W_{сп}^{сос}(s)\left[\mu_\vartheta s\,\omega_z + i_в\omega_z + \nu_в(\vartheta - \vartheta_{зад})\right] \qquad (3.17)$$

(сигнал производной $\mu_в s\omega_z$ вводится в закон управления для устранения колебаний системы "ЛА – АП$_\vartheta$" по углу тангажа в переходном режиме);

<u>АП$_\vartheta$ иос</u>

$$\delta_в \cong W_{сп}^{иос}(s)\left[\mu_в\omega_z + i_в(\vartheta - \vartheta_{зад})\right]. \qquad (3.18)$$

Автопилот стабилизации бокового движения ЛА состоит из двух каналов: канала руля направления (иногда его не совсем точно называют каналом курса) и канала элеронов (который также не совсем точно называют каналом крена).

Классификация автопилотов стабилизации бокового движения связана с характером автоматического управления ЛА по курсу. Если позиционный сигнал курса поступает только в канал руля направления, то автопилот называется автопилотом прямой схемы. Если позиционный сигнал курса поступает только в канал элеронов, то автопилот называется автопилотом перекрестной схемы, и если сигнал курса поступает в оба канала, то автопилот называется автопилотом смешанной схемы.

В общем случае наиболее распространенные законы управления записываются в следующем виде.

Для АП прямой схемы –
при СП жос

$$\delta_э = W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_э\omega_x + i_э(\gamma - \gamma_{зад})\right], \qquad (3.19)$$

$$\delta_н = W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_н\omega_y + i_н(\psi - \psi_{зад})\right], \qquad (3.20)$$

$$\delta_э = W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_э\omega_x + i_э(\gamma-\gamma_{зад}) + \frac{\nu_э}{s}(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.21)$$

$$\delta_н \cong W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_н\omega_y + i_н(\psi-\psi_{зад}) + \frac{\nu_н}{s}(\psi-\psi_{зад})\right], \qquad (3.22)$$

$$\delta_э \cong W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_э\omega_x + i_э\gamma + \frac{\nu_э}{s}(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.23)$$

$$\delta_н \cong W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_н\omega_y + i_н\psi + \frac{\nu_н}{s}(\psi-\psi_{зад})\right]; \qquad (3.24)$$

при СП СОС:

$$\delta_э \cong W_{сп}^{сос}(s)\left[\mu_э^* s\omega_x + i_э^*\omega_x + \nu_э^*(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.25)$$

$$\delta_н \cong W_{сп}^{сос}(s)\left[\mu_н^* s\omega_y + i_н^*\omega_y + \nu_н^*(\gamma-\gamma_{зад})\right]; \qquad (3.26)$$

при СП ИОС

$$\delta_э \cong W_{сп}^{иос}(s)\left[\mu_э\omega_x + i_э(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.27)$$

$$\delta_н \cong W_{сп}^{иос}(s)\left[\mu_н\omega_y + i_н(\psi-\psi_{зад})\right]. \qquad (3.28)$$

Для перекрестной схемы -

при АП ЖОС:

$$\delta_э \cong W_{сп}^{жос}(s)\left[\mu_э\omega_x + i_э(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.29)$$

$$\delta_н \cong W_{АБУ}(s)\beta, \qquad (3.30)$$

где

$$\gamma_{зад} = \frac{i_э^{\psi}}{T_ф s+1}(\psi-\psi_{зад}); \qquad (3.31)$$

при СП СОС:

$$\delta_э \cong W_{сп}^{сос}(s)\left[\mu_э^* s\omega_x + i_э^*\omega_x + \nu^*(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.32)$$

$$\delta_н \cong W_{АБУ}(s)\beta,$$

где

$$\gamma_{зад} = \frac{i_э^{\psi}}{T_ф s+1}(\psi-\psi_{зад}); \qquad (3.33)$$

при СП ИОС:

$$\delta_э \cong W_{сп}^{иос}(s)\left[\mu_э\omega_x + i_э(\gamma-\gamma_{зад})\right], \qquad (3.34)$$

$$\delta_н \cong W_{АБУ}(s)\beta,$$

где

$$\gamma_{зад} = \frac{i_э^{\psi}}{(T_ф s+1)(T_и s+1)}(\psi-\psi_{зад}). \qquad (3.35)$$

Интегральные законы управления (3.23)-(3.24) отличаются от законов (3.21)-(3.22) только цепями прохождения сигнала $\gamma_{зад}$.

Канал руля направления автопилота перекрестной схемы является либо демпфером рыскания, либо статическим или астатическим автоматом управления (АБУ).

Из всех трех вышеприведенных типов автопилотов стабилизации бокового движения наибольшее распространение получили автопилоты перекрестной схемы. Автопилоты прямой схемы используются лишь для решения специальных задач, связанных с плоским движением ЛА, когда ЛА жестко стабилизируется по крену (например, при аэрофотосъемке). Автопилоты смешанной схемы в настоящее время практически не разрабатываются.

Глава 4. ОБЩИЙ ПРИНЦИП СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ АП

В основу решения всей совокупности вопросов, связанных с синтезом минимально-функциональной структуры (МФС) АП, положен принцип эквивалентности динамических систем с точностью до наперед заданной малой величины (рис. I).

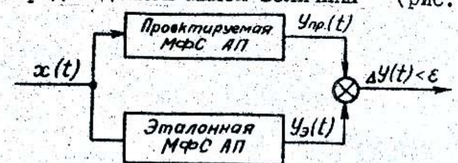

Рис. I. К принципу эквивалентности динамических систем

На основании этого принципа при проектировании вводят эталонную минимально-функциональную структуру АП (ЭМФС АП), которая формально идентична структуре проектируемого АП, но ее параметры удовлетворяют требованиям технического задания по показателю качества.

Параметрическая оптимизация первичной МФС АП в общем случае может быть осуществлена численными или аналитическими методами.

В дальнейшем используются аналитические методы, разработанные авторами на базе частотных методов, методов модального управления и доведенные до простых, проверенных на практике, расчетных формул и алгоритмов.

При стационарной линейной модели ЛА исследование движения системы "ЛА – АП" осуществляется путем анализа ее движения на ряде последовательных во времени "замороженных" режимов полета. Такой подход правомочен при изучении динамики подобных систем, так как в этом случае коэффициенты линеаризованной системы изменяются в течение времени регулирования по координате управления незначительно, а сама система обладает достаточным запасом устойчивости.

Качество работы АП оценивают на каждом режиме полета ЛА по переходной функции системы "ЛА – АП" $H(t)$. С этой целью задают время регулирования $t_{рег\,зад}$, величину перерегулирования $\sigma_{зад}\,\%$, точность стабилизации $\pm\Delta_{зад}$.

Систему "ЛА – АП", переходная функция которой $H_э(t)$ удовлетворяет заданным требованиям, принимают за эталонную.

В первом приближении передаточные функции сервоприводов с различными связями можно представить следующим образом:

сервопривод с ЖОС[ж)]

$$W_{сп}^{жос}(s) \cong \frac{1}{(T_{ж}^2 s^2 + 2\xi_{ж} T_{ж} s + 1)}; \qquad (4.1)$$

сервопривод с СОС

$$W_{сп}^{сос}(s) \cong \frac{1}{s(T_c s + 1)}; \qquad (4.2)$$

сервопривод с ИОС

$$W_{сп}^{иос}(s) \cong \frac{T_n s + 1}{T_n s(T_{1n}^2 s^2 + 2\xi_{1n} T_{1ц} s + 1)}, \qquad (4.3)$$

причем, как правило, $\xi_{ж}(n)$ и ξ_{1n} лежат в пределах $0{,}5 \le \xi_i \le 0{,}7$.

Если на рабочих частотах системы "ЛА – АП" частотная характеристика сервопривода будет иметь $L_m \le$ 0,2 дБ и фазовый сдвиг $\Delta\varphi \le -15^{\circ}$, то динамикой звеньев сервопривода, стоящих в скобках, при расчете величин передаточных чисел можно пренебречь.

Следовательно, если выполняются соотношения

$$\Omega_{сп} \ge (8 \div 10)\,\Omega_{\vartheta\,ЛА}, \qquad (4.4)$$

ж) Коэффициенты усилений сервоприводов учитывают в величинах передаточных чисел АП.

где $\Omega_{сп} = \frac{1}{T_{сп}}$; $\Omega_{\vartheta\,ЛА}$ – максимальное значение собственной частоты возмущенного движения "свободного" ЛА для рассматриваемых режимов полета, то выражения для передаточных функций сервоприводов примут вид

$$W_{сп}^{жос}(s) \simeq 1; \qquad (4.5)$$

$$W_{сп}^{сос}(s) \simeq \frac{1}{s}; \qquad (4.6)$$

$$W_{сп}^{иос}(s) \simeq \frac{T_n s + 1}{T_n s}. \qquad (4.7)$$

Глава 5. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ АП

Вывод ЛА на заданную перегрузку и заданный угол тангажа осуществляется соответственно за время $t_{рег\,n_y} \cong 1{\div}2$ с и $t_{рег\,\vartheta} = 3{\div}5$ с, тогда как период колебаний длиннопериодического движения "свободного" ЛА составляет $T_{\vartheta} \cong 60{\div}120$ с. Поэтому за время установления нового значения перегрузки и нового угла тангажа скорость полета практически измениться не успевает. Следовательно, расчет величин передаточных чисел $АП_{n_y}$ и $АП_{\vartheta}$ допустимо проводить, используя только уравнения короткопериодического возмущенного движения, присоединяя к ним закон управления автопилота.

Автопилот стабилизации нормальной перегрузки

При расчете величин передаточных чисел $АП_{n_y}$, если не оговорено в ТЗ, обычно принимают в качестве заданных параметров переходной функции $H_э(t)$ следующие значения:

$$t_{рег\,зад} = 1{\div}2\,с; \quad \sigma_{n_y\,зад} \le 5\,\%; \quad \Delta_{n_y} = \pm 0{,}05\,\Delta n_{y\,зад}.$$

Закон управления (3.11)

Структурная схема системы "ЛА – $АП_{n_y}$" изображена на рис. 2.

Передаточная функция разомкнутой по единичной обратной связи системы, изображенной на рис. 2, на единичное управляющее возмущение имеет вид

$$W_{\frac{\Delta n_y}{\Delta n_{y\,зад}}}(s) = \frac{K_1}{s(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)}, \qquad (5.1)$$

где

$$T_1 = \frac{T_\alpha}{\sqrt{1 + \mu_з K_c + i_{n_y} K_c c_6 g^{-1}}}; \tag{5.2}$$

$$K_1 = \frac{\nu_{n_y} K_c c_6 g^{-1}}{1 + \mu_з K_c + i_{n_y} K_c c_6 g^{-1}}; \tag{5.3}$$

$$\zeta_1 = \frac{2\zeta_\alpha T_\alpha + \mu_з K_c T_v}{2 T_\alpha \sqrt{1 + \mu_з K_c + i_{n_y} K_c c_6 g^{-1}}}; \tag{5.4}$$

$$\left.\begin{aligned} T_\alpha &= \frac{1}{\Omega_\alpha}; \\ \Omega_\alpha &= \sqrt{c_1 c_4 + c_2}; \\ K_c &= \frac{c_3 c_4}{c_1 c_4 + c_2}; \\ T_v &= \frac{1}{c_4} \\ \xi_\alpha &= \frac{c_1 + c_4 + c_5}{2\sqrt{c_1 c_4 + c_2}}. \end{aligned}\right\} \tag{5.5}$$

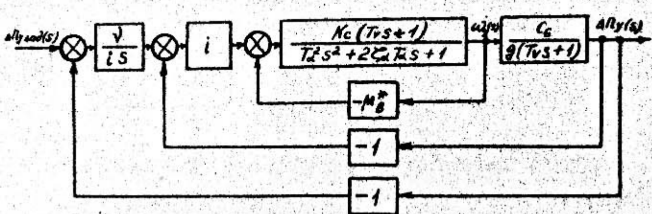

Рис. 2. Структурная схема системы "ЛА – АП$_{ny}$"

Передаточную функцию разомкнутой эталонной системы зададим в виде

$$W_э(s) = \frac{K_э}{s(T_э^2 s^2 + 2\zeta_э T_э s + 1)}, \tag{5.6}$$

причем ЛАФЧХ этой эталонной системы изображена на рис. 3 и ее параметры удовлетворяют следующим соотношениям:

$$4\omega_{cэ} T_э = 1;\ \zeta_э = 1;\ K_э = \omega_{cэ};\ \omega_{cэ} t_{рег.зад} \cong 3. \tag{5.7}$$

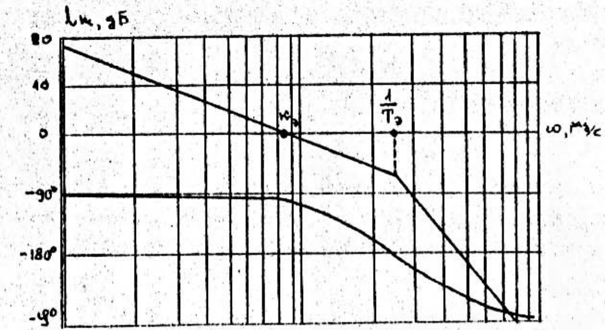

Рис. 3. ЛАФЧХ эталонной системы

Тогда, если $K_1 = K_э$, $T_1 = T_э$ и $\zeta_1 = \zeta_э$, совместное решение соотношений (5.2)-(5.7) приводит к следующим выражениям для расчета передаточных чисел проектируемого АП$_{n_y}$ с законом управления (3.II):

$$\nu_{n_y} = \frac{432 T_\alpha g}{K_c c_6 t^3_{рег.зад}} = \frac{432 g}{c_3 c_4 c_6 t^3_{рег.зад}}; \tag{5.8}$$

$$t_{n_y} = \frac{g(144 T_\alpha^2 - t^2_{рег.зад} - \mu_в K_c t^2_{рег.зад})}{K_c c_6 t^2_{рег.зад}} = \frac{144 - (c_1 c_4 + c_2) t^2_{рег.зад} - \mu_в c_3 c_4 t^2_{рег.зад}}{g^{-1} c_3 c_4 c_6 t^2_{рег.зад}}; \tag{5.9}$$

$$\mu_\beta = \frac{24 T_\alpha^2 - 2\xi_\alpha T_\alpha t_{рег.зад}}{K_c T_v t_{рег}} = \frac{24 - (c_1 + c_4 + c_5)}{c_3 t_{рег}}. \tag{5.10}$$

Закон управления АП$_{n_y}$ (3.I2)

Структурная схема системы "ЛА – АП$_{n_y}$" для данного случая изображена на рис. 4.

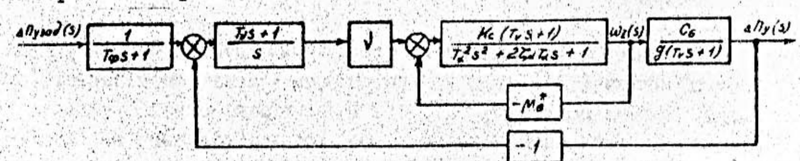

Рис. 4. Структурная схема системы "ЛА – АП$_{ny}$"

Нетрудно видеть, что передаточная функция разомкнутой по единичной обратной связи системы на единичное управляющее возмущение совпадает с передаточной функцией (5.I). Поэтому передаточные числа АП n_y с законом управления (3.I2) рассчитывают по формулам (5.8)-(5.I0).

Автопилот угла тангажа

При расчете параметров АП$_\vartheta$, если в ТЗ не заданы требования к переходной функции системы "ЛА - АП" $h_\vartheta(t)$, обычно принимают в качестве заданных значений $h_\vartheta(t)$ следующие:

$$t_{рег\,\vartheta} = 3\div5;\quad \sigma_\vartheta \le 5\%\,\vartheta_{зад};\quad \Delta_\vartheta = \pm 0{,}05\,\vartheta_{зад}.$$

Автопилот угла тангажа с жесткой обратной связью

Статический закон управления (3.I4)

Структурная схема системы "ЛА - АП$_\vartheta$" изображена на рис. 5.

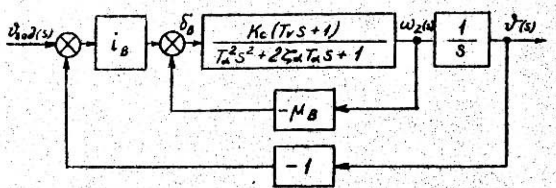

Рис. 5. Структурная схема системы "ЛА - АП$_\vartheta$ ЖОС"

Передаточная функция замкнутой по сигналу угла тангажа системы имеет вид

$$\Phi_{\vartheta_{зад}}^{\vartheta}(s) = \frac{i K_c(T_v s+1)}{(A_0 s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3)}, \tag{5.II}$$

где $T_v = \frac{1}{c_4}$; $A_0 = T_\alpha^2$; $A_1 = 2\xi_\alpha T_\alpha + \mu_в K_c T_v$;

$A_2 = 1 + \mu_в K_c + i_в K_c T_v$, $A_3 = i_в K_c$.

Функция (5.II) является передаточной функцией с "неуправляемым" нулем ($\lambda = -c_4$) и не обладает астатизмом первого порядка, причем всегда $T_v > T_\alpha$. Нуль передаточной функции (4.I3) является ненаблюдаемым, поэтому его величина на конкретном режиме полета неизвестна и не может быть измерена. Как пра-

вило, постоянная величина времени T_v в зависимости от режима полета самолета изменяется около I0 раз. Поэтому скомпенсировать влияние нуля на переходную функцию практически не удается, и задают такую эталонную систему, передаточная функция которой для замкнутого контура управления при единичном управляющем возмущении имеет вид

$$\Phi_э(s) = \frac{K_э(T_v s+1)}{(A_{0э}s^3 + A_{1э}s^2 + A_{2э}s + K_э)}. \tag{5.I2}$$

Передаточная функция разомкнутой эталонной системы в соответствии с (5.I2) записывается как

$$W_э(s) = \frac{K_э(T_v s+1)}{s(A_{0э}s^2 + A_{1э}s^2 + A'_{2э})}, \tag{5.I3}$$

причем всегда

$$\left|\sqrt{\frac{A'_{2э}}{A_{0э}}}\right| > \frac{1}{T_v},$$

где

$$A'_{2э} = A_{2э} - K_э T_v.$$

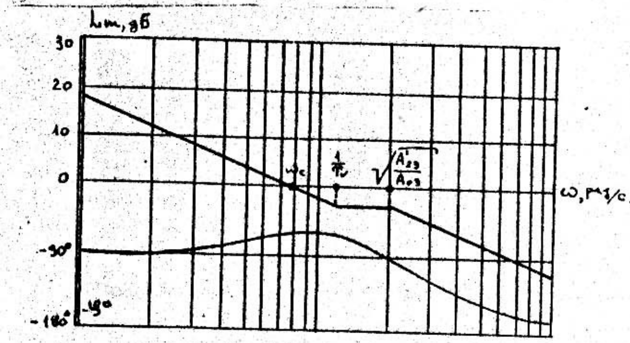

Рис. 6. ЛАФЧХ эталонной системы

ЛАФЧХ разомкнутой эталонной системы изображена на рис. 6, и для ЛАЧХ выдерживается

$$\frac{K_э}{A'_{2э}} = (0{,}9\div1)\frac{1}{T_v} \tag{5.I4}$$

и

$$\frac{A_{1э}}{2\sqrt{A_{0э}A'_{2э}}} = 1. \tag{5.I5}$$

Выражение (5.I5) соответствует условию, при котором относительный коэффициент затухания колебательного звена передаточной функции (5.I3) равен единице.

Передаточная функция разомкнутой проектируемой системы "ЛА – АП" после замыкания контура управления по цепи сигнала ω_z (см. рис. 5) представляется как

$$W_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{i_в K_c (T_v s+1)}{[T_\alpha^2 s^2 + (2\xi_\alpha T_\alpha + \mu_в K_c T_v)s + 1 + \mu_в K_c]}.$$

Таким образом, из условия $A_{iэ} \triangleq A_{i\,пр}$ получим, что

$$\left.\begin{aligned} K_э &= i_в \cdot K_c ; \\ A_{0э} &= T_\alpha^2 ; \\ A_{1э} &= 2\xi_\alpha T_\alpha + \mu_в K_c T_v ; \\ A'_{2э} &= 1 + \mu_в K_c \end{aligned}\right\} \qquad (5.I6)$$

Тогда по соотношениям (5.I4)-(5.I5) с учетом (5.I6)

$$i_в = \frac{0,9 \div 1}{K'_c \cdot T_v},$$

$$\mu_в = -\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}, \qquad (5.I7)$$

где

$$K'_c = \frac{K_c}{1 + \mu_в K_c},$$

$$a = \frac{4T_\alpha(\xi_\alpha T_v - T_\alpha)}{K_c T_v^2}, \qquad (5.I8)$$

$$b = \frac{4T_\alpha^2(\xi_\alpha - 1)}{K_c^2 T_v^2}.$$

Принимая во внимание (5.5), окончательно запишем

$$i_в = \frac{(0,9 \div 1)(c_1 c_4 + c_2 + \mu_в c_3 c_4)}{c_3}, \qquad (5.I9)$$

$$\mu_в = -\frac{a'}{2} + \sqrt{\frac{(a')^2}{4} - b'}, \qquad (5.20)$$

где

$$a' = \frac{2(c_1 + c_5 - c_4)}{c_3}, \quad b' = \frac{(c_1 + c_4 + c_5)^2 - 4(c_1 c_4 + c_2)}{c_3^2}.$$

Автопилот угла тангажа с ЖОС
/астатический закон управления (3.I5)/

Величину передаточного числа $\mu_в$ определяют, как для АП$_\vartheta$ ЖОС со статическим законом управления (3.I4).

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП", соответствующая структурной схеме (рис. 7), записывается как

$$\Phi_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{\nu_в c_3 c_4 (T_v s+1)(T_\vartheta s+1)}{(A_0 s^4 + A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4)},$$

где $T_\vartheta = \frac{i_в}{\nu_в}$, $A_0 = 1$; $A_1 = c_1 + c_4 + c_5 + \mu_в c_3$; $A_2 = c_1 c_4 + c_2 + \mu_в c_3 c_4 + i_в c_3$; $A_3 = i_в c_3 c_4 + \nu_в c_3$; $A_4 = \nu_в c_3 c_4$.

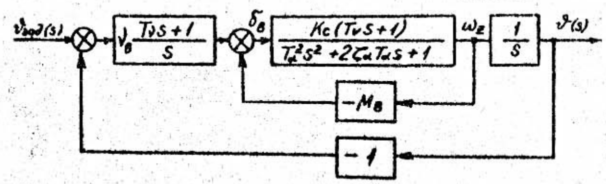

Рис. 7. Структурная схема системы "ЛА – АП$_\vartheta$ ЖОС" (астатический закон управления)

Эта передаточная функция обладает двумя "нулями", один из которых является неуправляемым ($\lambda = -1/T_v$), неидентифицируемым и некомпенсируемым в полете. Поэтому зададим передаточную функцию эталонной системы в виде

$$\Phi_э(s) = \frac{K_э(T_v s+1)(T_\vartheta s+1)}{(A_{0э} s^4 + A_{1э} s^3 + A_{2э} s^2 + A_{3э} s + A_{4э})}, \qquad (5.2I)$$

причем $K_э = A_{4э}$.

Передаточная функция эталонной разомкнутой системы в соответствии с (5.2I) представляется как

$$W_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{\nu K'_c (T_v s+1)(T_\vartheta s+1)}{s^2[(T'_\alpha)^2 s^2 + 2\xi_\alpha T'_\alpha s + 1]}.$$

где $A'_{2э} = A_{2э} - K_э T_v T_э$,

ЛАФЧХ разомкнутой эталонной системы изображены на рис. 8, причем, если $T\left|\sqrt{A'_{2э}}\right| < 10$, то первый излом ЛАЧХ эталонной системы определяется частотой, равной $\frac{1}{T_э}$; при $T_v \left| \sqrt{A'_{2э}} \right| \geq 10$ этот излом определяется частотой, равной $\frac{1}{T_v}$. Для ЛАЧХ эталонной системы выдерживаются следующие соотношения:

при $T_v \left| \sqrt{A'_{2э}} \right| < 10$

$$\left.\begin{aligned} &\omega_к^2 = \frac{\omega_c}{T_э}; \\ &\omega_c \cdot T_v = 0{,}9 \div 1; \\ &T_э \cong 10 T_v; \end{aligned}\right\} \qquad (5.22)$$

при $T_v \left| \sqrt{A'_{2э}} \right| \geq 10$

$$\left.\begin{aligned} &2\omega_c T_э \leq 1; \\ &T_э \cdot \omega_к^2 = \omega_c; \\ &T_v \cong 10 T_э; \\ &\omega_c \cdot t_{per} \approx 2{,}5. \end{aligned}\right\} \qquad (5.23)$$

Для обоих случаев справедливо

$$\omega_к^2 = K_э \qquad (5.24)$$

и

$$\frac{A_{1э}}{2\sqrt{A'_{2э}}} = 1. \qquad (5.25)$$

Выражение (5.25) соответствует условию (5.15).

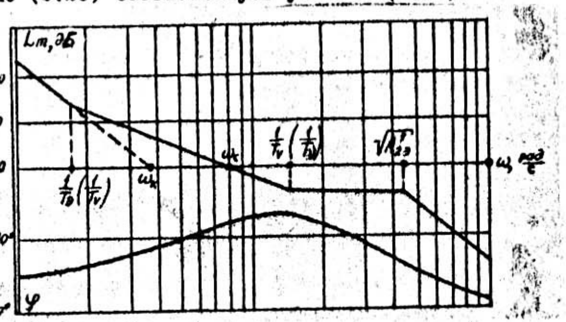

Рис. 8. ЛАФЧХ эталонной системы

Передаточная функция разомкнутой проектируемой системы "ЛА – АП" после замыкания контура управления по цепи сигнала ω_z в соответствии с рис. 7 записывается как

$$W_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{\nu K'_c (T_v s + 1)(T_v s + 1)}{s^2[(T'_\alpha)^2 s^2 + 2\xi'_\alpha T'_\alpha s + 1]}. \qquad (5.26)$$

Тогда из условия $A_{iэ} \triangleq A_{i\,пр}$ получаем

$$\left.\begin{aligned} &K_э = \nu_в K'_c A'_{2э}; \\ &A_{0э} = A'_{2э} \cdot (T'_\alpha)^2; \\ &A_{1э} = 2\xi'_\alpha \cdot T'_\alpha \cdot A'_{2э}, \end{aligned}\right\} \qquad (5.27)$$

причем

$$\left.\begin{aligned} &K'_c = \frac{K_c}{1 + \mu_в K_c}; \\ &T'_\alpha = \frac{T_\alpha}{\sqrt{1 + \mu_в K_c}}; \\ &\xi'_\alpha = \frac{2\xi_\alpha T_\alpha + \mu_в K'_c T_v}{2T_\alpha}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.28)$$

Из совместного решения (5.22)-(5.23) с учетом (5.26)-(5.28) окончательно получаем

при $T_v < 10T'_\alpha$ $\quad i_в = \frac{0{,}9 \div 1}{K'_c T_v}$, $\nu_в = \frac{0{,}09 \div 0{,}1}{K'_c T_v^2}$ или $\nu_в = \frac{i_в}{10 T_v}$;

при $T_v \geq 10T'_\alpha$ $\quad i_в = \frac{0{,}5}{K'_c T_v}$; $\nu_в = \frac{5}{K'_c T_v}$ или $\nu_в = \frac{10 i_в}{T_v}$.

Величина передаточного числа АП$_\vartheta$ по сигналу угловой скорости рассчитывается по выражению (5.20).

Автопилот угла тангажа со скоростной обратной связью (АП$_\vartheta$ СОС)

Структурная схема системы "ЛА – АП$_\vartheta$ СОС" изображена на рис. 9.

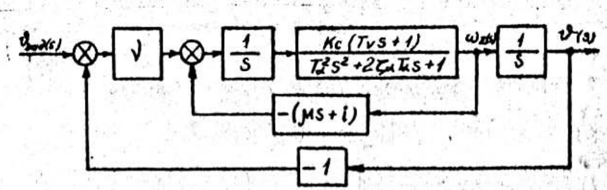

Рис. 9. Структурная схема системы "ЛА – АП$_\vartheta$ СОС"

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_\vartheta$ СОС" имеет вид

$$\Phi_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{\nu c_3 c_4 (T_v s + 1)}{(A_0 s^4 + A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4)}, \qquad (5.29)$$

где $A_0=1,\ A_1=c_1+c_4+c_5+\mu_в c_3,\ A_2=c_1c_4+c_2+\mu_в c_3c_4+$
$+i_в c_3,\ A_3=i_в c_3c_4+\nu_в c_3,\ A_4=\nu_в c_3c_4.$

Эта передаточная функция, как и в рассмотренных выше случаях, обладает одним неуправляемым нулем ($\lambda=-\frac{1}{4}$), который в полете неидентифицируем, и его влияние введением фильтров низких частот в цепь сигнала $\vartheta_{зад}(t)$ некомпенсируемо. Поэтому, как и прежде, зададим передаточную функцию эталонной системы в виде

$$\Phi_э(s)=\frac{K_э(T_v s+1)}{A_{0э}s^4+A_{1э}s^3+A_{2э}s^2+A_{3э}s+A_{4э}}, \qquad (5.30)$$

где $K_э=A_{4э}$.

Передаточная функция разомкнутой по единичной обратной связи эталонной системы на единичное управляющее воздействие с учетом выражения (5.30) записывается как

$$W_э(s)=\frac{K_э(T_v s+1)}{s(A_{0э}s^3+A_{1э}s^2+A_{2э}s+A'_{3э})}, \qquad (5.31)$$

где $A'_{3э}=A_э-K_э T_v$.

Запишем передаточную функцию (5.31) в виде

$$W_э(s)=\frac{K'_э(T_v s+1)}{s(A'_{0э}s^3+A'_{1э}s^2+A'_{2э}s+1)}, \qquad (5.32)$$

где $K'_э=\frac{K_э}{A'_{3э}}$, $A'_{0э}=\frac{A_{0э}}{A'_{3э}}$, $A'_{1э}=\frac{A_{1э}}{A'_{3э}}$ и $A'_{2э}=\frac{A_{2э}}{A'_{3э}}$.

Поскольку характеристический полином (стоящий в скобках) передаточной функции (5.32) – третьего порядка, положим, что малым по абсолютной величине корнем характеристического уравнения $A'_{0э}\lambda^3+A'_{1э}\lambda^2+A'_{2э}\lambda+1=0$ является вещественный корень $\lambda_{1э}$, равный $\lambda_{1э}\cong-\frac{1}{A'_{2э}}$, т.е. $\lambda_{1э}\cong\frac{A'_{3э}}{A'_{2э}}$.

В этом случае передаточная функция (5.32) представлена как

$$W_э(s)=\frac{K'_э(T_v s+1)}{s(T_{1э}s+1)(T^2_{2э}s^2+2\xi_{2э}T_{2э}s+1)}. \qquad (5.33)$$

Здесь $T_{1э}=\frac{1}{\lambda_{1э}}$; $K'_э=\frac{K_э\cdot T^2_{2э}}{|\lambda_{1э}|}$;

$$T^2_{2э}=A'_{0э}\cdot|A_{1э}|=\frac{|\lambda_{1э}|}{A'_{3э}};$$

$$\xi_{2э}=\frac{A'_{1э}-T^2_{2э}}{2T_{1э}T_{2э}}=\frac{A'_{1э}-A'_{0э}|\lambda_{1э}|}{2\sqrt{A'_{0э}|\lambda_{1э}|}}.$$

ЛАФЧХ разомкнутой эталонной системы, согласно (5.33), изображена на рис. 10, причем для нее справедливы следующие соотношения:

$$T_{1э}=(1{,}2\div1{,}4)T_v, \qquad (5.34)$$

$$\xi_{2э}=0{,}7, \qquad (5.35)$$

$K'_э=(1{,}2\div1{,}4)\omega_c$ – для случая А,

$K'_э=\omega_c$ – (5.35')

для случая В.

Ввиду малой протяженности первого участка ЛАЧХ с наклоном $-40\ дБ/дек$ (~0,12 декады) случай А (рис. 10) практически соответствует случаю В.

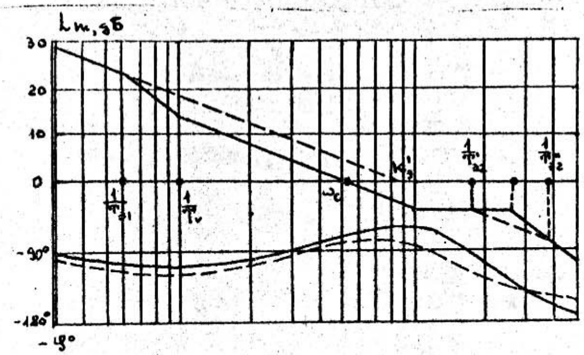

Рис. 10. ЛАФЧХ эталонной системы.

Поскольку протяженность участка ЛАЧХ с наклоном $-20\ дБ/дек$ достаточно большая (без учета первого участка ЛАЧХ с наклоном $-40\ дБ/дек$), то время регулирования эталонной системы определяется следующим выражением:

$$t_{рег}\cong\frac{3}{\omega_c}. \qquad (5.36)$$

Для вывода расчетных формул разомкнем передаточную функцию проектируемой системы (5.29) по единичной обратной связи (рис. 9), т.е. по цепи сигнала угла тангажа

$$W_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{K_y(Ts+1)}{s(A_0' s^3 + A_1' s^2 + A_2' s + 1)},$$

где

$$K_y = \frac{\nu_в}{i_в}, \tag{5.37}$$

$$A_0' = \frac{A_0}{A_3'} = \frac{(T_\alpha')^2}{i_в K_c'} = \frac{1}{i_в c_3 c_4},$$

$$A_1' = \frac{A_1}{A_3'} = \frac{2\xi_\alpha' T_\alpha'}{i_в K_c'} = \frac{c_1 + c_4 + c_5 + \mu_в c_3}{i_в c_3 c_4},$$

$$A_2' = \frac{A_2}{A_3'} = \frac{1 + K_c' T_v}{i_в K_c'} = \frac{c_1 c_4 + c_2 + \mu_в c_3 c_4 + i_в c_3}{i_в c_3 c_4};$$

здесь $K_c' = \frac{c_3 c_4}{c_1 c_4 + c_2 + \mu_в c_3 c_4}$; $T_\alpha' = \frac{1}{\sqrt{c_1 c_4 + c_2 + \mu_в c_3 c_4}}$;

$$\xi_\alpha' = \frac{c_1 + c_4 + c_5 + \mu_в c_3}{2\sqrt{c_1 c_4 + c_2 + \mu_в c_3 c_4}}.$$

Поскольку, как правило, $\mu_в c_3 c_4 \ll i_в c_3$, то в первом приближении допустимо представить коэффициент A_2' как

$$A_2' \cong \frac{c_1 c_4 + c_2 + i_в c_3}{i_в c_3 c_4} = \frac{1 + i_в K_c T_v}{i K_c}, \tag{5.38}$$

где K_c - см. в (5.5).
Тогда из условия $A'_{i3} \triangleq A'_{i пр}$ и $K_э' \triangleq K_y$ получаем

$$K_э = K_y = \frac{i_в}{\mu_в},$$

$$|\lambda_{1э}| = \frac{i_в K_c}{1 + i_в K_c T_v}, \tag{5.39}$$

$$\zeta_{2э} = \frac{2\xi_\alpha' T_\alpha' - (T_\alpha')^2 |\lambda_{1э}|}{2\sqrt{\frac{i_в c_3 c_4}{|\lambda_{1э}|}}}; \tag{5.40}$$

Из совместного решения (5.34), (5.35) и (5.39) получаем

$$i_в = \frac{2,5 \div 5,0}{K_c \cdot T_v}$$

или

$$i_в = (2,5 \div 5)\,\frac{c_1 c_4 + c_2}{c_3}. \tag{5.41}$$

Из решения (5.35) и (5.40)

$$\mu_в = \frac{(0,7 \div 0,83)c_4 + (1,7 \div 1,6)\sqrt{i_в c_3} - (c_1 + c_4 + c_5)}{c_5},$$

где $i_в$ определяется выражением (5.41), а цифры в скобках соответствуют: первые $|\lambda_{1э}| = 1/1,4T_v$, вторые $|\lambda_{1э}| = 1/1,2T_v$.
Из совместного решения (5.35) или (5.35'), (5.36), (5.37) и (5.38) имеем: для случая A $\nu = \frac{3,6 \div 4,2}{t_{per}} \cdot i_в$, для случая B

$$\nu = \frac{3}{t_{per}} \cdot i_в.$$

Автопилот угла тангажа с изодромной обратной связью (АП$_\vartheta$ ИОС)

Структурная схема системы "ЛА – АП$_\vartheta$ИОС" изображена на рис. 11.

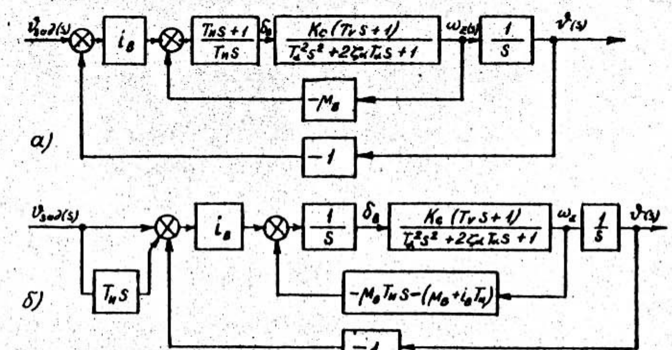

Рис. 11. Структурная схема системы "ЛА – АП$_\vartheta$ ИОС"

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_\vartheta$ ИОС" на единичное управляющее воздействие имеет вид

$$\Phi_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{i_в c_3 c_4 (T_v s + 1)(T_и s + 1)}{A_0 s^4 + A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4}, \tag{5.42}$$

где $A_0 = T'_H$; $A_1 = T_H(c_1 + c_4 + c_5 + \mu_B c_3)$;
$A_2 = T_H(c_1 c_4 + c_2) + T_H(\mu_B c_3 c_4 + i_B c_3) + \mu_B c_3$;
$A_3 = \mu_B c_3 c_4 + T_H i_B c_3 c_4 + i_B c_3$; $A_4 = i_B c_3 c_4$.

Передаточная функция (5.42) имеет один неуправляемый нуль ($\lambda = -\frac{1}{T_V}$), который в полете неидентифицируем и поэтому его влияние некомпенсируемо. Вследствие этого зададим передаточную функцию эталонной системы в виде

$$\Phi_э(s) = \frac{K_э(T_V s + 1)(T_H s + 1)}{A_{0э} s^4 + A_{1э} s^3 + A_{2э} s^2 + A_{3э} s + A_{4э}},$$

где $K_э = A_{4э}$.

Передаточная функция разомкнутой по цепи сигнала угла тангажа (по единичной обратной связи) эталонной системы записывается следующим образом:

$$W_э(s) = \frac{K_э(T_V s + 1)(T_H s + 1)}{s(A_{0э} s^3 + A_{1э} s^2 + A_{2э} s + A'_{3э})}, \qquad (5.43)$$

где $A'_{3э} = A_{3э} - K_э T_V$, $A_{0э} = 1$.

Поскольку в знаменатель выражения (5.43) входит полином 3-го порядка, передаточная функция $W_э(s)$ может быть представлена как

$$W_э(s) = \frac{K_э(T_V s + 1)(T_H s + 1)}{s(s + |\lambda_{1э}|)(s^2 + b_1 s + b_2)}, \qquad (5.44)$$

где $\lambda_{1э}$ – малый по абсолютной величине корень характеристического уравнения вида

$$\lambda^3 + A_{1э}\lambda^2 + A_{2э}\lambda + A'_{3э} = 0,$$

причем $\lambda_{1э} = -\frac{A'_{3э}}{A_{2э}}$, $b_1 = A_{1э} - |\lambda_{1э}|$, $b_2 = \frac{A'_{3э}}{|\lambda_{1э}|}$,

$$A_{2э} = b_1|\lambda_{1э}| + b_2. \qquad (5.45)$$

Вводя обозначения $T_{1э} = \frac{1}{|\lambda_{1э}|}$, $T_{2э}^2 = \frac{1}{b^2}$, $2\xi_{2э}T_{2э} = \frac{b_1}{b_2}$, запишем передаточную функцию (5.44) в виде

$$W_э(s) = \frac{K'_э(T_V s + 1)(T_H s + 1)}{s(T_{1э}s + 1)(T_{2э}^2 s^2 + 2\xi_{2э}T_{2э}s + 1)}, \qquad (5.46)$$

где $K'_э = K_э \cdot T_{1э} \cdot T_{2э}^2$.

ЛАФЧХ разомкнутой эталонной системы, согласно (5.46), изображены на рис. I2, причем для ЛАЧХ справедливы следующие соотношения:

$$|\lambda_{1э}| = (0{,}6 \div 0{,}8)\frac{1}{T_V} \quad \text{при} \quad T_V > T'_H, \qquad (5.47)$$

$$|\lambda_{1э}| = (0{,}6 \div 0{,}8)\frac{1}{T_H} \quad \text{при} \quad T_H > T_V, \qquad (5.48)$$

$$K'_э = \omega_y, \qquad (5.49)$$

$$\omega_y = (1{,}67 \div 1{,}25)\omega_c. \qquad (5.50)$$

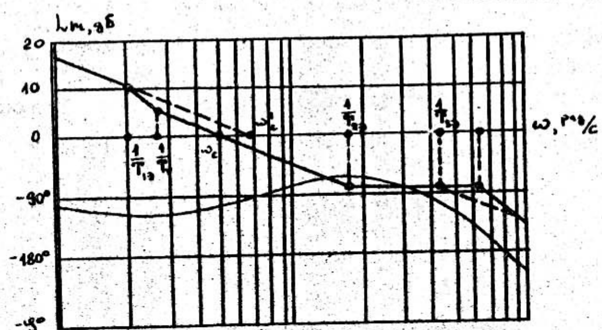

Рис. I2. ЛАФЧХ эталонной системы

Учитывая малую протяженность первого участка ЛАЧХ с наклоном -40 дб/дек, можно принять

$$t_{рег} \cong \frac{2}{\omega_c}. \qquad (5.5I)$$

Передаточная функция проектируемой системы, разомкнутой по единичной обратной связи (рис. II), записывается следующим образом:

$$W_{\frac{\vartheta}{\vartheta_{зад}}}(s) = \frac{K(T_V s + 1)(T_H s + 1)}{s(A'_0 s^3 + A'_1 s^2 + A'_2 + 1)},$$

где

$$\left.\begin{aligned}
K &= \frac{i_B}{\mu_B}, \\
A_0' &= \frac{A_0}{A_3'} = \frac{T_H}{\mu_B\, c_3 c_4}, \\
A_1' &= \frac{A_1}{A_3'} = \frac{T_H\,(c_1 + c_4 + c_5 + \mu_B c_3)}{\mu_B c_3 c_4}, \\
A_2' &= \frac{A_2}{A_3'} = \frac{T_H\,(c_1 c_4 + c_2 + \mu_B c_3 c_4) + \mu_B c_3}{\mu_B c_3 c_4}, \\
A_3' &= \mu_B c_3 c_4 .
\end{aligned}\right\} \qquad (5.52)$$

Формулы для расчета величин передаточных чисел АП$_\vartheta$ ИОС получим из условия $A_{i\,э} \triangleq A_{i\,пр}$. Решая совместно (5.45), (5.47) или (5.48) и (5.52), получим выражения для расчета величины передаточного числа μ_B:

при $T_V > (1{,}67 \div 1{,}25)\,T_H$

$$\mu_B = (1{,}5 \div 4{,}0)\,\frac{T_H\left[c_1 c_4 + c_2 + (0{,}36 \div 0{,}64)c_4^2 - (0{,}6 \div 0{,}8)c_4(c_1 + c_5 + c_4)\right]}{c_3\left[1 - (1{,}67 \div 1{,}25)c_4 T_H\right]},$$

при $T_H > (0{,}6 \div 0{,}8)\,T_V$

$$\mu_B = (1{,}5 \div 4)\,\frac{T_H^2(c_1 c_4 + c_2) + (0{,}36 \div 0{,}64) - T_H(0{,}6 \div 0{,}8)(c_1 + c_4 + c_5)}{c_3 T_H\left[c_4 T_H - (0{,}6 \div 0{,}8)\right]}.$$

Из совместного решения (5.49), (5.50), (5.51) и (5.52) получаем

$$i_B = \frac{3{,}3 \div 2{,}5}{t_{рег}}\,\mu_B .$$

Обычно требуемая величина $t_{рег\,\vartheta} \cong 3 \div 4\,с$, тогда $i_B \cong (0{,}8 \div 1)\,\mu_B$.

<u>Автопилот крена (АП$_\gamma$)</u>

Для горизонтальных режимов полета ЛА и режимов полета, близких к ним, условие (2.2) выполняется, поэтому допустимость автономного расчета величин передаточных чисел АП$_\gamma$ от расчета параметров АП$_\psi$ для автопилотов прямой схемы очевидна. Более того, опыт расчетов и моделирования автопилотов перекрестной схемы показывает, что за время установления заданного угла крена движение ЛА по углам курса и скольжения не успевает существенно развиться. Вследствие этого и для системы "ЛА – АП перекрестной схемы" при расчете параметров АП$_\gamma$ допустимо использовать только

уравнение бокового движения ЛА по крену, присоединяя к нему закон управления АП. Аналогично можно поступить и для системы с автопилотом смешанной схемы. Поэтому методика вывода формул для расчета передаточных чисел АП$_\gamma$ для горизонтальных режимов полета и сами формулы одинаковы для любого типа АП.

При расчете передаточных чисел АП$_\gamma$ независимо от типа обратной связи сервопривода АП$_\gamma$ принимают, что $t_{рег.\gamma} \cong 1 \div 2\,с$, $\sigma_\gamma \le 0{,}05\,\gamma_{зад}$ и $\Delta_\gamma = \pm 0{,}05\,\gamma_{зад}$.

<u>Автопилот крена с жесткой обратной связью</u>

<u>Закон управления АП$_\gamma$ (3.19)</u>

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_\gamma$" на управляющее возмущение имеет вид

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_{зад}}}(s) = \frac{i_э b_3}{\left[s^2 + (b_1 + \Omega_э b_3)s + i_э b_5\right]}.$$

Эта передаточная функция не имеет "нулей". Поэтому в качестве эталонной примем систему третьего порядка с кратными корнями характеристического уравнения системы $\det|A - I\lambda| = 0$:

$$W_э(s) = \frac{K_э}{(s + \lambda_э)^2},$$

т.е.

$$W_э(s) = \frac{K_э}{s^2 + 2\lambda_э s + \lambda_э^2}, \quad K_э = \lambda_э^2 . \qquad (5.53)$$

Вводя безразмерную переменную $S_ж$ по соотношению $S_ж = \frac{s}{\Omega_0}$, представим передаточные функции (5.53) и (5.24) в форме Вышнеградского $\Phi_э(S_ж) = \frac{1}{S_ж^2 + 2S_ж + 1}$, $\Omega_0 = \lambda_э$

и $$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_{зад}}}(S_ж) = \frac{1}{S_ж^2 + \frac{b_1 + \mu_э b_3}{\sqrt{i_э b_3}} - S_ж + 1}, \quad \Omega_0 = \sqrt{i_э b_3}.$$

Полагая, что

$$\lambda_э^2 = \Omega_0^2 \triangleq i_э b_3 \quad \text{и} \quad \frac{b_1 + \mu_э b_3}{i_э b_3} = 2,$$

получаем $\mu_э = \frac{2\Omega_0 - b_1}{b_3}$, $\quad i_э = \frac{\Omega_0^2}{b_3}$.

Время регулирования для эталонной системы второго порядка (корни системы кратные) $t_{рег.\gamma} = \frac{4{,}74}{\Omega_0}$. Тогда окончательно получаем $\mu_э = \frac{9{,}48 - b_1 t_{рег.\gamma}}{b_3 t_{рег.\gamma}}$, $\quad i_э = \frac{22{,}5}{b_3 t_{рег.\gamma}^2}$:

Закон управления АП (3.23)

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_\gamma$" на управляющее возмущение имеет вид

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_{зад}}}(s)=\frac{\nu b_3}{s^3+(b_1+\mu_в b_3)s^2+i_э b_3+\nu_э b_3}. \qquad (5.54)$$

В качестве эталонной примем систему третьего порядка с кратными корнями характеристического уравнения системы $\det|A-I\lambda|=0$:

$$W_э(s)=\frac{1}{s}\,\frac{1}{(s+\lambda_э)^3},$$

т.е.

$$W_э(s)=\frac{k_э}{s^3+3\lambda_э s^2+3\lambda_э^2 s+\lambda_э^3},\quad k_э=\lambda_э^2. \qquad (5.55)$$

В форме Вышнеградского передаточные функции (5.54) и (5.55) записываются как

$$\Phi_э(s_н)=\frac{1}{(s_н^3+3s_н^2+3s_н+1)},\quad \Omega_0=\lambda_э^3$$

и

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_{зад}}}(s_н)=\frac{1}{\left(s_н^3+\frac{b_1+\mu_в b_3}{\Omega_0}s_н^2+\frac{i_э b_3}{\Omega_0^2}+\frac{\nu_э b_3}{\Omega_0^3}\right)},$$

где $\Omega_0^3=i_э b_3$.

Полагая, что $\lambda_э^3=\Omega_0^3\triangleq\nu_э b_3$, $\frac{b_1+\mu_э b_3}{\Omega_0}=3$ и $\frac{i_э b_3}{\Omega_0^2}=3$,

получаем, что $\mu_э=\frac{3\Omega_0-b_1}{b_3}$, $i_э=\frac{3\Omega_0}{b_3}$, $\nu=\frac{\Omega_0^3}{b_3}$.

Учитывая, что для рассматриваемого случая $\Omega_0=\frac{6}{t_{рег\,\gamma}}$, окончательно получим

$$\mu_э=\frac{18-b_1\cdot t_{рег\,\gamma}}{b_3}, \qquad (5.56)$$

$$i_э=\frac{108}{b_3\, t^2_{рег\,\gamma}}, \qquad (5.57)$$

$$\nu=\frac{216}{b_3\, t^3_{рег\,\gamma}}. \qquad (5.58)$$

Закон управления АП$_\gamma$ (3.21)

При этом законе управления АП$_\gamma$ передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_\gamma$" на управляющее возмущение имеет вид

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_{зад}}}(s)=\frac{\nu_э b_3(T_1 s+1)}{s^3+(b_1+\mu_э b_3)s^2+i_э b_3 s+\nu_э b_3}, \qquad (5.59)$$

где

$$T_1=\frac{i_э}{\nu_э}. \qquad (5.60)$$

Передаточная функция (5.59) имеет нуль, но поскольку система обладает астатизмом первого порядка, можно задать эталонную систему, корни характеристического уравнения которой $\det|A-I\lambda|=0$ расположены на вещественной отрицательной полуоси по арифметической прогрессии. Однако в такой системе перерегулирование по координате управления достигает $\sigma_\gamma\approx0{,}1\gamma_{зад}$, что существенно больше заданного в ТЗ ($\sigma_\gamma\le0{,}05\gamma_{зад}$). Поэтому в данном случае разумно поступить следующим образом. В цепь передачи сигнала $\gamma_{зад}$ в АП$_\gamma$ включить фильтр нижних частот с передаточной функцией вида $W_{\varphi 1}(s)=\frac{1}{T_1 s+1}$, который компенсирует влияние нуля передаточной функции (5.59) на переходную функцию системы. В этом случае передаточная функция замкнутой системы на единичное управляющее возмущение совпадает с передаточной функцией (5.54). Поэтому формулы для расчета передаточных чисел АП соответствуют формулам (5.56)-(5.58). После расчета величин передаточных чисел АП$_\gamma$ определяют по выражению (5.60) величину постоянной времени фильтра низких частот в цепи сигнала $\gamma_{зад}$.

Автопилот крена со скоростной обратной связью (3.25)

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_\gamma$ СОС" для рассматриваемого случая имеет вид

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_{зад}}}(s)=\frac{\nu_э^* b_3}{s^3+(b_1+\mu_э^* b_3)s^2+i_э^* b_3 s+\nu_э^* b_3}.$$

Данная передаточная функция совпадает с передаточной функцией (5.54). Поэтому выражения для расчета величин передаточных чисел АП$_\gamma$ СОС имеют вид

$$\mu_э^*=\frac{18-b_T\, t_{рег\,\gamma}}{b_3\, t_{рег\,\gamma}},\quad i_э^*=\frac{108}{b_3\, t^2_{рег\,\gamma}},\quad \nu_э^*=\frac{216}{b_3\, t^3_{рег\,\gamma}}.$$

Автопилот крена с изодромной обратной связью АП$_\gamma$ ИОС (3.27)

Структурная схема системы "ЛА – АП$_\gamma$ ИОС" изображена на рис. 13. Величина $T_и$ априорно известна.

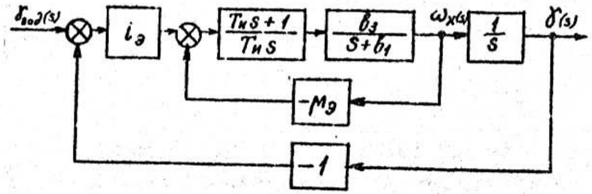

Рис. 13. Структурная схема системы "ЛА – АП$_{\gamma}$ ИОС"

Передаточная функция замкнутой системы "ЛА – АП$_{\gamma}$ ИОС" для рассматриваемого случая записывается как

$$\frac{\Phi_{\gamma}}{\gamma_{зад}}(s) = \frac{i_э b_3 (T_п s+1)}{T_и s^3 + (b_1 T_и + \mu_э b_3 T_и)s^2 + (\mu_э b_3 + i_э b_3 T_и)s + i_э b_3}. \quad (5.61)$$

Передаточная функция (5.61) имеет один неуправляемый нуль ($s = \frac{1}{T_и}$) и не обладает астатизмом первого порядка.

Вследствие этого зададим эталонную систему также с одним неуправляемым нулем и не обладающей астатизмом первого порядка:

$$\Phi_э(s) = \frac{k_э (T_э s+1)}{A_{0э} s^3 + A_{1э} s^2 + A_{2э} s + A_{3э}},$$

где $A_{3э} = k_э$, $A_{2э} \neq k_э T_э$, причем передаточная функция при размыкании контура эталонной системы по единичной обратной связи (по цепи сигнала γ) имеет вид (рис. 14):

$$W_э(s) = \frac{k_э' (T_э s+1)}{s(T_{1э}+1)(T_{2э} s+1)}, \quad (5.62)$$

где

$$k_э' = \frac{k_э}{A_{2э} - k_э T_э}, \quad A_{2э} - k_э T_э > 0; \quad (5.63)$$

$$T_{1э} \cdot T_{2э} = \frac{A_{0э}}{A_{2э} - k_э T_э}; \quad (5.64)$$

$$T_{1э} + T_{2э} = \frac{A_{1э}}{A_{2э} - k_э T_э}. \quad (5.65)$$

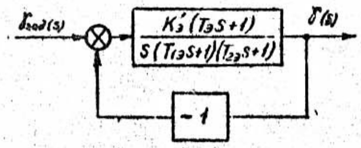

Рис. 14. Структурная схема эталонной системы

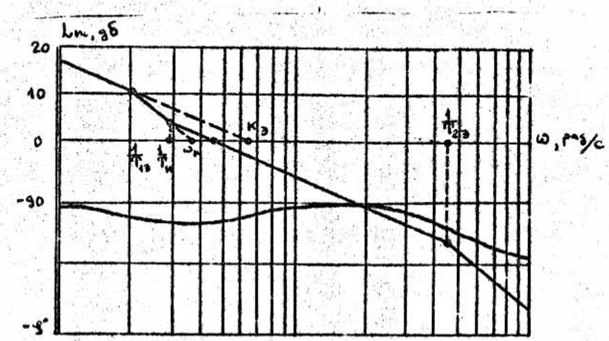

Рис. 15. ЛАФЧХ эталонной системы

ЛАФЧХ разомкнутой эталонной системы (5.62) приведена на рис. 15, причем между параметрами ЛАФЧХ выдерживаются следующие соотношения:

$$T_и = 10 T_{2э} \quad и \quad (2 \div 1)\omega_c T_{2э} = 1. \quad (5.66)$$

Из геометрии ЛАЧХ нетрудно получить

$$\omega_к^2 = \frac{\omega_c}{T_и} = \frac{\omega_y}{T_{1э}}, \quad (5.67)$$

где $\omega_y = k_э'$.

Положим, что

$$\left.\begin{aligned} & T_э \triangleq T_п,\ A_{0э} \triangleq T_и,\ A_{1э} \triangleq b_1 T_и + \mu_э b_3 T_и,\ A_{2э} \triangleq \mu_э b_3 + i_э b_3 T_п, \\ & A_{3э} = i_э b_3. \end{aligned}\right\} \quad (5.68)$$

Тогда с учетом (5.63)-(5.68) получим

$$\left.\begin{aligned} & k_э' = \frac{i_э}{\mu_э}, \\ & T_{1э} \cdot T_{2э} = \frac{T_и}{\mu_э b_3}, \\ & T_{1э} + T_{2э} = \frac{b_1 T_и + \mu_э b_3 T_и}{\mu_э b_3}, \\ & T_п = 10 T_{2э}, \\ & 2 \le \frac{T_{1э} i_э}{T_и T_{2э} \mu_э} \le 4. \end{aligned}\right\} \quad (5.69)$$

Решая совместно систему уравнений (5.69), получаем формулы для расчета величин передаточных чисел $АП_\gamma$ ИОС

$$\mu_э = \frac{10 - b_1 T_н}{0{,}9\, b_3 T_н} \quad и \quad i_э = \frac{25 \div 50}{b_3 T_н}.$$

Автопилот курса прямой схемы

При расчете передаточных чисел $АП_\psi$ прямой схемы независимо от типа обратной связи принимают, что

$$t_{рег.\psi} \cong 6 \div 18\ с, \quad \sigma_\psi = 0, \quad \Delta_\psi = 0{,}05\, \psi_{зад}.$$

На горизонтальных режимах полета и на режимах полета, близких к ним, условие (2.2) выполняется, поэтому в качестве математической модели бокового движения самолета для расчета параметров $АП_\psi$ допустимо использовать только уравнения бокового движения "рыскание – скольжение".

Автопилот курса с жесткой обратной связью

Расчету подлежат два передаточных числа $АП_\psi$: $\mu_н$ и $i_н$.

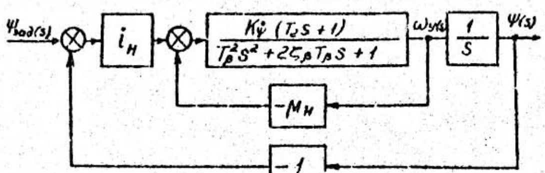

Рис. I6. Структурная схема системы "ЛА – $АП_\psi$ ЖОС" (прямая схема)

Структурная схема системы "самолет – $АП_\psi$" изображена на рис. I6. Передаточная функция замкнутой системы "самолет – $АП_\psi$" имеет вид

$$\Phi_{\frac{\psi}{\psi_{зад}}}(s) = \frac{i_н K_{\dot\psi}(T_{\dot\psi}s+1)}{T_\beta^2 s^3 + (2\zeta_\beta T_\beta + \mu K_{\dot\psi} T_{\dot\psi})s^2 + (1 + \mu K_{\dot\psi} + i_н K_{\dot\psi} T_{\dot\psi})s + i_н K_{\dot\psi}}, \tag{5.70}$$

где $K_{\dot\psi} = \dfrac{a_3 a_4 - a_2 a_7}{a_1 a_4 + a_2}$, $\quad T_{\dot\psi} = \dfrac{a_3}{a_3 a_4 - a_2 a_7}$, $\quad T_\beta = \dfrac{1}{\Omega_\beta}$,

$$\Omega_\beta = \sqrt{a_1 a_4 + a_2}, \quad \zeta_\beta = \frac{a_1 + a_2}{2\sqrt{a_1 a_4 + a_2}}.$$

Передаточная функция (5.70) формально идентична передаточной функции системы "ЛА – $АП_\vartheta$ ЖОС" (5.II). Действительно, при формальной замене $K_{\dot\psi}$ на K_c, $T_{\dot\psi}$ на T_v, Ω_β на Ω_α, ζ_β на ζ_α, $\mu_н$ на $\mu_в$, $i_н$ на $i_в$ передаточная функция (5.70) переходит в передаточную функцию (5.II). Следовательно, метод расчета передаточных чисел $АП_\vartheta$ ЖОС, изложенный выше (для передаточной функции (5.II)), полностью применим и в рассматриваемом случае. Поэтому формулы для расчета параметров $АП_\psi$ ЖОС приведем без вывода:

$$\mu_н = -d + \sqrt{d^2 - m} \tag{5.7I}$$

$$i_н = \frac{0{,}9 \div 1}{K'_{\dot\psi}\, T_{\dot\psi}}, \tag{5.72}$$

где

$$d = \frac{2\zeta_\beta T_\beta T_{\dot\psi} - 2T_\beta^2}{K_{\dot\psi} T_{\dot\psi}^2} = \frac{a_1 a_3 + 2a_2 a_7 - a_3 a_4}{a_3^2};$$

$$m = \frac{4\zeta_\beta^2 T_\beta^2 - 4T_\beta^2}{K_{\dot\psi}^2 T_{\dot\psi}^2} = \frac{(a_1 - a_4)^2 - 4a^2}{a_3^2};$$

$$K'_{\dot\psi} = \frac{K_{\dot\psi}}{1 + K_{\dot\psi}\beta_н} = \frac{a_3 a_4 - a_2 a_7}{a_1 a_4 + a_2 + \mu_н(a_3 a_4 - a_2 a_7)}.$$

Формулы (5.7I), (5.72) могут быть представлены в следующем виде:

$$\mu_н = -\frac{a_3(a_1 - a_4) + a_2 a_7}{a_3^2} + \sqrt{\frac{[a_3(a_1 - a_4) a_2 a_7]^2}{a_3^4} - \frac{(a_1 - a_4)^2 - 4a_2}{a_3^2}},$$

$$i_н = (0{,}9 \div 1)\frac{a_1 a_4 + a_2 + \mu_н(a_3 a_4 - a_2 a_7)}{a_3}.$$

Автопилоты курса с жесткой, скоростной и изодромной обратными связями

Передаточные числа $АП_\psi$ с законами управления (5.I6)–(5.I9) рассчитываются аналогично передаточным числам автопилота тангажа $АП_\vartheta$ с законами управления (3.I5), (3.I7), (3.I8). Поэтому здесь они не приводятся.

Автопилоты курса перекрестной схемы

При расчете параметров $АП_{\psi}$ перекрестной схемы считают, что передаточные числа АБУ канала руля направления ($\mu_н, T_н, \sigma$)[ж], а также передаточные числа канала элеронов ($\mu_э$, $i_э$ и $\nu_э$) известны. Поэтому в данном случае необходимо определить величины только перекрестного передаточного числа $i_э^{\psi}$ и постоянной времени $T_{ф}$ фильтра нижних частот в цепи сигнала $\Delta\psi$ $(\Delta\psi = \psi - \psi_{зад})$.

Если в ТЗ не заданы характеристики переходной функции $H(t)$, то обычно полагают, что они равны:

$$t_{рег.\psi} = 6 \div 18 \;,\; \sigma_{\Delta\psi} = 0 \quad и \quad \Delta_{\Delta\psi} = 0{,}05\,\psi_{зад} . \qquad (5.73)$$

Несмотря на то, что в рассматриваемых режимах полета ЛА условие (2.2) выполняется, тем не менее схема построения $АП_{\psi}$ диктует необходимость исследования "полной" математической модели бокового движения обобщенного объекта управления системы "ЛА - АБУ". На режимах горизонтального полета системы "ЛА - АБУ" в уравнениях движения ЛА допустимо не учитывать члены с коэффициентами $a_5, a_6, a_9, a_{10}, b_5, b_6, b_8$ и b_{10}, т.е. положить их равными нулю $a_5 = a_6 = a_9 = a_{10} = b_5 = b_6 = b_8 = b_{10} = 0$. При этих допущениях уравнения движения обобщенного объекта управления записывают как

$$\begin{aligned}
&(s + a_1)\omega_y + a_2'\beta + a_3\delta_н = 0,\\
&-\omega_y + (s + a_4')\beta - (b_7 s + b_4)\gamma + a_7\delta_н = 0, \qquad (5.74)\\
&-\mu_н \frac{T_н s}{T_н s + 1}\omega_y + \delta_н = 0.
\end{aligned}$$

Здесь $a_2' = a_2 + \dfrac{\sigma a_3 a_4}{57{,}3 b_4 - \sigma a_7}$, $a_4' = a_4 \dfrac{57{,}3 b_4}{57{,}3 b_4 - \sigma a_7}$.

ж) Параметры АБУ рассчитывают по следующим формулам [I]:

$$\mu_н = \frac{1}{a_3}\left[(0{,}4 \div 0{,}8)\sqrt{a_1 a_4 + a_2} - (a_1 + a_4)\right], \quad T_н = \frac{a_3}{a_3 a_4 - a_2 a_7},$$

$$\sigma = \frac{57{,}3 b_4\left[(3 \div 5) - a_1 a_2 - a_2\right]}{(3 \div 5) a_7 + a_3 a_4 - a_2 a_7} .$$

Когда в канале руля направления реализован только демпфер рыскания, вместо коэффициентов a_2' и a_4' в уравнениях (5.74) следует ввести коэффициенты a_2 и a_4.

Закон управления $АП_{\psi}$ (3.29)-(3.31)

Присоединяя к системе уравнений движения обобщенного объекта управления уравнения (3.29)-(3.31), получим передаточную функцию замкнутой системы "ЛА - АБУ - $АП_{\psi}$" на единичное управляющее возмущение $\psi_{зад}$:

$$\frac{\Phi_{\psi}}{\psi_{зад}}(s) = \frac{i_э^{\psi} i_э b_3 a_2' (T_н s + 1)(b_7 s + b_4)}{(T_{ф_1} s + 1)(A_0' s^6 + A_1' s^5 + A_2' s^4 + A_3' s^3 + A_4' s^2 + A_5' s) + (T_н s + 1)\, i_э^{\psi} i_э b_3 a_2' (b_7 s + b_4)}, \qquad (5.75)$$

где

$$\begin{aligned}
&A_0' = T_н A_0 ;\\
&A_1' = A_0 + T_н A_1 + \mu_н T_н a_3 ;\\
&A_2' = A_1 + T_н A_2 + \mu_н T_н\left[a_3(a_4' + b_1 + \mu_э b_3) - a_2' a_7\right];\\
&A_3' = A_2 + T_н A_3 + \mu_н T_н\left[a_3(a_4' b_2 + b_2 b_7) + i_э a_3 b_3 - \mu_э b_3(a_2' a_7 + a_3 a_4') - \right. \qquad (5.76)\\
&\qquad \left. - a_2' a_7 b_1\right];\\
&A_4' = A_3 + T_н A_4 + \mu_н T_н\left[a_3 b_2 b_4 - i_э b_3(a_2' a_7 + a_3 a_4')\right];\\
&A_5' = A_4 ;\\
&A_0 = 1 ;\\
&A_1 = a_1 + a_4' + b_1 + \mu_э b_3 ;\\
&A_2 = b_1(a_1 + a_4') + a_2' + a_1 a_4' + b_2 b_7 + \mu_э b_3(a_1 + a_4') + i_э b_3 ;\\
&A_3 = b_1(a_1 a_4' + a_2') + b_2(a_1 b_7 + b_4) + \mu_э b_3(a_2' + a_1 a_4') + i_э b_3(a_1 + a_4');\\
&A_4 = a_1 b_2 b_4 + i_э b_3(a_2' + a_2 a_4').
\end{aligned}$$

Передаточная функция (5.76) имеет два неуправляемых нуля ($\lambda_1 = -\dfrac{1}{T_н}$ и $\lambda_2 = -\dfrac{b_4}{b_7}$) и не обладает астатизмом второго порядка. Поэтому для расчета параметров такой системы ($i_э^{\psi}$ и $T_{ф_1}$) поступают следующим образом. Задают такую эталонную систему, передаточная функция которой для замкнутого контура управления при единичном возмущении не имеет нулей и записывается как

$$\Phi_э(s) = \frac{K_э}{A_{0э} s^5 + A_{1э} s^4 + A_{2э} s^3 + A_{3э} s^2 + A_{4э} s + K_э} . \qquad (5.77)$$

Передаточную функцию разомкнутой эталонной системы, как следует из (5.77), представляют в виде

$$W_э(s) = \frac{K_э}{s(A_{0э}s^4 + A_{1э}s^3 + A_{2э}s^2 + A_{3э}s + A_{4э})} . \qquad (5.78)$$

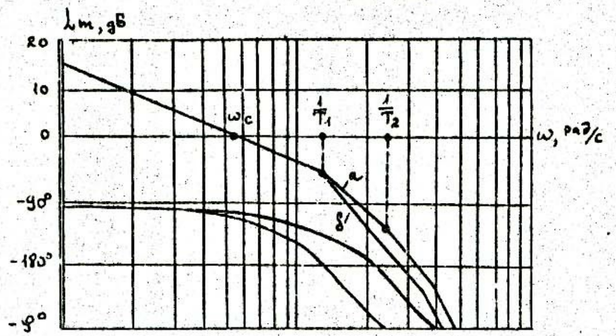

Рис. 17. ЛАФЧХ эталонной системы

Переходная функция эталонной системы $h_э(t)$ удовлетворяет заданным требованиям /например, условиям (5.73)/, поэтому ЛАФЧХ, соответствующая передаточной функции (5.78), имеет вид, изображенный на рис. 17. Для ЛАЧХ выдерживаются следующие соотношения:

$$2T_1\omega_c \le 1 \le 4T_1\omega_c \qquad (5.79)$$

(для случая А)
или

$$4T_1\omega_c \le 1 \le 8T_1\omega_c \qquad (5.80)$$

(для случая Б),
где

$$T_1 = \min\left(\frac{1}{\lambda_i}\right)\frac{1}{\sqrt{\lambda_j\lambda_j'}} ; \qquad (5.81)$$

λ_i – минимальный по абсолютной величине вещественный корень уравнения

$$\sum_0^4 A_i\lambda^{n-i} = 0 ; \qquad (5.82)$$

λ_j, λ_j' – минимальные по модулю комплексно-сопряженные корни уравнения (5.82).

При $|\lambda_i| < |\sqrt{\lambda_j\lambda_j'}|$ выполняется соотношение (5.79), а при $|\sqrt{\lambda_j\lambda_j'}| < |\lambda_i|$ – соотношение (5.80).

Из геометрии ЛАЧХ очевидно, что $\omega_c = K_э$.

Для приведения проектируемой системы "ЛА – АП$_\psi$" к виду эталонной записывают передаточную функцию разомкнутой проектируемой системы. С этой целью из выражения знаменателя передаточной функции замкнутой системы (5.75) вычитают выражение числителя этой же передаточной функции, оставляя последний в выражении передаточной функции разомкнутой системы без изменения. В результате этой операции

$$W_{\frac{\psi}{\psi_{зад}}}(s) = \frac{i_э^\psi i_з b_3 a_2' b_4 (T_н s+1)(\frac{b_7}{b_4}s+1)}{s(A_0's^5+A_1's^4+A_2's^3+A_3's^2+A_4's+A_5')(T_{ф_1}s+1)} . \qquad (5.83)$$

Полагая, что

$$T_{ф_1} = \frac{b_7}{b_4} , \qquad (5.84)$$

компенсируют влияние одного нуля на переходную функцию проектируемой системы.

Решение уравнения

$$\sum_0^5 A_i'\lambda^{5-i} = 0 , \qquad (5.85)$$

коэффициенты которого известны, как правило, дает один вещественный корень по абсолютной величине, близкий к величине $1/T_н$. В этом случае компенсируется и влияние второго нуля передаточной функции (5.83). Если решение уравнения (5.85) не дает корня по абсолютной величине, близкого к величине $1/T_н$, то в этом случае в цепь сигнала $\psi_{зад}$ необходимо включить дополнительный фильтр низких частот с передаточной функцией $W_{ф_2}(s) = \frac{1}{T_н s+1}$.

Таким образом, общий фильтр в цепи сигнала $\psi_{зад}$ будет представлять собой два последовательно включенных фильтра

$$W_ф(s) = \frac{1}{T_{ф_1}s+1}\cdot\frac{1}{T_{ф_2}s+1} .$$

Здесь величина постоянной времени $T_{ф_1}$ определяется выражением (5.84), а постоянная времени $T_{ф_2} = T_н$.

В результате введения фильтров в цепь сигнала $\psi_{зад}$ передаточная функция (5.83) преобразуется к следующему виду:

$$W_{\frac{\psi}{\psi_{зад}}}(s) = \frac{i_э^{\psi} i_э b_3 b_4 a_2'}{s(A_0''s^4 + A_1''s^3 + A_2''s^2 + A_3''s + A_4'')} \qquad (5.86)$$

или

$$W_{\frac{\psi}{\psi_{зад}}}(s) = \frac{i_э^{\psi} \cdot i_э b_3 b_4 a_2'}{s(A_0's^5 + A_1's^4 + A_2's^3 + A_3's^5 + A_4's + A_5')}, \qquad \text{где } A_4'' = A_5'.$$

Передаточная функция (5.86) соответствует случаю, когда вещественный корень уравнения (5.85) близок по абсолютной величине к величине $1/T_н$, т.е.

$$\sum_0^5 A_i' \lambda^{5-i} \approx \left(\lambda_1 + \frac{1}{T_н}\right) \sum_0^4 A_j'' \lambda^{4-i}. \qquad (5.87)$$

Вид передаточных функций проектируемой системы "ЛА – АП$_\psi$" совпадает с видом передаточной функции разомкнутой эталонной системы (5.73). Поэтому можно положить, что

$$K_э = \frac{i_э^{\psi} \cdot i_э b_3 b_4 a_2'}{(A_4'' \div A_5')},$$

и, учитывая (5.79), (5.80), можно записать

$$2T_1' i_э^{\psi} i_э b_3 b_4 a_2' \le A_5' \le 4T_1' i_э^{\psi} i_э b_3 b_4 a_2' \qquad (5.88)$$

или

$$4T_1' i_э^{\psi} i_э b_3 b_4 a_2' \le A_5' \le 8T_1' i_э^{\psi} i_э b_3 b_4 a_2'. \qquad (5.89)$$

Здесь T_1' определяется по условию (5.81) в результате решений уравнения (5.85) или уравнения вида

$$\sum_0^4 A_j'' \lambda^{4-i} = 0,$$

где коэффициенты A_j'' определяются из условия (5.87).

Таким образом, в неравенствах (5.88) и (5.89) неизвестной величиной является только перекрестное передаточное число $i_э^{\psi}$. Из этих неравенств получаем формулы для расчета величины перекрестного передаточного числа АП$_\psi$:

для случая $|\lambda_i| < |\sqrt{\lambda_j \lambda_j'}|$

$$i_э^{\psi} = (0{,}25 \div 0{,}5) \frac{A_5'}{i_э b_3 b_4 a_2' T_1'},$$

для случая $|\sqrt{\lambda_j \lambda_j'}| < |\lambda_i|$

$$i_э^{\psi} = (0{,}125 \div 0{,}25) \frac{A_5}{i_э b_3 b_4 a_2' T_1}.$$

Законы управления АП$_\psi$ (3.32)-(3.33) и (3.34)-(3.35)

Методика вывода формул для расчета параметров АП$_\psi$ с законами управления (3.32)-(3.33) и (3.34)-(3.35) аналогична рассмотренной для АП$_\psi$ ЖОС. Поэтому ниже приведены формулы без вывода.

Постоянная времени T_{ϕ}, фильтра низких частот в цепи сигнала $\psi_{зад}$ определяется независимо от закона управления АП$_\psi$ выражением (5.84).

Перекрестное передаточное число $i_э^{\psi}$ АП$_\psi$ рассчитывается по следующим формулам.

Для АП$_\psi$ СОС /закон (3.32)-(3.33)/:

при $|\lambda_i| < |\sqrt{\lambda_j \lambda_j'}|$

$$i_э^{\psi} = (0{,}25 \div 0{,}5) \frac{A_6'}{\nu_э^* b_3 b_4 a_2' T_1'};$$

при $|\sqrt{\lambda_j \lambda_j'}| < |\lambda_i|$ $\quad i_э^{\psi} = (0{,}125 \div 0{,}25) \dfrac{A_6'}{\nu_э^* b_3 b_4 a_2' T_1'}.$

Здесь параметр T_1' определяется по условию (5.81) в результате решения уравнений:

$$\sum_0^5 A_i'' \lambda^{5-i} = 0 \qquad (5.90)$$

или

$$\sum_0^6 A_j' \lambda^{6-i} = 0,$$

где $A_0' = T_н A_0$;

$A_1' = A_0 + T_н A_1 + \mu_н T_н a_3$;

$A_2' = A_1 + T_н A_2 + \mu_н T_н [a_3(b_1 + a_4' + \mu_3 b_3) - a_2' a_7]$;

$A_3' = A_2 + T_н A_3 + \mu_н T_н [a_3(a_4' b_1 + b_2 b_7 - \mu_3 a_4' b_3 + i_э b_3) - a_7(\mu_3 a_2' b_3 + a_2' b_1)]$;

$A_4' = A_3 + T_н A_4 + \mu_н T_н [a_3(b_2 b_4 - i_э a_4' b_3 + \nu_э b_3) - a_7 i_э a_2' b_3]$;

$A_5' = A_4 + T_н A_5 + \mu_н T_н \nu_э b_3 (a_3 a_4' - a_2' a_7)$;

$A_6' = A_5$;

$A_0 \div A_2$ – см. (5.76);

$A_3 = b_1(a_2'' + a_1 a_4') + b_2(b_4 + a_1 b_7) + \mu_3 b_3(a_2' + a_1 a_4') + i_э b_3(a_1 + a_4') + \nu_э b_3$;

$A_4 = a_4' b_2 b_4 + i_э(a_2' + a_1 a_4') + \nu_э b_3(a_1 + a_4')$;

$$A_5 = \nu_э b_3 (a_2' + a_1 a_4').$$

Коэффициенты A_j'' определяются из условия

$$\sum_0^6 A_i' \lambda^{6-i} \cong (T_и \lambda + 1) \sum_0^5 A_j'' \lambda^{5-j}.$$

Уравнение (5.90) используют, когда один из его корней близок по абсолютной величине к $\sim 1/T_и$.

Для $АП_\psi$ ИОС /закон (3.34)-(3.35)/:

при $|\lambda_i| < |\sqrt{\lambda_j \lambda_j'}|$

$$i_э^\psi = (0{,}25 \div 0{,}5) \frac{A_к}{i_э b_3 b_4 a_2' T_1'}, \quad A_к = \begin{cases} A_6' \\ A_5'' \end{cases};$$

при $|\sqrt{\lambda_j \lambda_j'}| < |\lambda_i|$ $\quad i_э^\psi = (0{,}125 \div 0{,}25) \frac{A_к}{i_э b_3 b_4 a_2' T_1'}, \quad A_к = \begin{cases} A_6' \\ A_5'' \end{cases}.$

Здесь параметр T_1' определяется по условию (5.81) в результате решения уравнений $\sum_0^6 A_i' \lambda^{6-i} = 0$ или $\sum_0^5 A_j'' \lambda^{5-j} = 0$,

где $A_0' = T_и T_н A_0$;

$A_1' = T_н A_0 + T_и T_н A_1 + \mu_н T_н a_3 T_и$;

$A_2' = T_н A_1 + T_и T_н A_2 + \mu_н T_н [a_3(a_4' + b_1 + \mu_3 b_3) - a_7 a_2'] T_и$;

$A_3' = T_н A_2 + T_и T_н A_3 + \mu_н T_н [a_3(a_4' b_2 + b_2 b_4) + i_э a_3 b_3 -$
$- \mu_3 b_3 (a_2' a_7 + a_3 a_4') - a_2' a_1 b_1] T_и$;

$A_4' = T_н A_3 + T_и T_н A_4 + \mu_н T_н [a_3 b_2 b_4 - i_э b_3 (a_2' a_7 + a_3 a_4')] T_и$;

$A_5' = T_н A_4$;

$A_6' = A_4$;

$A_1 \div A_4$ — см. (5.76).

Коэффициенты A_j'' определяются из условия

$$\sum_0^6 A_i' \lambda^{6-i} \cong (T_и s + 1) \sum_0^5 A_j'' \lambda^{5-j}.$$

Глава 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТА СТРУКТУРЫ АП

Некоторые пояснения

Синтез структуры АП следует проводить в таком порядке:

1. Записать соответствующие уравнения движения ЛА совместно с выбранным первичным законом управления АП. Составить структурную схему контура управления системы "ЛА – АП".

2. Разомкнуть контур управления системы "ЛА – АП" по внешней единичной связи и записать передаточную функцию разомкнутой проектируемой системы.

3. Подобрать передаточную функцию разомкнутой эталонной системы "ЛА – АП".

4. Используя принцип эквивалентности ($A_{пр.i} \overset{\Delta}{=} A_{эi}$), составить систему уравнений и вывести рабочие формулы для определения передаточных чисел АП.

5. Рассчитать по выведенным формулам для заданного в ТЗ времени регулирования $t_{рег.зад.min}$ и $t_{рег.зад.max}$ величину параметров АП для каждого режима полета ЛА.

6. Построить зависимости величин передаточных чисел АП по режимам полета ЛА и аппроксимировать эти зависимости.

7. Провести математическое моделирование системы "ЛА – АП" с аппроксимированными значениями передаточных чисел АП и построить переходные процессы системы на управляющее возмущение.

При выполнении п. 5 в ряде случаев могут получиться отрицательные значения некоторых передаточных чисел. В этом случае их целесообразно положить равными нулю. (Равенство нулю отрицательных передаточных чисел при реализации АП на элементах аналоговой техники ОБЯЗАТЕЛЬНО!)

В режимах полета на больших высотах с большими числами М вследствие падения эффективности органов управления рассчитанные по рабочим формулам величины передаточных чисел АП могут оказаться технически нереализуемыми. Невозможность технической реализации больших по абсолютной величине значений передаточных чисел объясняется нелинейными характеристиками элементов и узлов конструкции реального АП. Ниже приведены примерные диапазоны технически реализуемых величин передаточных чисел АП.

Автопилот стабилизации приращения нормальной перегрузки

$\mu_{в} = 0{,}01 \div 2{,}0 \; \text{град} \cdot \delta_{в} / \text{град} \cdot c^{-1} \omega_{z}$.

$i_{n_y} = 0{,}05 \div 6{,}0 \; \text{град} \cdot \delta_{в} / \text{ед} \cdot \Delta n_y$.

$\nu_{n_y} = 0{,}03 \div 8{,}0 \; \text{град} \cdot c^{-1} \delta_{в} / \text{ед} \; \Delta n_y$.

Автопилот угла тангажа

АП$_{\vartheta}$ ЖОС: $\mu = 0{,}01 \div 2{,}0 \; \text{град} \, \delta_{в} / \text{град} \cdot c^{-1} \cdot \omega_{z}$; $i = 0{,}02 \div 2{,}5 \; \text{град} \, \delta_{в} / \text{град} \cdot \vartheta$.

АП$_{\vartheta}$ СОС: $\mu = 0{,}5 \div 6{,}0 \; \text{град} \, \dot{\delta}_{в} / \text{град} \cdot c^{-2} \dot{\omega}_{z}$; $i = 0{,}3 \div 7{,}0 \; \text{град} \cdot c^{-1} \dot{\delta}_{в} / \text{град} \cdot c^{-1} \omega_{z}$;

$\nu = 0{,}2 \div 6{,}0 \; \text{град} \cdot c^{-1} \dot{\delta}_{в} / \text{град} \cdot \vartheta$.

АП ϑ ИОС: $\mu = 0{,}1 \div 2{,}5 \; \text{град} \cdot c^{-1} / \text{град} \cdot c^{-1} \cdot \omega_{z}$; $i = 0{,}05 \div 2{,}5 \; \text{град} \cdot c^{-1} \dot{\delta}_{в} / \text{град} \cdot \vartheta$;

$T_{и} = 1 \div 3 \; c$.

Автопилот стабилизации заданного крена

АП$_{\gamma}$ ЖОС: $\mu_{э} = 0{,}03 \div 2{,}0 \; \text{град} \cdot \delta_{э} / \text{град} \cdot c^{-1} \omega_{x}$; $i = 0{,}01 \div 1{,}5 \; \text{град} \cdot \delta_{э}^{\gamma} / \text{град} \cdot \gamma$.

Перекрестное передаточное число АП $i_{э}^{\psi} = 1 \div 10 \; \text{град} \cdot \gamma / \text{град} \cdot \psi$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окоемов Б.Н., Зеленов Ю.С., Малахов А.А. Алгоритмизация методов проектирования структур автопилотов. - М.: МВТУ, 1981.

2. Решение типовых задач синтеза структур автопилота с применением ЭЦВМ: Учебное пособие/Под ред. Н.А.Михалева. - М.: МВТУ, 1977.

3. Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К. Аэродинамические производные летательного аппарата и крыла при дозвуковых скоростях. - М.: Наука, 1975.

Цена 11 коп.