

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. КОРОЛЕВА

Автоматическое управление креном ЛА

Автоматическое управление разворотом ЛА

*МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ*

УДК 629.7.017.2(075)

Рассматривается динамика движения летательного аппарата относительно центра масс в прямолинейном полете с креном без скольжения, а также при выполнении плоского и координированного разворотов в горизонтальной плоскости. Анализируются способы улучшения качества переходных процессов в каналах крена и рыскания с помощью автоматических средств. Книга содержит пять вариантов лабораторных заданий по теме «Автоматическое управление креном ЛА» и два варианта — по теме «Автоматическое управление разворотом ЛА», которые выполняются на специализированных лабораторных установках на базе серийных АВМ МН-7М. Методические указания предназначены для студентов специальности 0539.

Разработали: В. М. Белоконов, Б. А. Титов

Рецензенты: Л. В. Кудюров, А. И. Минаков

Утверждены редакционно-издательским советом института 12.12.1980.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРЕНОМ ЛА

Содержание работы:

1. Исследование стабилизации угла крена статическим и астатическим автопилотами.
2. Исследование автоматического управления движением крена при ступенчатом и линейном законах изменения управляющего сигнала.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Под изолированным движением по крену понимается вращение летательного аппарата только вокруг продольной оси ОХ под действием возмущающих и управляющих моментов.

В задачу автоматического управления креном ЛА входят: стабилизация угла, выход на новый заданный угол и обеспечение приемлемого качества переходного процесса.

1. ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ПО КРЕНУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С АВТОПИЛОТОМ

Рассмотрим принцип действия автопилота с жесткой обратной связью (рис. 1).

Пусть летательный аппарат ЛА совершает горизонтальный установившийся полет. Заданный угол крена равен нулю, элероны

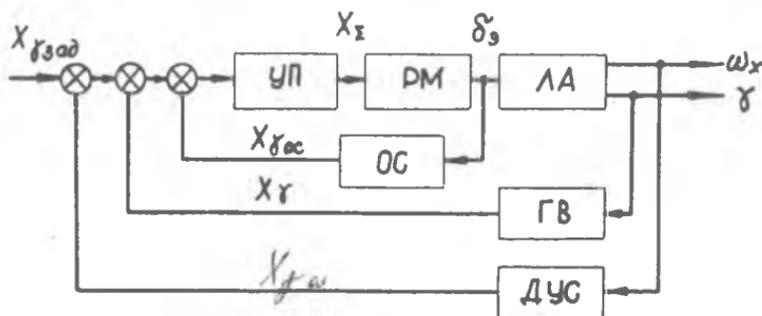


Рис. 1. Структурная схема автопилота по каналу крена

не отклонены. Тогда на суммирующее устройство (СУ) поступают сигналы $X_{\gamma \text{зад}} = 0$ и X_{γ} , из которых последний соответствует истинному углу крена, вырабатываемому гировертикантом (ГВ).

ЛА под действием внешнего момента наклоняется, на вход СУ поступает сигнал, равный разности

$$X_{\gamma} - X_{\gamma \text{зад}} = X_{\gamma}.$$

После прохождения через усилитель (У) этот сигнал подается на рулевую машину и элероны начинают отклоняться. По мере отклонения элеронов сигнал обратной связи $X_{\gamma \text{ос}}$ уравнивает разность

$$X_{\gamma} - X_{\gamma \text{зад}},$$

т. е. будет справедливо равенство

$$X_{\gamma \text{ос}} = X_{\gamma} - X_{\gamma \text{зад}}. \quad (1)$$

Этот процесс протекает во времени. Однако время отклонения элеронов сравнительно невелико, поэтому в первом приближении можно считать, что элероны отклоняются мгновенно на угол $\delta_{\text{э}}$, обеспечивающий выполнение равенства (1). Очевидно, что при таком подходе свойства автопилота идеализируются, и он называется идеальным (или безынерционным).

Сигналы $X_{\gamma \text{ос}}$, X_{γ} , $X_{\gamma \text{зад}}$ связаны с углами отклонения элеронов и крена следующими соотношениями:

$$X_{\gamma \text{ос}} = K_{\text{э}} \delta_{\text{э}}; \quad X_{\gamma} = K_{\gamma} \gamma; \quad X_{\gamma \text{зад}} = K_{\gamma} \gamma_{\text{зад}},$$

где $K_{\text{э}}$ — передаточный коэффициент жесткой обратной связи; K_{γ} — передаточный коэффициент чувствительного элемента (гировертиканта).

Подставив эти соотношения в формулу (1), получим:

$$K_{\text{э}} \delta_{\text{э}} = K_{\gamma} \gamma - K_{\gamma} \gamma_{\text{зад}}.$$

Отсюда

$$\delta_{\text{э}} = K_{\text{э}\gamma} (\gamma - \gamma_{\text{зад}}), \quad (2)$$

где $K_{\text{э}\gamma} = \frac{K_{\gamma}}{K_{\text{э}}}$ — передаточный коэффициент идеального автопилота с жесткой обратной связью.

Таким образом, у идеального автопилота с жесткой обратной связью элероны отклоняются пропорционально разности $\gamma - \gamma_{\text{зад}}$. Рассмотрим поведение ЛА при его отклонении от заданного нулевого угла крена. Наличие угла крена $\gamma_0 \neq 0$ приводит к мгновенному отклонению элеронов на определенную величину (рис. 2). Появляется момент $M_x \delta_{\text{э}}$, направленный на устранение крена.

При этом возникает угловое ускорение ω_x и угловая скорость $\dot{\omega}_x$. Угол крена γ , а следовательно, и разность сигналов $X_{\gamma} - X_{\gamma \text{зад}}$ уменьшаются. Элероны поворачиваются на мень-

ший угол в сторону нейтрального положения, и когда текущий крен ЛА станет равным заданному (в данном случае нулю), элероны вернутся в нейтральное положение. Угол крена, однако, продолжает изменяться. Все зависит от величины демпфирующего момента $M_x^{\omega_x}$

действовавшего в процессе вращения ЛА. Если демпфирующий момент мал, то угловая скорость вращения ω_x при подходе ЛА к нейтральному положению не гасится. При крене, равном нулю, вследствие наличия угловой скорости ω_x ЛА «проскочит» нейтральное положение, приобретая крен противоположного знака. Автопилот при этом отклоняет элероны в другую сторону, в результате ЛА

возвращается в исходное положение.

При малых демпфирующих моментах ЛА при возвращении к исходному положению может несколько раз пройти нейтраль. Время переходного процесса при этом оказывается значительным.

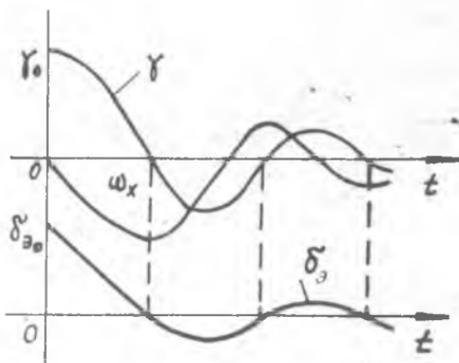


Рис. 2. Переходный процесс в канале крена при слабом собственном демпфировании без автопилота

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИЕМЛЕМОГО КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Улучшить качество переходного процесса можно путем искусственного увеличения демпфирования, сущность которого сводится к следующему. В рассмотренной схеме управления элероны возвращаются в нейтральное положение только тогда, когда текущий крен становится равным заданному. Сильнее затормозить вращение ЛА можно, поставив элероны в нейтральное положение прежде, чем крен станет равным заданному, причем по мере приближения его к заданному значению следует отклонить элероны в противоположную сторону. Такое отклонение создает момент, направленный в сторону, противоположную вращению. Тем самым осуществляется дополнительное демпфирование ЛА по крену.

Опережающее отклонение элеронов можно произвести по следующему закону:

$$\delta_{э} = K_{э\gamma} (\gamma - \gamma_{зад}) + K_{э\omega_x} \omega_x, \quad (3)$$

где $K_{э\omega_x}$ — передаточный коэффициент по угловой скорости.

На суммирующее устройство сигналы слагаемых $K_{\varepsilon\gamma}(\gamma - \gamma_{зад})$ и $K_{\varepsilon\omega_x}\omega_x$ поступают с разными знаками, вследствие чего угол

отклонения элеронов становится равным нулю не тогда, когда $\gamma = \gamma_{зад}$, а раньше. По мере приближения крена к заданному значению сигнал X_{ω_x} превагирует над сигналом $X_{(\gamma - \gamma_{зад})}$ и элероны отклоняются в противоположную сторону. Улучшение качества переходного процесса по крену при использовании автопилота рассмотренного типа видно из сравнения рис. 2 и 3.

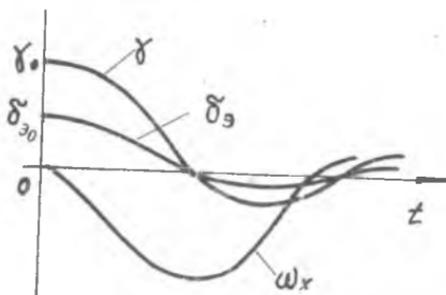


Рис. 3. Переходный процесс в канале крена с включенным статическим автопилотом

Автопилот, работающий по закону (3), не обеспечивает стабилизацию угла крена в том случае, когда на ЛА действует постоянный возмущающий момент $M_{хв}$, вызывающий крен ЛА. Накренение ЛА вызывает отклонение автопилотом элеронов, которые через определенный промежуток времени уравновесят постоянно действующий момент $M_{хв}$ (рис. 4).

Это возможно только при наличии угла крена $\gamma \neq 0$, так как автопилот непосредственно на внешний возмущающий момент не реагирует.

Таким образом, автопилот, работающий по закону (3), при действии внешнего возмущающего момента $M_{хв} = \text{const}$ дает статическую ошибку в виде угла крена $\gamma \neq 0$. Автопилот такого типа называется статическим. Для устранения статической ошибки применяют астатические автопилоты с различными принципами действия. Закон управления элеронами для астатического автопилота может быть выражен следующим дифференциальным уравнением:

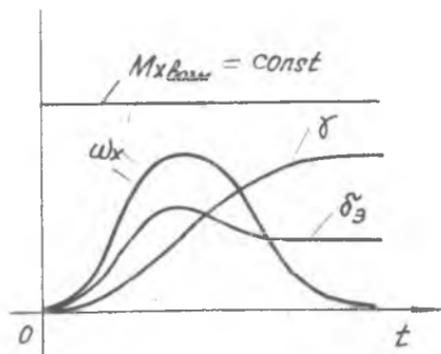


Рис. 4. Переходный процесс в канале крена со статическим автопилотом в условиях действия постоянного возмущающего момента

$$\delta_{\varepsilon} = K_{\varepsilon\gamma}(\gamma - \gamma_{зад}) + K_{\varepsilon\omega_x}\omega_x + K_{\varepsilon\ddot{\gamma}}\ddot{\gamma} \quad (4)$$

Угол отклонения элеронов δ , у астатического автопилота получается интегрированием предыдущего выражения

$$\delta = K_{\delta\gamma} \int (\gamma - \gamma_{зад}) dt + K_{\delta\omega_x} \gamma + K_{\delta\dot{\omega}_x} \dot{\omega}_x.$$

При действии на ЛА постоянного возмущающего момента $M_{xв}$ элероны отклоняются пропорционально γ , ω_x и накапливающемуся сигналу

$$\int (\gamma - \gamma_{зад}) dt.$$

Величина этого сигнала до определенного момента возрастает. Отклоненные элероны создают момент $M_{xэ}$, возвращающий ЛА к исходному углу крена. Когда переходный процесс закончится, элероны при $\gamma = 0$ отклонятся на угол, равный

$$K_{\delta\gamma} \int (\gamma - \gamma_{зад}) dt,$$

т. е. на угол, пропорциональный заштрихованной на рис. 5 площади.

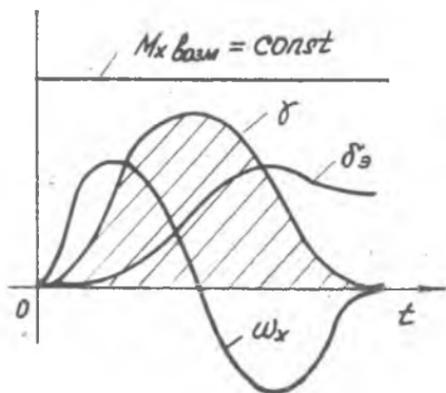


Рис. 5. Переходный процесс в канале крена с астатическим автопилотом в условиях действия постоянного возмущающего момента

3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРЕНОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Для автоматического управления креном, т. е. для выхода ЛА на новый угол крена, на вход суммирующего устройства подается сигнал X_{γ} , пропорциональный углу крена, на который необходимо перевести ЛА. При этом на суммирующее устройство сигнал может быть подан в виде ступенчатой или линейной функции времени. Из-за разности сигналов $X_{\gamma} - X_{\gamma_{зад}}$ рулевая машина для идеального автопилота отклоняет элероны мгновенно на такую величину, что сигнал обратной связи $X_{\gamma_{ос}}$ уравнивает разность сигналов $X_{\gamma} - X_{\gamma_{зад}}$ (см. выражение (1)). Под действием момента $M_{x\epsilon}$ от элеронов ЛА начинает накреняться, при этом угловая скорость ω_x растет. Появляющийся демпфирующий момент $M_{x\dot{\omega}_x}$ препятствует вращению. По мере накренения ЛА разность сигналов $X_{\gamma} - X_{\gamma_{зад}}$ уменьшается, вследствие чего элероны отклоняются на меньший угол.

На суммирующее устройство подается также сигнал, пропор-

циональный угловой скорости крена ω_x . Он способствует более интенсивному уменьшению угла отклонения элеронов. В определенный момент времени, когда крен еще не достиг заданного значения, элероны должны быть установлены в нейтральное положение, а в дальнейшем отклонены в противоположную сторону (рис. 6).

Это происходит тогда, когда сигнал X_{ω_x} становится больше сигнала $X_{(\gamma - \gamma_{зад})}$. А так как при этом ЛА имеет угловую скорость ω_x , то крен продолжает увеличиваться. По мере падения угловой скорости и приближения крена к заданному значению сигналы X_{ω_x} и $X_{(\gamma - \gamma_{зад})}$ уменьшаются, и после выхода на заданный крен элероны устанавливаются в нейтральном положении.

Аналогичная картина наблюдается и при подаче на суммирующее устройство сигнала $X_{\gamma_{зад}}$, изменяющегося по линейному закону от времени (рис. 7). Однако при этом характер изменения угловой скорости ω_x и угла отклонения элеронов δ_β имеет некоторые отличия. В момент, когда сигнал $X_{\gamma_{зад}}$ становится постоянным, угловая скорость и угол отклонения элеронов резко уменьшаются до нуля.

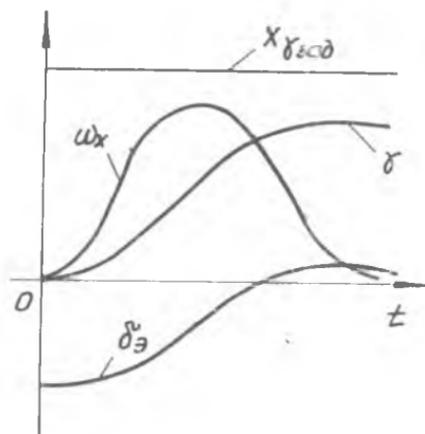


Рис. 6. Переходный процесс в канале крена при ступенчатом задающем сигнале $X_{\gamma_{зад}}$

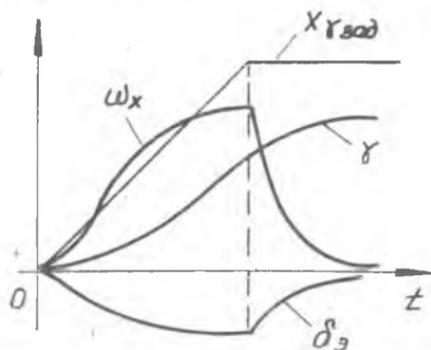


Рис. 7. Переходный процесс в канале крена при линейном задающем сигнале $X_{\gamma_{зад}}$

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НА АВМ

Для исследования изолированного движения крена используется система линеаризованных дифференциальных уравнений бокового возмущенного движения в виде [1]*:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_x &= n_{2\delta_\beta} \delta_\beta - n_{2\omega_x} \omega_x + \dot{f}; \\ \dot{\gamma} &= -n_{4\omega_x} \omega_x; \end{aligned} \right\}$$

$$\text{где } n_{2\omega_x} = -\frac{M_x^{\omega_x}}{I_x}; \quad n_{2\delta_\alpha} = \frac{M_x^{\delta_\alpha}}{I_x}; \quad n_{4\omega_x} = -1; \quad \bar{i} = \frac{M_{x\beta}}{I_x}.$$

Уравнения автопилотов:

$$\text{статического } \delta_\alpha = K_{\alpha\gamma 1}(\gamma - \gamma_{\text{зад}}) + K_{\alpha\omega_x} \omega_x;$$

$$\text{астатического } \delta_\alpha = K_{\alpha\gamma 2}(\gamma - \gamma_{\text{зад}}) + K_{\alpha\omega_x} \omega_x + K_{\alpha\dot{\omega}_x} \dot{\omega}_x.$$

Весовые, геометрические и аэродинамические характеристики гипотетического исследуемого ЛА примем следующими:

$$m = 10\,000 \text{ кг}$$

$$V_0 = 590 \text{ м/с}$$

$$S = 34 \text{ м}^2$$

$$H_0 = 20\,000 \text{ м}$$

$$l = 8,5 \text{ м}$$

$$M_x^{\omega_x} = -4811,8 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$$

$$I_x = 117\,600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

$$M_x^{\delta_\alpha} = -12\,446 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}.$$

Для расчета масштабных коэффициентов ориентировочно назначим максимальные значения моделируемых переменных:

$$\gamma_{\text{max}} = 1,0 \text{ рад}$$

$$\omega_{x\text{max}} = 0,5 \text{ рад/с}$$

$$\delta_{\alpha\text{max}} = 0,1 \text{ рад}$$

$$\dot{\omega}_{x\text{max}} = 2,0 \text{ рад/с}^2,$$

$$f_{\text{max}} = 2,0 \text{ рад/с}^2$$

тогда

$$\mu_\gamma = 100 \text{ В/рад}$$

$$\mu_{\omega_x} = 200 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$$

$$\mu_{\delta_\alpha} = 1000 \text{ В/рад}$$

$$\mu_{\dot{\omega}_x} = 50 \text{ В}\cdot\text{с}^2/\text{рад}$$

$$\mu_f = 50 \text{ В}\cdot\text{с/рад}$$

После перехода к машинным переменным и подстановки численных значений коэффициентов исходная система перепишется в виде:

$$\bar{\omega}_x = 0,41 \bar{\omega}_x - 2,12 \bar{\delta}_\alpha + 4 \bar{f};$$

$$\bar{\gamma} = 0,5 \bar{\omega}_x;$$

$$\bar{\delta}_\alpha = 10 K_{\alpha\gamma 1} (\bar{\gamma} - \bar{\gamma}_{\text{зад}}) + 5,0 K_{\alpha\omega_x} \bar{\omega}_x$$

или

$$\bar{\delta}_\alpha = 10 K_{\alpha\gamma 2} (\bar{\gamma} - \bar{\gamma}_{\text{зад}}) + 5,0 K_{\alpha\omega_x} \bar{\omega}_x + 20 K_{\alpha\dot{\omega}_x} \bar{\omega}_x$$

Структурная блок-схема набора задачи на АВМ, соответствующая полученной системе уравнений, представлена на рис. 8.

* Значки Δ в записи линеаризованных уравнений для краткости опущены.

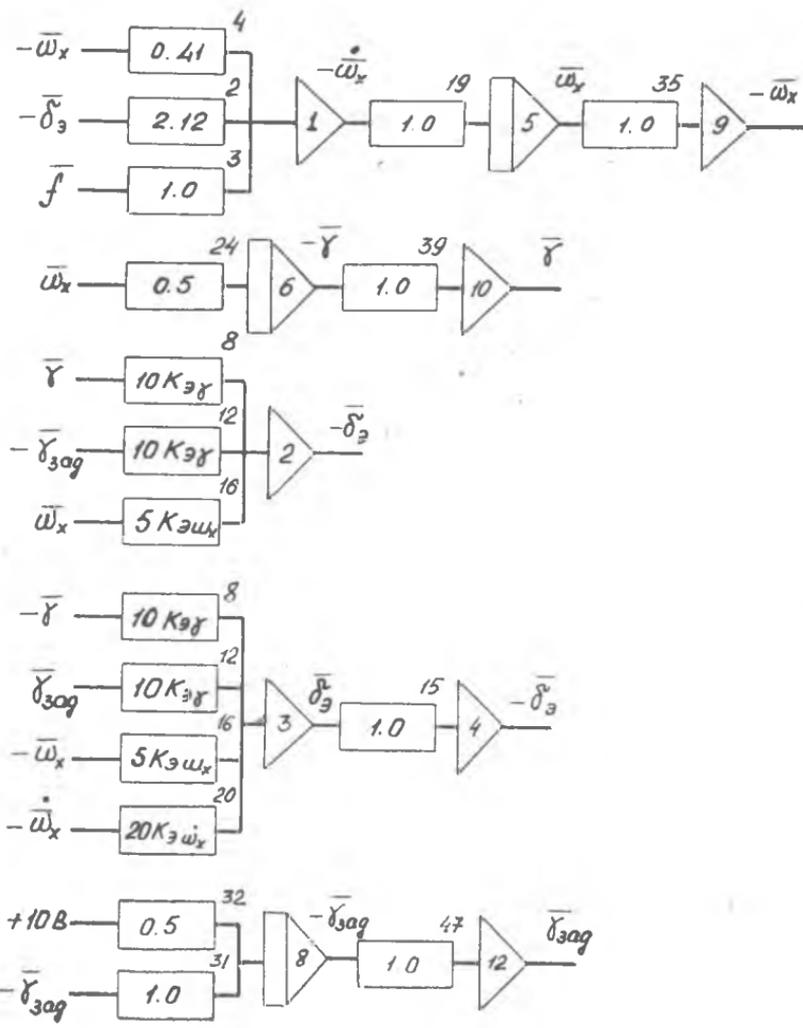


Рис. 8. Блок-схема моделирования динамики бокового движения ЛА на АВМ (изолированное движение по крену)

ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Стабилизация угла крена статическим автопилотом

1. Подготовить АВМ МН-7 и индикатор И-6 к работе согласно инструкции по эксплуатации.

2. На пульте лабораторной установки переключатель «Вариант задачи» установить в положение «1».

При этом в схему будут поданы:
начальное условие по углу крена

$$\gamma_0 = 0,5 \text{ рад } (\bar{\gamma}_0 = 50 \text{ В});$$

внешний возмущающий момент

$$\dot{f} = 0 \text{ рад/с } (\bar{f} = 0 \text{ В});$$

заданный полетный угол крена

$$\gamma_{\text{зад}} = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_{\text{зад}} = 0 \text{ В}).$$

Тумблер «Автопилот» установить в положение «Статический». Переключатель «Выход» установить в положение « γ », тумблер «Вольтметр» — в положение «V1».

В результате на вольтметре V1 будет наблюдаться процесс $\bar{\gamma}(t)$, а на вольтметре V2 — реальное время.

3. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты $K_{\varepsilon\gamma_1}$ и $K_{\varepsilon\omega_x}$ из заданного диапазона, добиться наилучшего качества переходного процесса $\gamma(t)$. Процесс наблюдать на индикаторе И-6. Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра V1 или V2 зафиксировать переменные $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\delta}_y(t)$. Допустимый диапазон изменения коэффициентов автопилота:

$$K_{\varepsilon\gamma_1} = 0,05 - 0,10;$$

$$K_{\varepsilon\omega_x} = 0,02 - 0,06.$$

4. Полученный переходный процесс перевести из машинных переменных в действительные.

Задача 2. Стабилизация угла крена статическим автопилотом при действии возмущающего момента

1. На пульте лабораторной установки переключатель «Вариант задачи» установить в положение «2». При этом в схему будут поданы: начальное условие по углу крена

$$\gamma_0 = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_0 = 0 \text{ В});$$

внешний возмущающий момент

$$\dot{f} = 1 \text{ раз/с}^2 (\bar{f} = 50 \text{ В});$$

заданный полетный угол крена

$$\gamma_{\text{зад}} = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_{\text{зад}} = 0 \text{ В}).$$

Тумблер «Автопилот» установить в положение «Статический». Переключатель «Выход» установить в положение « γ »; тумблер «Вольтметр» — в положение «V1».

2. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты $K_{\varepsilon\gamma 1}$ и $K_{\varepsilon\omega_x}$ из заданного диапазона (см. задачу 1), добиться наилучшего качества переходного процесса $\bar{\gamma}(t)$. Решение наблюдать на индикаторе И-6. Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра V1 (или V2) зафиксировать переменные $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\delta}_y(t)$ и перевести их из машинных в действительные.

Задача 3. Стабилизация угла крена астатическим автопилотом при действии возмущающего момента

1. На пульте лабораторной установки переключатель «Вариант задачи» установить в положение «3». При этом в схему будут поданы:

начальное условие по углу крена

$$\gamma_0 = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_0 = 0 \text{ В});$$

внешний возмущающий момент

$$j = 1 \text{ рад/с}^2 (\bar{j} = 50 \text{ В});$$

заданный полетный угол крена

$$\gamma_{\text{зад}} = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_{\text{зад}} = 0 \text{ В}).$$

Тумблер «Автопилот» установить в положение «Астатический». Переключатель «Выход» установить в положение « γ », тумблер «Вольтметр» — в положение «V1».

2. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты $K_{\varepsilon\gamma 1}$, $K_{\varepsilon\omega_x}$, $K_{\varepsilon\omega_y}$, $K_{\varepsilon\gamma 2}$ из заданного диапазона, добиться наилучшего качества переходного процесса $\bar{\gamma}(t)$. Решение наблюдать на индикаторе И-6. Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра V1 (или V2) зафиксировать переменные $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\delta}_y(t)$ и перевести их из машинных в действительные. Диапазон изменения коэффициентов астатического автопилота:

$$K_{\varepsilon\gamma} = 0,10 \text{ — } 0,30;$$

$$K_{\varepsilon\omega_x} = 0,08 \text{ — } 0,25;$$

$$K_{\varepsilon\omega_y} = 0,05 \text{ — } 0,10.$$

Задача 4. Автоматическое управление креном при ступенчатом законе изменения управляющего сигнала

1. На пульте лабораторной установки переключатель «Вариант задачи» установить в положение «4». При этом в схему будут поданы:

начальное условие по углу крена

$$\gamma_0 = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_0 = 0 \text{ В});$$

внешний возмущающий момент

$$f = 0 \text{ рад/с}^2 (\bar{f} = 0 \text{ В});$$

заданный полетный угол крена

$$\gamma_{\text{зад}} = 0,5 \text{ рад } (\bar{\gamma}_{\text{зад}} = 50 \text{ В}).$$

Тумблер «Автопилот» установить в положение «Статический». Переключатель «Выход» установить в положение « γ », тумблер «Вольтметр» — в положение «V1».

2. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты $K_{\text{эТ1}}$ и $K_{\text{эох}}$ из заданного диапазона (см. задачу 1), добиться наилучшего качества переходного процесса $\bar{\gamma}(t)$. Решение наблюдать на индикаторе И-6. Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра V1 (или V2) зафиксировать переменные $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\delta}_y(t)$, $\bar{\gamma}_{\text{зад}}(t)$ и перевести их из машинных в действительные.

Задача 5. Автоматическое управление креном при линейном законе изменения управляющего сигнала

1. На пульте лабораторной установки переключатель «Вариант задачи» установить в положение «5», при этом в схему будут поданы:

начальное условие по углу крена

$$\gamma_0 = 0 \text{ рад } (\bar{\gamma}_0 = 0 \text{ В});$$

внешний возмущающий момент

$$f = 0 \text{ рад/с}^2 (\bar{f} = 0 \text{ В});$$

заданный закон изменения $\gamma_{\text{зад}}(t)$, близкий к линейному (строго говоря, экспоненциальный).

Тумблер «Автопилот» установить в положение «Статический». Переключатель «Выход» установить в положение « γ », тумблер «Вольтметр» — в положение «V1».

2. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты $K_{\text{эТ1}}$ и

K_{ω_x} из заданного диапазона (см. задачу 1), добиться наилучшего качества переходного процесса $\bar{\gamma}(t)$. Решение наблюдать на индикаторе И-6. Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра $V1$ (или $V2$) зафиксировать переменные $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\delta}_z(t)$, $\bar{\gamma}_{зад}(t)$ и перевести их из машинных в действительные.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Формулировка задачи.
2. Система моделируемых уравнений.
3. Графики переходных процессов $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\delta}_z(t)$ с указанием величин подобранных коэффициентов автопилота.
4. Выводы.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Принцип действия автопилота с жесткой обратной связью.
2. Характеристика переходных процессов по углу крена при действии постоянного возмущающего момента:
для ЛА со статическим автопилотом;
для ЛА с астатическим автопилотом.
3. Поведение ЛА при ступенчатом задании угла крена.
4. Поведение ЛА при линейном задании угла крена.
5. Способы улучшения динамических свойств ЛА в изолированном движении крена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэромеханика самолета/Под ред. А. Ф. Бочкарева. М.: Машиностроение, 1977.

Содержание работы:

1. Исследование плоского разворота ЛА в горизонтальной плоскости.
2. Исследование координированного разворота ЛА в горизонтальной плоскости.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВА РАБОТЫ

Разворот непилотируемого летательного аппарата осуществляется автопилотом посредством центростремительных сил, лежащих в горизонтальной плоскости. Такими силами могут быть: боковая аэродинамическая сила Z_y , фюзеляжа и оперения, вызванная скольжением;

проекция подъемной силы на горизонтальную плоскость $Y \sin \gamma$, обусловленная креном летательного аппарата.

Таким образом, разворот ЛА можно осуществить либо со скольжением без крена, либо с креном, либо одновременно со скольжением и креном.

Разворот ЛА, выполняемый без крена, называется плоским. Плоский разворот выполняется отклонением руля направления и выдерживанием с помощью элеронов нулевого угла крена. Эту задачу можно решить, используя статический автопилот, отклоняющий руль направления по закону

$$\delta_n = K_{n\psi} (\psi - \psi_{зад}) + K_{n\omega_y} \omega_y.$$

При подаче на суммирующее устройство сигнала $X_{\psi_{зад}}$, соответствующего углу $\psi_{зад}$, на который необходимо развернуть ЛА, руль направления отклоняется на величину $\delta_n = -K_{n\psi} \psi_{зад}$. Предполагается, что в начальный момент $\psi = 0$ и $\omega_y = 0$. Такое отклонение руля направления создает момент $M_y^{\delta_n}$, нарушающий равновесие моментов вокруг оси. При этом происходит разворот ЛА, сопровождающийся скольжением β (рис. 1). Наличие скольжения приводит к появлению боковой аэродинамической силы $Z_\beta = Z_\beta^{\beta} \beta - Z_\beta^{\delta_n} \delta_n$, искривляющей траекторию. По

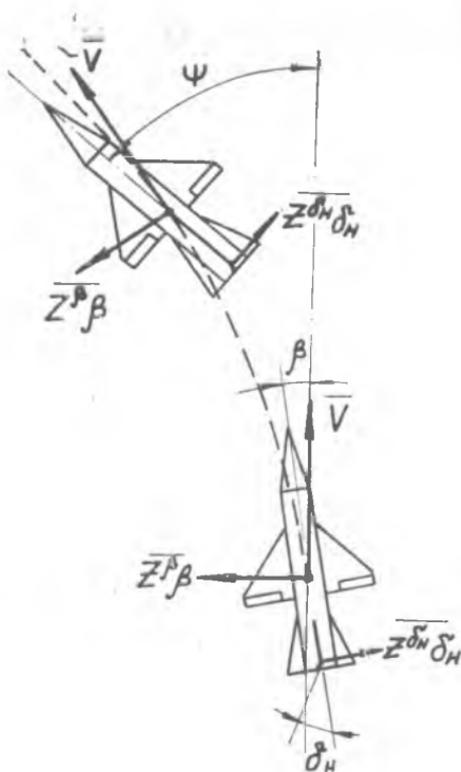


Рис. 1. Плоский разворот летательного аппарата

мере искривления траектории увеличивается угол рыскания ψ , т. е. угол между продольной осью ЛА и первоначальным направлением движения. При этом разность сигналов $X_{\downarrow} - X_{\uparrow}$, поступающих на суммирующее устройство, уменьшается. Вследствие этого угол отклонения руля направления постепенно уменьшается и при достижении заданного значения $\psi_{зад}$ переходит в нейтральное положение.

Сигнал X_{ω_y} , на который реагирует руль направления, способствует устранению «колебательности» переходного процесса по углу рыскания ψ , так как дополнительное отклонение $\Delta\delta_H$, пропорциональное ψ , приводит к искусственному увеличению путевого демпфирующего момента. Пример переходного процесса при плоском развороте показан на рис. 2.

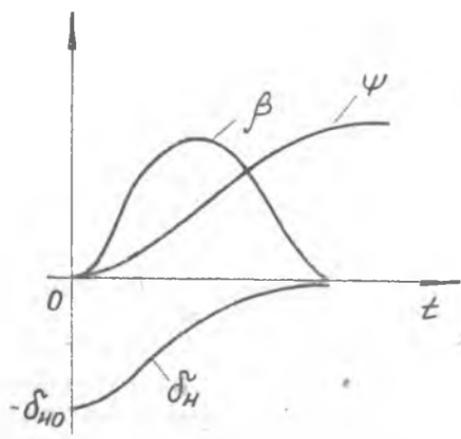


Рис. 2. Переходный процесс в канале рыскания при плоском развороте

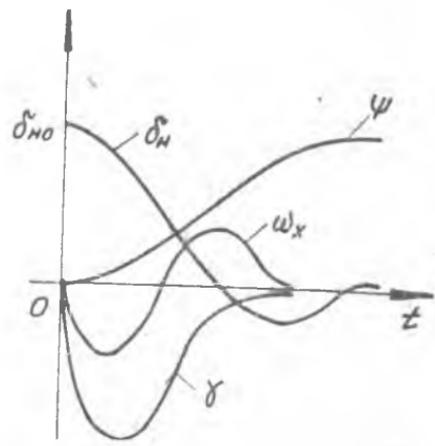


Рис. 3. Переходный процесс в канале рыскания при координированном развороте

Следует отметить, что боковая аэродинамическая сила Z_β в процессе плоского разворота по модулю невелика, поэтому плоский разворот протекает сравнительно медленно.

Для уменьшения времени разворота применяется координированный разворот с накрением ЛА. Наличие крена существенно увеличивает центростремительную силу.

При координированном развороте руль направления и элероны отклоняются автопилотом по закону:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{н}} &= K_{\text{н}\psi}(\psi - \psi_{\text{зад}}) + K_{\text{н}\omega_y} \omega_y; \\ \delta_{\text{э}} &= -K_{\text{э}\psi}(\psi - \psi_{\text{зад}}) + K_{\text{э}\gamma} \gamma + K_{\text{э}\omega_x} \omega_x. \end{aligned} \quad (1)$$

Сигнал X_γ в канале управления элеронами предотвращает при развороте чрезмерное увеличение угла крена; сигнал X_{ω_x} осуществляет необходимую степень демпфирования.

Типичный переходный процесс при координированном развороте показан на рис. 3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НА АВМ

Рассмотрим ЛА в установившемся горизонтальном полете. Для упрощения задачи предположим, что угол крена в развороте изменяется незначительно, а это позволяет в первом приближении принять

$$\text{tg } \gamma \cong \sin \gamma \cong \gamma; \quad \cos \gamma \cong 1.$$

Кроме того, допустим, что влияние продольного движения на боковое отсутствует.

Систему линеаризованных дифференциальных уравнений, описывающих боковое возмущенное движение ЛА, запишем в виде [1]*:

$$\begin{cases} \dot{\beta} + n_{1\beta} \beta + n_{1\omega_x} \omega_x + n_{1\omega_y} \omega_y + n_{1\gamma} \gamma = n_{1\delta_{\text{н}}} \delta_{\text{н}}; \\ \dot{\omega}_x + n_{2\beta} \beta + n_{2\omega_x} \omega_x + n_{2\omega_y} \omega_y = n_{2\delta_{\text{н}}} \delta_{\text{н}} + n_{2\delta_{\text{э}}} \delta_{\text{э}}; \\ \dot{\omega}_y + n_{3\beta} \beta + n_{3\omega_x} \omega_x + n_{3\omega_y} \omega_y = n_{3\delta_{\text{н}}} \delta_{\text{н}}; \\ \dot{\gamma} + n_{4\omega_x} \omega_x + n_{4\omega_y} \omega_y = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} n_{1\beta} &= -\frac{Z_\beta}{mV_0}; \quad n_{1\omega_x} = -a_0; \quad n_{1\omega_y} = -1; \\ n_{1\gamma} &= -\frac{g}{V_0} \cos \theta_0; \quad n_{1\delta_{\text{н}}} = \frac{Z_{\delta_{\text{н}}}}{mV_0}; \quad n_{2\beta} = -\frac{M_x^\beta}{I_x}; \end{aligned}$$

* Значки Δ в записи линеаризованных уравнений для краткости опущены.

$$n_{2\omega x} = -\frac{M_x^{\omega x}}{I_x}; \quad n_{2\omega y} = -\frac{M_y^{\omega y}}{I_x}; \quad n_{2\delta_H} = \frac{M_x^{\delta_H}}{I_x}; \quad n_{2\delta_\Sigma} = \frac{M_x^{\delta_\Sigma}}{I_x};$$

$$n_{3\beta} = -\frac{M_y^{\beta}}{I_y}; \quad n_{3\omega y} = -\frac{M_y^{\omega y}}{I_y}; \quad n_{3\omega y} = -\frac{M_y^{\omega y}}{I_y}; \quad n_{3\delta_H} = \frac{M_y^{\delta_H}}{I_y};$$

$$n_{4\omega x} = -1; \quad n_{4\omega y} = \operatorname{tg} \vartheta_0.$$

Здесь α_0, ϑ_0 — программные значения параметров продольного движения.

При исследовании автоматического управления разворотом эту систему необходимо дополнить кинематическим уравнением для угла рыскания

$$\dot{\psi} = \frac{\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma}{\cos \gamma}.$$

При исследовании плоского разворота принимаем угол крена равным нулю ($\gamma = 0$) и $\cos \gamma = 1$.

Тогда предыдущее уравнение примет вид

$$\dot{\psi} = \omega_y. \quad (3)$$

При исследовании координированного разворота уравнение (3) удобно записать в виде

$$\dot{\psi} \cong \frac{g}{V_0} \gamma. \quad (4)$$

Кроме того, систему (2) необходимо дополнить уравнениями автопилота (1).

Весовые, геометрические и аэродинамические характеристики исследуемого ЛА примем следующими:

$$m = 10\,000 \text{ кг}$$

$$S = 34 \text{ м}^2$$

$$l = 8,5 \text{ м}$$

$$I_x = 117\,600 \text{ кгм}^2$$

$$I_y = 129\,360 \text{ кгм}^2$$

$$V_0 = 590 \text{ м/с}$$

$$H_0 = 20\,000 \text{ м}$$

$$Z^{\beta} = -441\,000 \text{ Н/рад}$$

$$Z^{\delta_H} = -20\,482 \text{ Н/рад}$$

$$M_x^{\beta} = -196\,000 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$$

$$M_x^{\omega x} = -4811,9 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$$

$$M_x^{\omega y} = -3528 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$$

$$M_x^{\delta_H} = -17\,836 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$$

$$M_x^{\delta_\Sigma} = -124\,460 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$$

$$M_y^{\beta} = -713\,440 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$$

$$M_y^{\omega x} = -1607,2 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$$

$$M_y^{\omega y} = -17\,836 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$$

$$M_y^{\delta_H} = -138\,180 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}.$$

Для расчета масштабных коэффициентов ориентировочно назначим максимальные значения моделируемых переменных:

$$\beta_{\max} = 0,05 \text{ рад}$$

$$\delta_{\Sigma \max} = 0,10 \text{ рад}$$

$$\dot{\psi}_{\max} = 1 \text{ рад}$$

$$\omega_{y \max} = 0,10 \text{ рад/с}$$

$$\gamma_{\max} = 1 \text{ рад}$$

$$\delta_{\text{н max}} = 0,33 \text{ рад}$$

$$\omega_x \text{ max} = 0,10 \text{ рад/с.}$$

Тогда

$$\mu_{\beta} = 2000 \text{ В/рад}$$

$$\mu_{\omega z} = 1000 \text{ В/рад}$$

$$\mu_{\psi} = 100 \text{ В/рад}$$

$$\mu_{\omega y} = 1000 \text{ В·с/рад}$$

$$\mu_{\gamma} = 100 \text{ В/рад}$$

$$\mu_{\omega x} = 1000 \text{ В·с/рад.}$$

$$\mu_{\delta \text{н}} = 300 \text{ В/рад}$$

После перехода к машинным переменным и подстановки численных значений коэффициентов исходная система (2), кинематические уравнения (3), (4) и уравнения автопилота (1) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &= 0,07 \bar{\beta} + 0,18 \bar{\omega}_x + 0,2 \bar{\omega}_y + 0,33 \bar{\gamma} - 0,02 \bar{\delta}_n; \\ \bar{\omega}_x &= -8,35 \bar{\beta} - 0,41 \bar{\omega}_x - 0,3 \bar{\omega}_y - 5,06 \bar{\delta}_n - 9,5 \bar{\delta}_z; \\ \bar{\omega}_y &= -2,76 \bar{\beta} - 0,02 \bar{\omega}_x - 0,14 \bar{\omega}_y - 3,56 \bar{\delta}_n; \\ \bar{\gamma} &= -0,2 \bar{\omega}_x - 0,02 \bar{\omega}_y; \\ \bar{\psi} &= -0,02 \bar{\gamma}; \\ \bar{\delta}_n &= 3,0 K_{\text{н}\psi} (\bar{\psi} - \bar{\psi}_{\text{зад}}) + 0,3 K_{\text{н}\omega y} \bar{\omega}_y; \\ \bar{\delta}_z &= -10,0 K_{\text{з}\psi} (\bar{\psi} - \bar{\psi}_{\text{зад}}) + 10 K_{\text{з}\gamma} \bar{\gamma} + K_{\text{з}\omega x} \bar{\omega}_x. \end{aligned} \quad (5)$$

Структурная блок-схема набора задачи на АВМ, соответствующая полученной системе уравнений, представлена на рис. 4.

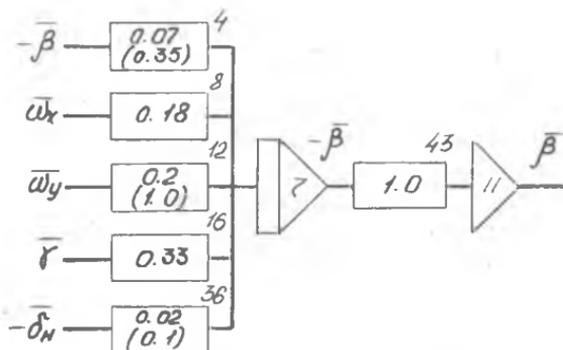
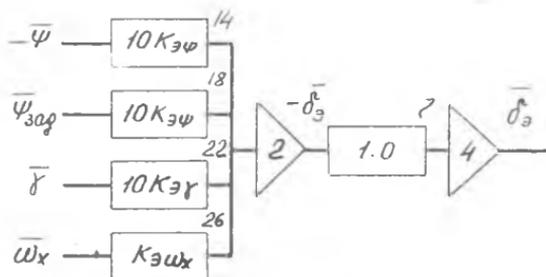
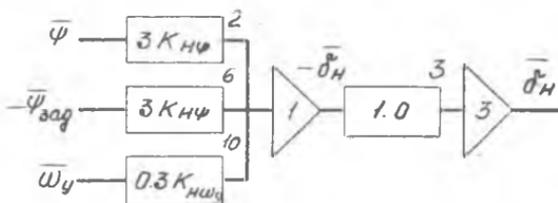
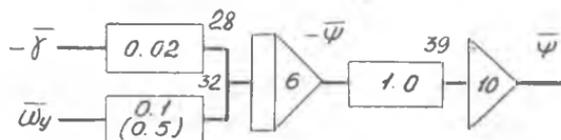
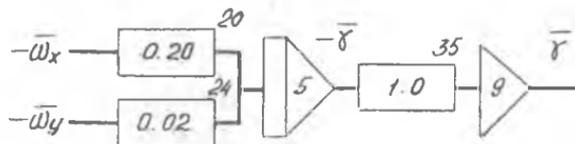
ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Задача 1. Исследование автоматического управления плоским разворотом

1. Подготовить АВМ МН-7 и индикатор И-6 к работе, согласно инструкции по эксплуатации.
2. На пульте лабораторной установки пакетный переключатель установить в положение «Плоский разворот», при этом в схеме будет произведена установка коэффициентов, соответствующих масштабу времени

$$\mu_t = \frac{\bar{t}_{\text{макс}}}{t_{\text{макс}}} = 0,2; \quad (t = \bar{t}/\mu_t),$$

т. е. машинное время в данной задаче становится в пять раз медленнее реального. Это необходимо для того, чтобы сравни-



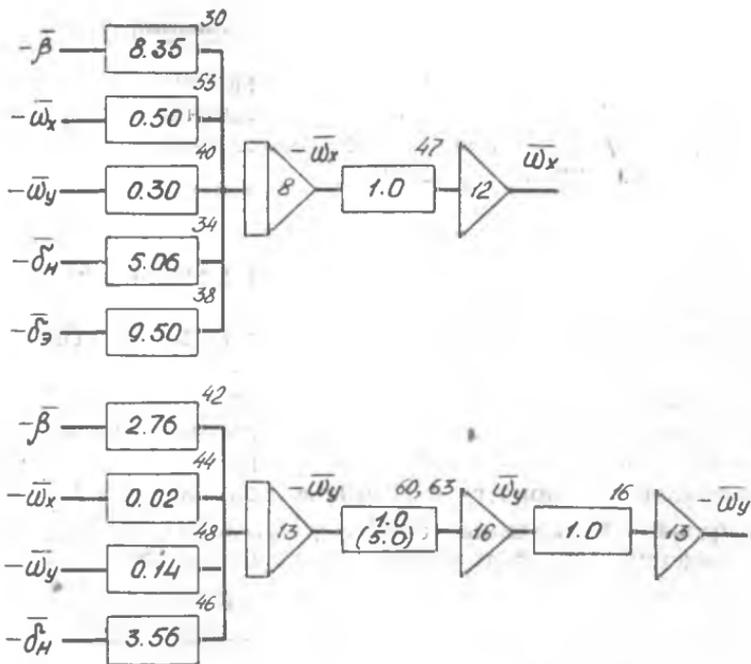


Рис. 4. Блок-схема моделирования процесса разворота летательного аппарата на АВМ

тельно долго протекающий процесс плоского разворота ЛА смоделировать на АВМ за несколько десятков секунд реального времени.

Переключатель «Выход» установить в положение « ψ », тумблер «Вольтметр» — в положение « $V1$ ».

3. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты $K_{H\psi}$ и $K_{H\omega y}$, добиться, чтобы время разворота было минимальным. Решение $\bar{\psi}(t)$ наблюдать на индикаторе И-6 и вольтметре $V1$. Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра $V1$ (или $V2$) зафиксировать переменные $\bar{\delta}_H(t)$, $\bar{\beta}(t)$, $\bar{\psi}(t)$, $\bar{\omega}_y(t)$. Диапазон изменения коэффициентов автопилота курса:

$$K_{H\psi} = 0,5 - 0,8;$$

$$K_{H\omega y} = 2,0 - 5,0.$$

4. Полученный переходный процесс перевести из машинных переменных в действительные.

Задача 2. Исследование автоматического управления координированным разворотом

1. На пульте лабораторной установки пакетный переключатель установить в положение «Координированный разворот», при этом в схеме будет произведена установка коэффициентов, соответствующих масштабу времени,

$$\mu_t = \frac{\bar{t}_{\max}}{t_{\max}} = 1.$$

Переключатель «Выход» установить в положение « ψ », тумблер «Вольтметр» — в положение « VI ».

2. Включить решение нажатием кнопки «Пуск» на АВМ и, подбирая на пульте лабораторной установки коэффициенты автопилотов крена и курса $K_{\psi\gamma}$, K_{ω_x} , $K_{n\psi}$, K_{ω_y} , $K_{\psi\psi}$, добиться, чтобы время разворота было минимальным. Решение $\bar{\psi}(t)$ наблюдать на индикаторе И-6 и вольтметре « VI ». Для полученного переходного процесса с помощью вольтметра VI (или $V2$) зафиксировать переменные $\bar{\delta}_y(t)$, $\bar{\gamma}(t)$, $\bar{\omega}_x(t)$, $\bar{\psi}(t)$. Диапазон изменения коэффициентов автопилотов:

$$K_{n\psi} = 0,5 - 0,8;$$

$$K_{\psi\gamma} = 0,05 - 0,2;$$

$$K_{\omega_y} = 2,0 - 5,0;$$

$$K_{\omega_x} = 0,5 - 5,0.$$

$$K_{\psi\psi} = 0,05 - 0,2;$$

3. Полученный переходный процесс перевести из машинных переменных в действительные.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Формулировка задачи.
2. Система моделируемых уравнений.
3. Графики переходных процессов.
4. Величины коэффициентов автопилота, соответствующие полученному переходному процессу.
5. Выводы.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Система сил, действующих на ЛА при развороте. Типы разворотов.
2. Автоматическое управление плоским разворотом.
3. Автоматическое управление координированным разворотом.
4. Характер переходных процессов по крену и рысканию в плоском и координированном разворотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэродинамика самолета./Под ред. А. Ф. Бочкарева. М.: Машиностроение, 1977.

Составители: *Белоконов Виталий Михайлович,*

Титов Борис Александрович

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРЕНОМ ЛА

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАЗВОРОТОМ ЛА

Методические указания к лабораторным работам

Редактор Э. Грязнова

Техн. редактор Н. Каленюк

Корректор Е. Антонова

Сдано в набор 5.04.82 г. Подписано в печать 20.04.82 г.

Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.

Высокая печать. Литературная гарнитура. Усл. п. л. 1,39.

Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 800 экз. Заказ № 329. Бесплатно.

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

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.