
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 629.73

В. И. ПЕТУНИН

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ С АВТОМАТАМИ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Рассматривается задача ограничения параметров движения летательного аппарата. Показано, что эффективным средством построения систем автоматического управления с автоматами ограничений является селектор каналов управления. Рассмотрены вопросы синтеза таких систем. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: ограничения параметров, селектор каналов, система автоматического управления, синтез, модель.

Введение. При проектировании системы автоматического управления (САУ) летательного аппарата (ЛА) необходимо учитывать допустимые пределы изменения его параметров движения. Эти параметры и пределы их изменения определяются эксплуатационными и аэродинамическими особенностями ЛА, а также характером выполняемой задачи.

К аэродинамическим и прочностным ограничениям относятся [1]: коэффициент подъемной силы c_y , и угол атаки α , которые определяют возможность выхода самолета на режимы сваливания и тряски; нормальная и боковая составляющие перегрузки; угол тангажа ϑ ; угол крена γ ; скорость полета V , определяющаяся, с одной стороны, максимально допустимым скоростным напором (прочность самолета и возможность возникновения флаттера) и, с другой — возможностью выхода самолета на режимы сваливания. Одним из наиболее важных является ограничение угла атаки.

Интенсивное вращение по крену ($\omega_x \neq 0$) приводит, вследствие аэроинерционного взаимодействия продольного и бокового движения, к уменьшению степени устойчивости самолета на малых и умеренных углах атаки. При достаточно больших, так называемых критических, угловых скоростях крена устойчивость теряется и происходит резкое изменение углов атаки и скольжения, возникает большая амплитуда перегрузки, действующая на самолет, и нарастает сама угловая скорость ω_x . Такая форма движения называется аэроинерционным вращением и характерна для скоростных самолетов [2].

Для предотвращения выхода ЛА на аэроинерционное самовращение в полете ограничивают допустимые угловые скорости $\omega_{хд}$.

Задача синтеза автоматов ограничений. Многочисленные ограничения, накладываемые на параметры полета ЛА, вызывают появление в фазовом пространстве областей допус-

тимых G_d и недопустимых состояний G_n (последняя является внешней по отношению к области G_d). Если ЛА по тем или иным причинам вошел в состояние, при котором изображающая точка приблизилась к области недопустимых состояний G_n , то необходимо принять меры по возвращению в область G_d . Функцию возвращения ЛА из области G_n в область G_d выполняют автоматы ограничений.

Задача синтеза автоматов ограничений отдельных параметров ЛА, или алгоритмов безопасности, согласно А. А. Красовскому, может ставиться как задача оптимального управления, задача аналитического конструирования. В работе [3] рассмотрена задача синтеза автоматов ограничений по критерию обобщенной работы. Аддитивное управление объектом при этом может быть представлено следующим образом:

$$u = u_{\text{опт}} + u_0,$$

где управление $u_{\text{опт}}$ назначается на основе обычных требований оптимизации переходных процессов внутри области ограничений; ограничивающее управление u_0 реализуется автоматом ограничений.

Оптимальное ограничивающее управление в данном случае заведомо является релейным [3, рис. 3.8] и приводит к скользящему режиму.

Суммирование выходных сигналов нескольких каналов управления объектом с одним управляющим воздействием приводит к потере статической точности САУ [4].

САУ с селекторами каналов. Для построения САУ с автоматами ограничений параметров ЛА можно использовать логические устройства, реализующие алгоритмы алгебраического селектирования каналов. Обычно применяется принцип, согласно которому с помощью алгебраических селекторов (АС) регулируется параметр многомерного объекта управления, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой управления [4].

Структурная схема САУ ЛА, включающей в себя автопилот (АП), автомат ограничения (АО), сервопривод (СП), датчики (Д1 и Д2), приведена на рис. 1. Здесь переменная Y_1 определяет изменение ограничиваемого параметра, а переменная Y_2 — заданное изменение основного параметра ЛА, Y_{10} и Y_{23} — заданные значения этих параметров.

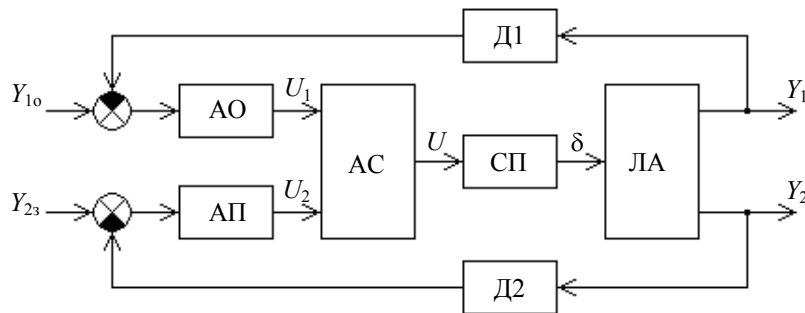


Рис. 1

Для того чтобы значения регулируемых параметров не превысили максимально допустимых (ограничение сверху), селектор минимальных сигналов управления должен пропустить на управление сигнал, соответствующий получению минимальной величины управляющего сигнала (происходит селектирование по минимуму).

Если ограничивают минимальные значения параметров (ограничение снизу), то предпочтение отдается регулятору параметра, для поддержания которого требуется наибольший управляющий сигнал, т.е. осуществляется селектирование по максимуму. В этом случае используют селектор максимальных сигналов управления.

Такая классификация алгебраических селекторов [4] правомерна, если коэффициент передачи объекта управления больше нуля. Если же коэффициент передачи объекта управления

меньше нуля — логика алгебраического селектора должна быть противоположной. Как известно, в уравнения и передаточные функции ЛА по различным параметрам входит знак „минус“ при изменении углов отклонения соответствующих рулей [5]. Поэтому в рассматриваемой САУ ЛА должен использоваться алгебраический селектор максимального сигнала.

Важным информативным параметром для АС, и следовательно для САУ, является разность его входных сигналов $\varepsilon = U_1 - U_2$, знак которой говорит о включении того или иного канала, а величина — о близости к моменту переключения каналов [4].

Выражение, описывающее работу АС входных сигналов, преобразуется с использованием операции выделения модуля M следующим образом:

$$U = \begin{cases} U_1 & \text{при } \mu U_1 > \mu U_2 \\ U_2 & \text{при } \mu U_1 \leq \mu U_2 \end{cases} = \begin{cases} U_1 & \text{при } \mu \varepsilon > 0 \\ U_2 & \text{при } \mu \varepsilon \leq 0 \end{cases} = \frac{1}{2}(U_1 + U_2 + \mu|\varepsilon|),$$

где $\mu = 1$ для селектора максимального сигнала; $\mu = -1$ для селектора минимального сигнала. На рис. 2 приведена эквивалентная нелинейная структура АС: *a* — структурная схема селектора; *b* — нелинейность типа „модуль“.

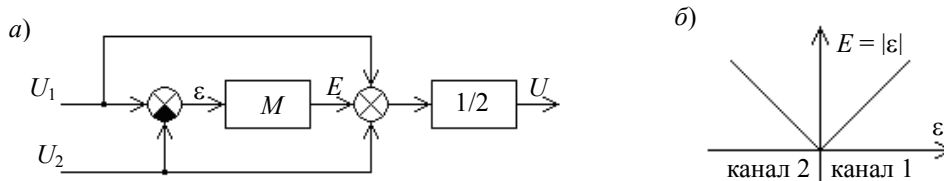


Рис. 2

Селекторы обеспечивают для всех условий управляющее воздействие только одного из нескольких каналов управления, включаемых в работу в зависимости от режима функционирования объекта управления. При этом каждый из каналов управления работает автономно, и его параметры обычно выбираются без учета взаимодействия с другими каналами. Это позволяет сохранить статическую точность и запасы устойчивости, свойственные отдельным каналам управления. Следовательно, алгебраический селектор обеспечивает плавное переключение с одного канала на другой, например, с автопилота на автомат ограничения и обратно на автопилот.

САУ с селекторами каналов также широко используются при управлении газотурбинными двигателями [4].

Синтез законов управления. Аналитический синтез передаточных чисел автопилота и автомата ограничения с учетом заданного качества САУ удобно производить с помощью метода стандартных переходных характеристик [6].

Если передаточная функция замкнутой САУ $\Phi(s)$ не содержит нули, то ее следует приблизить к стандартной передаточной функции вида

$$\Phi^*(s) = \frac{\omega^n}{s^n + A_{n-1}\omega s^{n-1} + \dots + A_1\omega^{n-1}s + \omega^n},$$

где A_i — заданные коэффициенты; ω — собственная частота системы; n — ее порядок.

Если передаточная функция САУ имеет нули, то оптимальный переходный процесс будет обеспечен при условии равенства двух передаточных функций $\Phi(s)$ и $\Phi^*(s)$ вида

$$\Phi(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (a_0 = b_0); \quad (1)$$

$$\Phi^*(s) = \frac{\omega^k}{s^k + C_{k-1}\omega s^{k-1} + \dots + C_1\omega^{k-1}s + \omega^k}. \quad (2)$$

Здесь $\Phi(s)$ — передаточная функция рассматриваемой САУ; $\Phi^*(s)$ — передаточная функция САУ с известным качеством переходного процесса; $k = n - m$.

При $\Phi(s) = \Phi^*(s)$ получаем

$$(b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0)(s^k + C_{k-1} \omega s^{k-1} + \dots + C_1 \omega^{k-1} s + \omega^k) = \omega^k (a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0). \quad (3)$$

Равенство (3) может быть достигнуто за счет соответствующего подбора величин b_i и a_i передаточной функции (1) путем изменения передаточных чисел закона управления. При этом рассчитываемая система будет иметь заданные динамические свойства.

Синтез САУ углом крена с автоматом ограничения угловой скорости крена. Передаточная функция самолета по углу крена γ при управлении элеронами δ_γ [5]:

$$H_{\gamma\delta_\gamma}(s) = \frac{\gamma(s)}{\delta_\gamma(s)} = \frac{-n_\gamma}{(s + n_{22})s},$$

где n_γ и n_{22} — безразмерные коэффициенты.

Закон управления астатического автопилота угла крена со скоростной обратной связью можно представить следующим образом:

$$s\delta_\gamma = k_\gamma(\gamma - \gamma_3) + k_{\dot{\gamma}}s\gamma + k_{\ddot{\gamma}}s^2\gamma,$$

где $k_\gamma, k_{\dot{\gamma}}, k_{\ddot{\gamma}}$ — передаточные числа автопилота; γ_3 — заданный угол крена.

Синтез астатического автопилота угла крена со скоростной обратной связью рассмотрен в работе [5].

Передаточная функция самолета по угловой скорости крена ω_x при управлении элеронами δ_ω :

$$H_{\gamma\delta_\omega}(s) = \frac{\omega_x(s)}{\delta_\omega(s)} = \frac{-n_\omega}{s + n_{22}}.$$

Представим закон управления автомата ограничения угловой скорости крена:

$$s\delta_\omega = k_\omega(\omega_x - \omega_{x0}) + k_{\dot{\omega}}s\omega_x,$$

где $k_\omega, k_{\dot{\omega}}$ — передаточные числа автомата ограничения.

Передаточная функция замкнутой системы по угловой скорости крена следующая:

$$\Phi_\omega(s) = \frac{k_\omega n_\omega}{s^2 + (n_{22} + k_{\dot{\omega}} n_\omega)s + k_\omega n_\omega}.$$

Желаемая передаточная функция замкнутой системы по угловой скорости крена:

$$\Phi_\omega^*(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + A_1 \omega s + \omega^2}.$$

Тогда передаточные числа автомата ограничения:

$$k_\omega = \frac{\omega^2}{n_\omega}; \quad k_{\dot{\omega}} = \frac{A_1 \omega - n_{22}}{n_\omega}.$$

Схема моделирования рассмотренной САУ угловым движением самолета с автоматом ограничения угловой скорости крена, построенная с использованием пакета Simulink системы Matlab, приведена на рис. 3, а; на рис. 3, б представлены переходные процессы, полученные для относительного времени \bar{t} . Реальное время $t = \tau_a \bar{t}$. В качестве исходных параметров самолета, согласно [5], взяты следующие значения: $n_\gamma = 30,7$; $n_{22} = 6,7$; аэродинамическая постоянная времени — $\tau_a = 2,5$ с. Для реализации монотонных процессов в отдельных каналах при $A_{1\omega} = 2$ и $\omega = 7,96$ в результате синтеза получены следующие безразмерные передаточные

числа: $k_\gamma = 16,422$; $k_{\dot{\gamma}} = 6,19$; $k_{\ddot{\gamma}} = 0,56$; $k_{\omega} = 2,063$; $k_{\dot{\omega}} = 0,3$. Задающие воздействия каналов: $\gamma_3 = 1$; $\omega_{x0} = 0,5$.

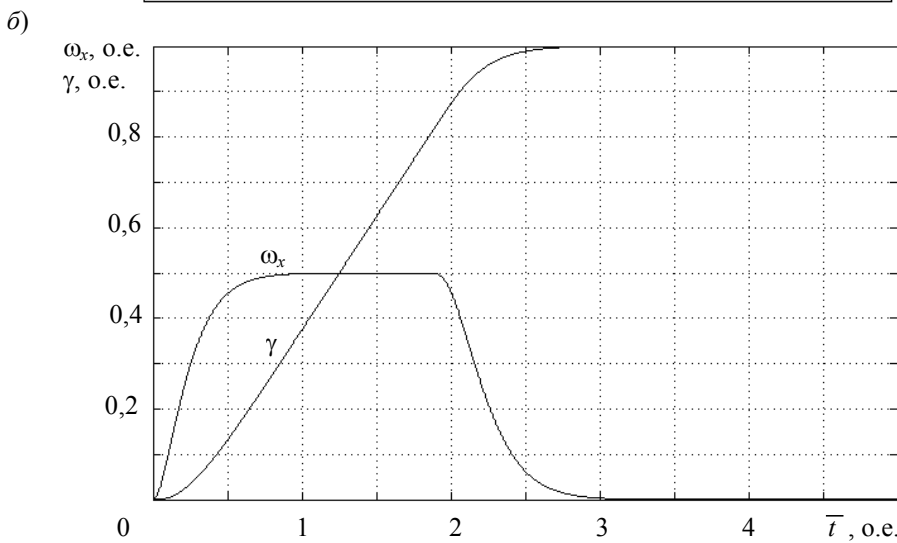
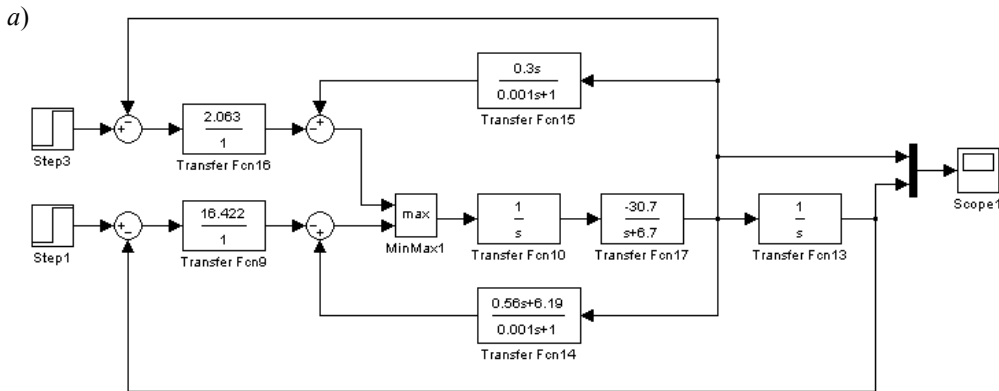


Рис. 3

Синтез САУ углом тангажа с автоматом ограничения угла атаки. Представим передаточную функцию самолета по углу тангажа ϑ при управлении рулем высоты δ_B [5]:

$$H_{\vartheta\delta_B}(s) = \frac{\vartheta(s)}{\delta_B(s)} = \frac{-n_B(s+n_{22})}{(s^2 + 2d_0\omega_0s + \omega_0^2)s},$$

где собственная частота ω_0 , коэффициент затухания d_0 .

Представим закон управления астатического автопилота угла тангажа со скоростной обратной связью:

$$s\delta_B = k_\vartheta(\vartheta - \vartheta_3) + \frac{1}{s+n_{22}}(k_{\dot{\vartheta}} + sk_{\ddot{\vartheta}} + s^2k_{\ddot{\vartheta}})s\vartheta,$$

где $k_\vartheta, k_{\dot{\vartheta}}, k_{\ddot{\vartheta}}$ — передаточные числа автопилота.

Синтез астатического автопилота угла тангажа со скоростной обратной связью подробно рассмотрен в работе [6].

Передаточная функция самолета по углу атаки α при управлении рулем высоты δ_B [5]:

$$H_{\alpha\delta_B}(s) = \frac{\alpha(s)}{\delta_B(s)} = \frac{-n_B}{s^2 + 2d_0\omega_0s + \omega_0^2},$$

закон управления автомата ограничения угла атаки

$$s\delta_B = k_\alpha(\alpha - \alpha_0) + k_{\dot{\alpha}}s\alpha + k_{\ddot{\alpha}}s^2\alpha,$$

где $k_\alpha, k_{\dot{\alpha}}, k_{\ddot{\alpha}}$ — передаточные числа автомата ограничения.

Передаточная функция замкнутой системы по углу атаки:

$$\Phi_\alpha(s) = \frac{k_\alpha n_B}{s^3 + (2d_0\omega_0 + n_B k_{\ddot{\alpha}})s^2 + (\omega_0^2 + n_B k_{\dot{\alpha}})s + k_\alpha n_B},$$

желаемая передаточная функция замкнутой системы по углу атаки:

$$\Phi_\alpha^*(s) = \frac{\omega^3}{s^3 + A_2\omega s^2 + A_1\omega^2 s + \omega^3},$$

тогда передаточные числа автомата ограничения:

$$k_\alpha = \frac{\omega^3}{n_B}; k_{\dot{\alpha}} = \frac{A_1\omega^2 - \omega_0^2}{n_B}; k_{\ddot{\alpha}} = \frac{A_2\omega - 2d_0\omega_0}{n_B}.$$

Схема моделирования рассмотренной САУ угловым движением самолета, построенная с использованием пакета Simulink системы Matlab, приведена на рис. 4, а. При этом в качестве исходных параметров самолета, согласно [5], взяты следующие значения: $n_B = 49$; $2d_0\omega_0 = 5,25$; $\omega_0^2 = 43,88$; $\tau_a = 2,5$ с. Для реализации монотонных процессов в отдельных каналах при $A_{1\alpha} = A_{2\alpha} = 3$ и $\omega = 7,96$ в результате синтеза получены следующие безразмерные передаточные числа: $k_v = 10,288$; $k_{\dot{v}} = 9,307$; $k_{\ddot{v}} = 4,152$; $k_{\ddot{v}} = 0,429$; $k_\alpha = 10,289$; $k_{\dot{\alpha}} = 2,98$; $k_{\ddot{\alpha}} = 0,38$. Задающие воздействия каналов: $\vartheta_3 = 1$; $\alpha_0 = 0,2$.

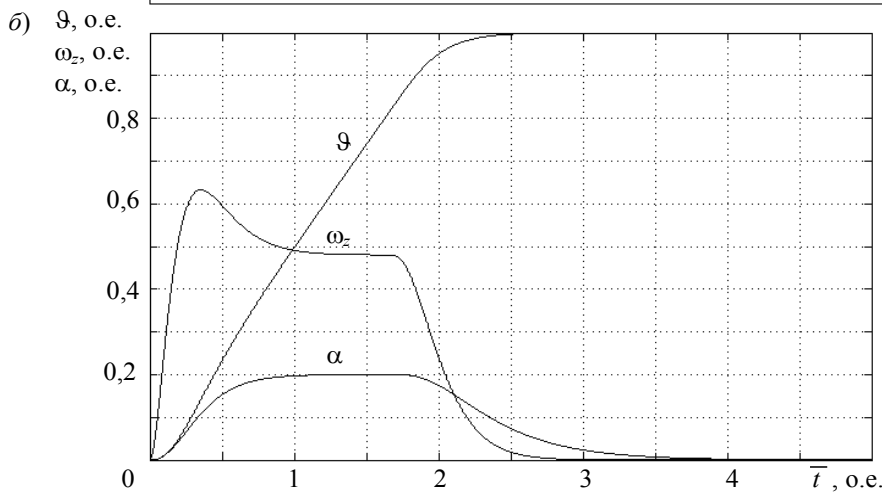
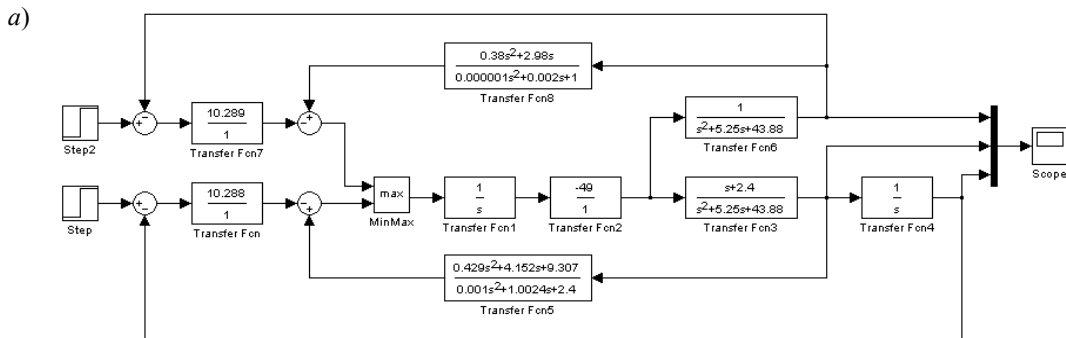


Рис. 4

Результаты моделирования переходных процессов по ограничиваемым координатам (см. рис. 3, б и рис. 4, б) показывают необходимую точность ограничения предельных параметров $\omega \leq \omega_{x_0} = 0,5$, $\alpha \leq \alpha_0 = 0,2$ и хорошее качество управления на режимах переключения.

Заключение. Эффективным средством построения САУ с автоматами ограничений предельных параметров ЛА является селектор каналов управления. Рассмотрена задача синтеза САУ с автоматами ограничений как задача приближения передаточных функций отдельных каналов к желаемым передаточным функциям. Показано, что включение автомата ограничения в САУ ЛА с помощью алгебраического селектора позволяет обеспечить необходимую точность ограничения и плавные переходные процессы при переключении каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михалев И. А., Окоемов Б. Н., Чикулаев М. С. Системы автоматического управления самолетом. М.: Машиностроение, 1987. 240 с.
2. Аэромеханика самолета: Динамика полета / Под ред. А. Ф. Бочкарева и В. В. Андриевского. М.: Машиностроение, 1985. 360 с.
3. Красовский А. А., Буков В. Н., Шендрик В. С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М.: Наука, 1977. 272 с.
4. Петунин В. И. Принципы построения логико-динамических систем автоматического управления газотурбинными двигателями // Вестн. УГАТУ. 2003. Т. 4, № 1. С. 78—87.
5. Боднер В. А. Системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1973. 506 с.
6. Петунин В. И. Синтез законов управления канала тангажа автопилота // Вестн. УГАТУ. Сер. „Управление, вычислительная техника и информатика“. 2007. Т. 9, № 2 (20). С. 25—31.

Сведения об авторе

Валерий Иванович Петунин

— канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения;
E-mail: petunin_vi@mail.ru

Рекомендована кафедрой
авиационного приборостроения

Поступила в редакцию
29.01.10 г.