

УДК 621.452-52

В. И. ПЕТУНИН, А. И. ФРИД

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ

Проведен анализ влияния временного запаздывания в объекте управления на устойчивость систем управления переходными режимами ГТД. Разработаны методы обеспечения требуемых динамических характеристик САУ частотой вращения ротора ГТД на переходных режимах. Показано, что применение логико-динамического управления позволяет обеспечить астатизм каналов разгона и сброса частоты вращения и тем самым повысить устойчивость систем управления. Система автоматического управления; селектор; газотурбинный двигатель; временное запаздывание; частота вращения; переходные режимы; устойчивость; статический канал; астатический канал

В системах автоматического управления (САУ) авиационными газотурбинными двигателями (ГТД) выбор режимов работы двигателя осуществляется с помощью селекторов каналов управления [1]. Селекторы обеспечивают включение или режима стабилизации двигателя по частоте вращения ротора и, следовательно, поддержание его тяги, или режимов изменения частоты вращения ротора и тяги – режимов разгона и сброса.

Структурная схема САУ частотой вращения ротора ГТД приведена на рис. 1, где ЗЧВ, ЗР, ЗС – задатчики частоты вращения, разгона и сброса, соответственно; РЧВ, РР, РС – регуляторы частоты вращения, разгона и сброса, соответственно; АС_{min} – алгебраический селектор минимального сигнала; АС_{max} – алгебраический селектор максимального сигнала; ИР – изодромный регулятор; ИУ – исполнительное устройство; ИЧВ – измеритель частоты вращения ротора; Д – дифференциатор.

Общие принципы анализа и синтеза САУ ГТД с селекторами на режимах ограничения и управления различными параметрами двигателя рассмотрены в работах [2]. В существующих САУ ГТД, как правило, РР и РС строятся как статические каналы управления производной частоты вращения ротора. Анализ и синтез этих каналов необходимо проводить на основе динамических характеристик ГТД, в том числе и временного запаздывания по подаче топлива в камеру сгорания двигателя, которое может приводить к снижению запасов устойчивости. В данной статье представлены результаты исследования влияния временного запаздывания

при управлении расходом топлива в ГТД на устойчивость каналов управления двигателем на переходных режимах.

1. САУ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ГТД С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ОБЪЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ

В переходных режимах выделение тепла при сгорании топлива, а следовательно, и изменение температуры газа на выходе из камеры сгорания происходит с некоторым запаздыванием во времени относительно изменений расхода топлива. Это время необходимо для того, чтобы частицы топлива могли нагреться, испариться и сгореть. В расчетах это запаздывание условно относят к запаздыванию подачи топлива через форсунки и аппроксимируют звеном постоянного запаздывания $e^{-\tau p}$. Величина запаздывания τ изменяется в зависимости от режима работы двигателя и условий полета и определяется главным образом величиной давления газа в камере сгорания, с уменьшением которого время запаздывания τ увеличивается. По опытным данным диапазон изменения τ находится в пределах от 0,005 до 0,02 с [4].

Передаточная функция ГТД по частоте вращения ротора при изменении расхода топлива в камере сгорания имеет следующий вид

$$W_{\text{гтд}}(p) = K_{\text{гтд}} \frac{A_{\text{гтд}}(p)}{B_{\text{гтд}}(p)} e^{-\tau p}.$$

Передаточная функция изодромного регулятора

$$W_{\text{ир}}(p) = K_{\text{ир}} \frac{T_{\text{ир}} p + 1}{p}.$$

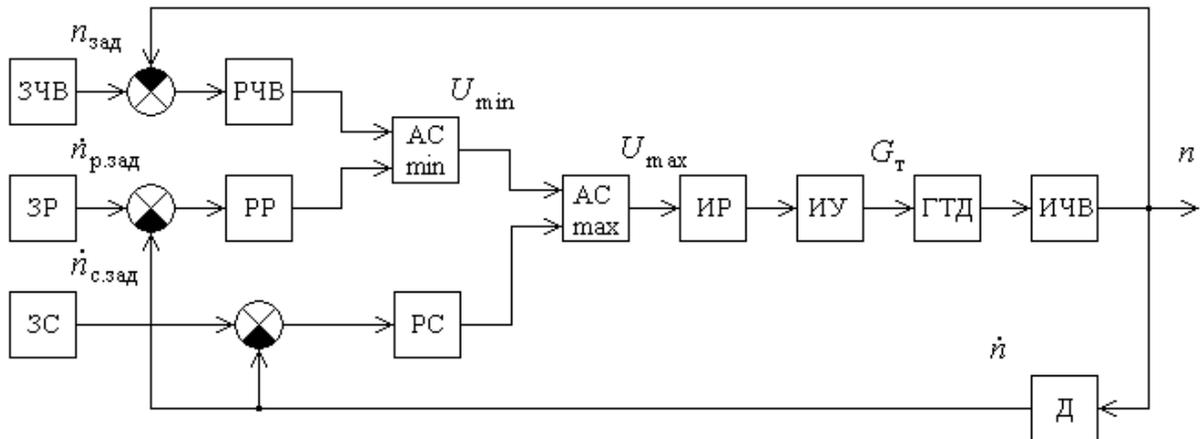


Рис. 1. Структурная схема САУ частотой вращения ротора ГТД

Пусть передаточная функция регулятора частоты вращения ротора

$$W_{рчв}(p) = K_{рчв} \frac{C_{рчв}(p)}{D_{рчв}(p)},$$

а передаточная функция статического регулятора разгона

$$W_{срр}(p) = K_{срр} \frac{E_{срр}(p)}{F_{срр}(p)}.$$

Если передаточные функции исполнительного устройства

$$W_{иу}(p) = \frac{1}{T_1 p + 1},$$

измерителя частоты вращения ротора

$$W_{ичв}(p) = 1,$$

дифференциатора

$$W_{д}(p) = \frac{p}{T_2 p + 1},$$

то передаточные функции отдельных разомкнутых каналов САУ имеют следующий вид:

- канал регулирования частоты вращения ротора:

$$\begin{aligned} W_{крчв}(p) &= W_{рчв}(p)W_{ир}(p)W_{иу}(p)W_{гтд}(p)W_{ичв}(p) = \\ &= K_{рчв}K_{ир}K_{гтд} \frac{A_{гтд}(p)C_{рчв}(p)(T_{ир}p + 1)e^{-\tau p}}{p(T_1 p + 1)B_{гтд}(p)D_{рчв}(p)}; \end{aligned}$$

- канал разгона:

$$\begin{aligned} W_{кр}(p) &= W_{срр}(p)W_{ир}(p)W_{иу}(p) \times \\ &\times W_{гтд}(p)W_{ичв}(p)W_{д}(p) = K_{срр}K_{ир}K_{гтд} \times \\ &\times \frac{A_{гтд}(p)E_{срр}(p)(T_{ир}p + 1)e^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)B_{гтд}(p)F_{срр}(p)}. \end{aligned}$$

Следовательно, канал разгона является статическим по скорости изменения частоты вращения ротора.

Аналогично это можно показать для канала сброса частоты вращения ротора ГТД.

В работе [2] был проведен синтез канала регулирования частоты вращения ротора с помощью метода приближения передаточной функции разомкнутой системы к желаемой. Также это можно сделать и для канала разгона

$$W_{кр}(p) = W^*(p),$$

где $W^*(p)$ – передаточная функция желаемой разомкнутой системы.

Это позволяет провести анализ устойчивости САУ переходными режимами ГТД на основе исследования различных структур желаемой системы $W^*(p)$.

Пусть передаточная функция разомкнутого канала разгона ГТД

$$W^*(p) = \frac{K e^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где T_1 – постоянная времени исполнительного устройства; T_2 – постоянная времени инерционности дифференциатора. Амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы

$$W^*(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}e^{-j\tau\omega},$$

где

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(T_1^2 \omega^2 + 1)(T_2^2 \omega^2 + 1)}},$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg T_1 \omega - \arctg T_2 \omega.$$

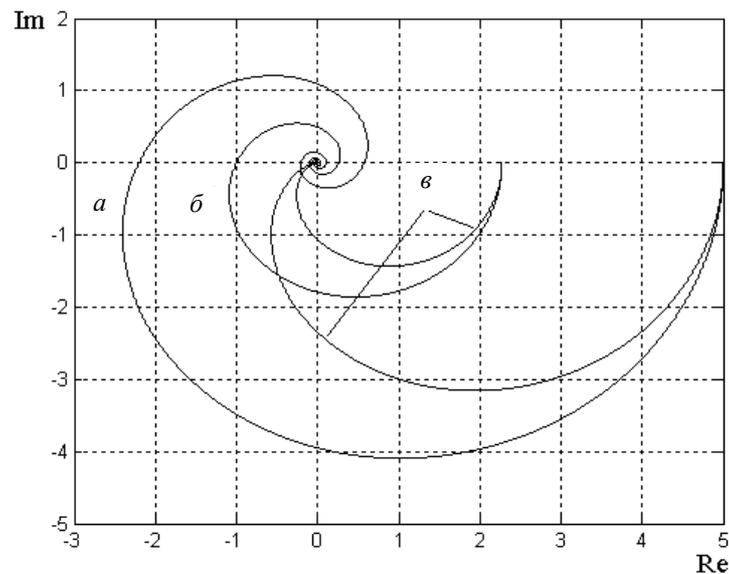


Рис. 2. Годографы Найквиста статического канала разгона САУ ГТД: *a* – неустойчивой системы при $K = 5$; *b* – системы на границе устойчивости при $K_{кр} = 2,269$; *в* – систем с регулятором Смита

Тогда условия границы устойчивости

$$A(\omega_{cp}) = \frac{K_{кр}}{\sqrt{(T_1^2 \omega_{cp}^2 + 1)(T_2^2 \omega_{cp}^2 + 1)}} = 1;$$

$$\varphi(\omega_{cp}) = -\arctg T_1 \omega_{cp} - \arctg T_2 \omega_{cp} - \tau \omega_{cp} = -\pi,$$

или

$$K_{кр} = \sqrt{(T_1^2 \omega_{cp}^2 + 1)(T_2^2 \omega_{cp}^2 + 1)};$$

$$\arctg T_1 \omega_{cp} + \arctg T_2 \omega_{cp} + \tau \omega_{cp} = \pi,$$

где ω_{cp} – частота среза; $K_{кр}$ – критический коэффициент передачи.

Известно, что САУ второго порядка без запаздывания всегда устойчива. В этом случае система будет устойчива при выполнении условия

$$\arctg T_1 \omega_{cp} + \arctg T_2 \omega_{cp} + \tau \omega_{cp} < \pi.$$

Пусть $T_1 = 0,02$ с, $T_2 = 0,02$ с, $\tau = 0,02$ с, тогда получаем $\omega_{cp} = 75,5$ с⁻¹; $K_{кр} = 2,269$. Годографы Найквиста статического канала разгона САУ ГТД при различных коэффициентах передачи приведены на рис. 2.

Если $T_2 = 0,02$ с, то есть ухудшаются динамические характеристики дифференциатора, то тогда $\omega_{cp} = 49,5$ с⁻¹ и $K_{кр} = 7,1062$. В этом случае САУ с коэффициентом $K = 5$ становится устойчивой в отличие от предыдущей системы.

2. САУ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯТОРА СМИТА

Трудности управления в системе с задержками возникают из-за того, что необходимая информация, поступившая слишком поздно, ведет к нарушению устойчивости. Проблемы

управления системами с временными задержками были решены в 1957 году профессором Отто Смитом из Беркли [5]. Он предложил регулятор, включающий модель системы, который получил название экстраполятора Смита (Smith predictor) (рис. 3). Этот регулятор включает в себя как модель процесса, так и учет временной задержки [5, 6]. Передаточная функция экстраполятора $W_m(p)$ представляет собой модель технической системы и необязательно должна совпадать с передаточной функцией процесса. Передаточная функция замкнутой внутренней подсистемы

$$\Phi_{вн}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{W_p(p)}{1 + (1 - e^{-\tau p})W_p(p)W_m(p)}.$$

Тогда передаточная функция всей замкнутой системы

$$\Phi(p) = \frac{Y(p)}{Y_0(p)} = \frac{W_p(p)W_{np}(p)e^{-\tau p}}{1 + (1 - e^{-\tau p})W_p(p)W_m(p) + W_p(p)W_{np}(p)e^{-\tau p}}.$$

Если $W_m(p)$ – точная модель технического процесса, совпадающая с $W_{np}(p)$, т. е. выполняется условие

$$W_m(p) = W_{np}(p),$$

то передаточная функция замкнутой системы принимает вид

$$\Phi(p) = \frac{Y(p)}{Y_0(p)} = \frac{W_p(p)W_{np}(p)e^{-\tau p}}{1 + W_p(p)W_{np}(p)}.$$

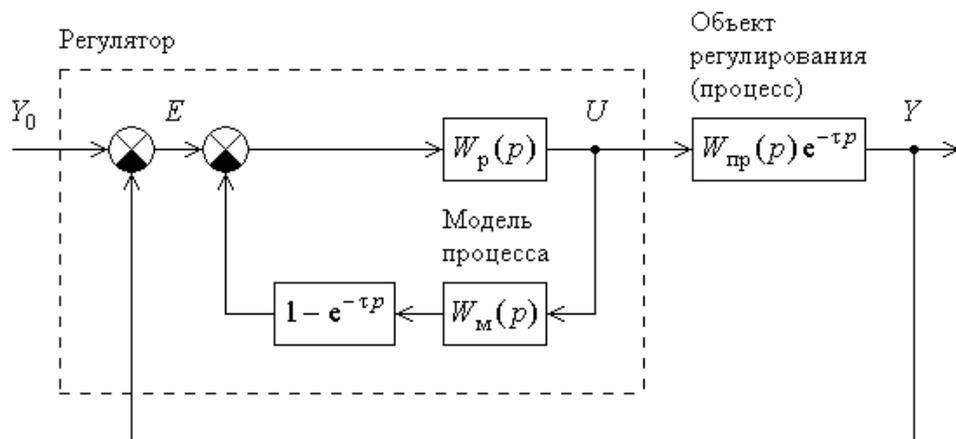


Рис. 3. Блок-схема системы с регулятором Смита

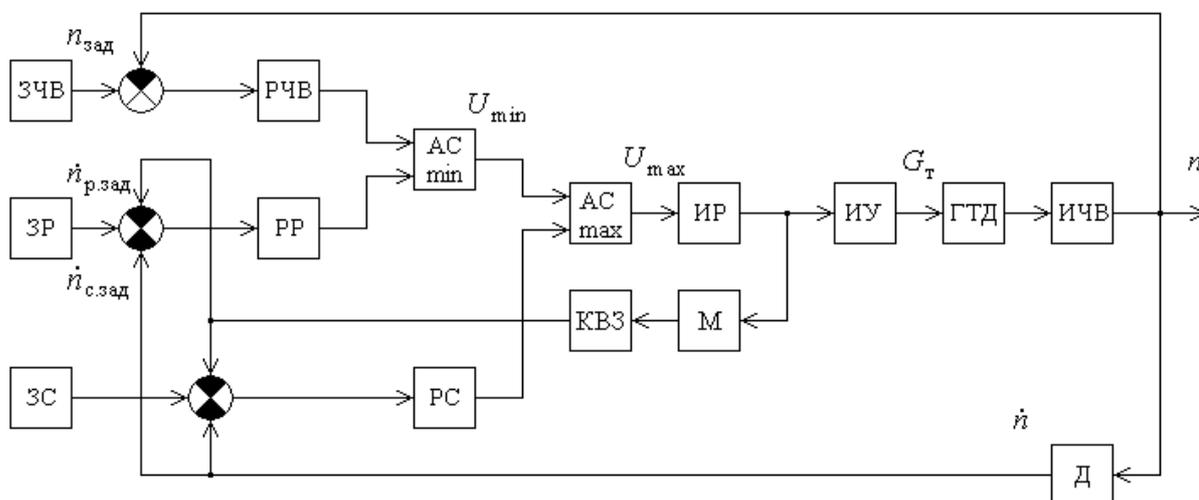


Рис. 4. Структурная схема САУ частотой вращения ротора ГТД с регулятором Смита

Здесь $W_p(p)$ – передаточная функция обычного регулятора, $W_m(p)$ – передаточная функция модели процесса, а $e^{-\tau p}$ – передаточная функция временной задержки. У экстраполятора Смита знаменатель передаточной функции замкнутой системы такой же, как у системы без задержки. Иными словами, переходная характеристика замкнутой системы выглядит так же, как и у системы без временной задержки, но с отставанием на время τ .

Уравнение регулятора можно записать в явной форме. Без экстраполятора управляющий сигнал

$$U(p) = W_p(p)E(p),$$

а с экстраполятором

$$U(p) = W_p(p)[E(p) + W_m(p) \times e^{-\tau p}U(p) - W_m(p)U(p)].$$

Первое слагаемое – обычный выходной сигнал регулятора, вычисляемый на основе ошибки управления, второе – поправочный множитель, относящийся к предыдущему управляющему сигналу $x(t - \tau)$, умноженный на передаточную функцию модели процесса $W_m(p)$, а последнее – учитывает текущий управляющий сигнал.

Структурная схема САУ частотой вращения ротора ГТД с введенным регулятором Смита представлена на рис. 4, где М – модель, КВЗ – компенсатор временной задержки.

Годографы Найквиста САУ частотой вращения ротора ГТД с регулятором Смита при различных коэффициентах передачи приведены на рис. 2. Однако, как отмечено в работе [7], реализация регулятора Смита связана с определенными трудностями. Поэтому можно рассмотреть иные методы обеспечения устойчивости САУ при наличии временных задержек.

3. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Пусть передаточная функция разомкнутого канала разгона ГТД

$$W^*(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{(Tp+1)(T_1p+1)(T_2p+1)},$$

где T – постоянная времени специально введенного в канал разгона инерционного звена с передаточной функцией $1 / (Tp + 1)$; T_1 – постоянная времени исполнительного устройства; T_2 – постоянная времени инерционности дифференциатора. Амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы

$$W^*(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}e^{-j\tau\omega},$$

где

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(T^2\omega^2+1)(T_1^2\omega^2+1)(T_2^2\omega^2+1)}};$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg T\omega - \arctg T_1\omega - \arctg T_2\omega.$$

Тогда условия границы устойчивости

$$A(\omega_{cp}) = \frac{K_{кр}}{\sqrt{(T^2\omega_{cp}^2+1)(T_1^2\omega_{cp}^2+1)(T_2^2\omega_{cp}^2+1)}} = 1;$$

$$\varphi(\omega_{cp}) = -\arctg T\omega_{cp} - \arctg T_1\omega_{cp} - \arctg T_2\omega_{cp} - \tau\omega_{cp} = -\pi,$$

или

$$K_{кр} = \sqrt{(T^2\omega_{cp}^2+1)(T_1^2\omega_{cp}^2+1)(T_2^2\omega_{cp}^2+1)};$$

$$\arctg T\omega_{cp} + \arctg T_1\omega_{cp} + \arctg T_2\omega_{cp} + \tau\omega_{cp} = \pi.$$

Из последнего выражения получаем значения для T :

$$T = \frac{1}{\omega_{cp}} \operatorname{tg}(\pi - \arctg T_1\omega_{cp} - \arctg T_2\omega_{cp} - \tau\omega_{cp}).$$

Пусть $T_1 = 0,02$ с, $T_2 = 0,01$ с, $\tau = 0,02$ с, тогда в результате расчетов получаем зависимость $K_{кр} = K_{кр}(T)$, представленную на рис. 5 и определяющую границу устойчивости. При $T = 0,0875$ с $K_{кр} = 5$.

САУ будет устойчива при выполнении условия

$$\arctg T\omega_{cp} + \arctg T_1\omega_{cp} + \arctg T_2\omega_{cp} + \tau\omega_{cp} < \pi.$$

Как видно из полученных результатов, применение дополнительного инерционного звена позволяет существенно расширить область устойчивости по сравнению с первым вариантом $W^*(p)$. Дополнительное инерционное звено (ИЗ) может быть введено в САУ на входе селектора минимального сигнала (рис. 6).

4. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АСТАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Пусть передаточная функция разомкнутого канала разгона ГТД

$$W^*(p) = \frac{Ke^{-\tau p}}{p(T_1p+1)(T_2p+1)},$$

где $W_{\text{уи}} = 1/p$ – передаточная функция управляемого интегратора, введенного в канал разгона; T_1 – постоянная времени исполнительного устройства; T_2 – постоянная времени инерционности дифференциатора.

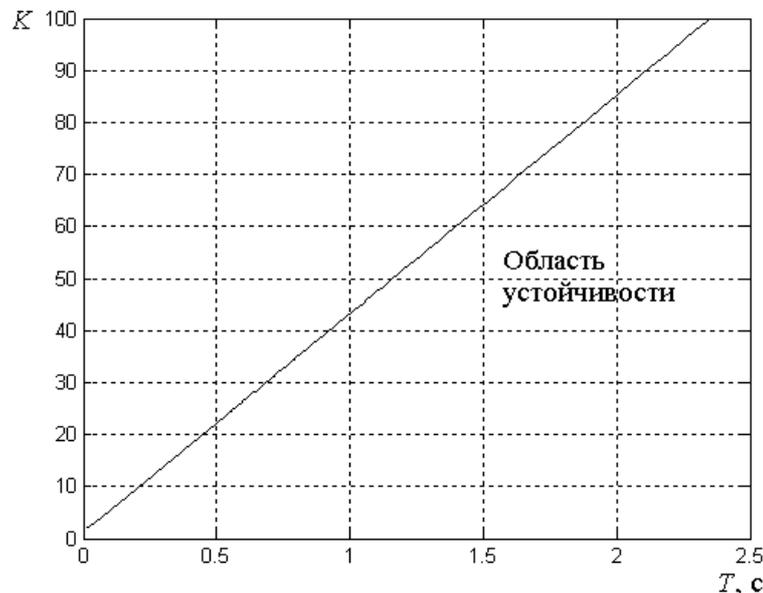


Рис. 5. Зависимость $K_{кр} = K_{кр}(T)$, соответствующая границе устойчивости для статического канала разгона при введении дополнительной инерционности

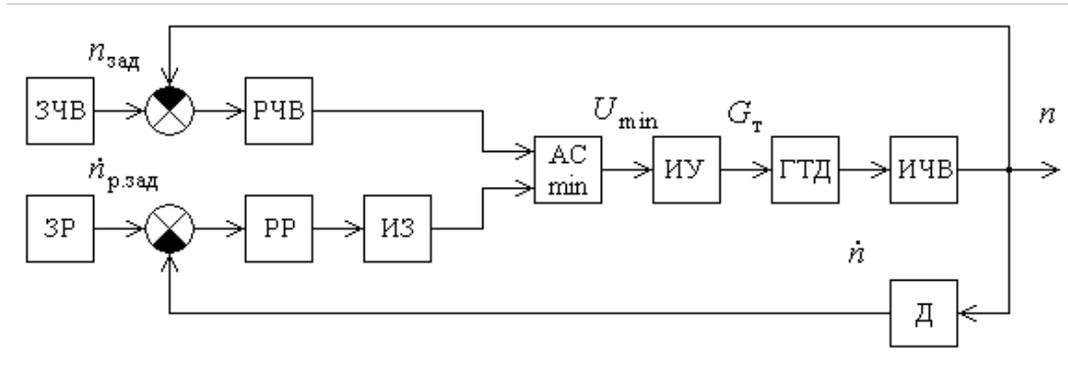


Рис. 6. Структурная схема устойчивого статического канала разгона

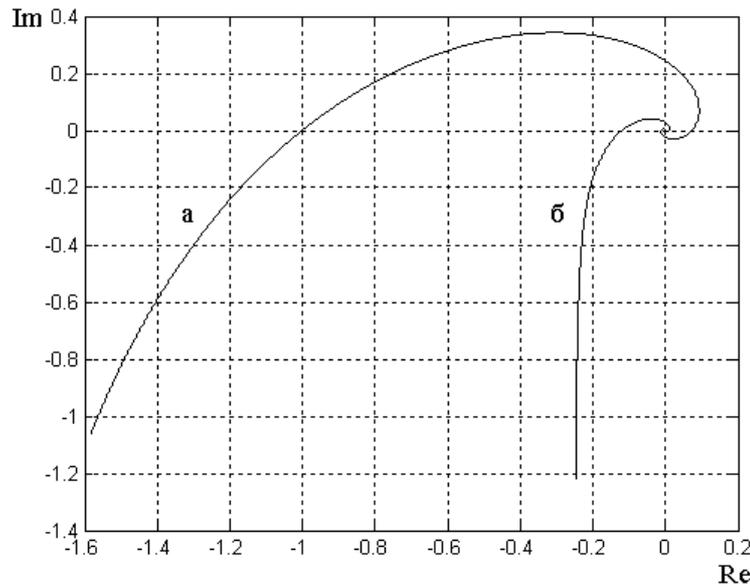


Рис. 7. Годографы Найквиста астатического канала разгона САУ ГТД: а – системы на границе устойчивости при $K_{кр} = 41,991 \text{ с}^{-1}$; б – устойчивой системы при $K = 5 \text{ с}^{-1}$

Амплитудно-фазочастотная характеристика разомкнутой системы

$$W^*(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}e^{-j\tau\omega},$$

где

$$A(\omega) = \frac{K}{\omega\sqrt{(T_1^2\omega^2 + 1)(T_2^2\omega^2 + 1)}};$$

$$\varphi(\omega) = -\pi/2 - \arctg T_1\omega - \arctg T_2\omega.$$

Тогда условия границы устойчивости

$$A(\omega_{cp}) = \frac{K_{кр}}{\omega_{cp}\sqrt{(T_1^2\omega_{cp}^2 + 1)(T_2^2\omega_{cp}^2 + 1)}} = 1;$$

$$\varphi(\omega_{cp}) = -\pi/2 - \arctg T_1\omega_{cp} - \arctg T_2\omega_{cp} - \tau\omega_{cp} = -\pi,$$

или

$$K_{кр} = \omega_{cp}\sqrt{(T_1^2\omega_{cp}^2 + 1)(T_2^2\omega_{cp}^2 + 1)};$$

$$\arctg T_1\omega_{cp} + \arctg T_2\omega_{cp} + \tau\omega_{cp} = \pi/2.$$

САУ будет устойчива при выполнении условия

$$\arctg T_1\omega_{cp} + \arctg T_2\omega_{cp} + \tau\omega_{cp} < \pi/2.$$

Пусть $T_1 = 0,02 \text{ с}$, $T_2 = 0,01 \text{ с}$, $\tau = 0,02 \text{ с}$, тогда в результате расчетов получаем $\omega_{cp} = 33,2 \text{ с}^{-1}$; $K_{кр} = 41,991 \text{ с}^{-1}$.

Как видно, в этом случае $K_{кр}$ существенно больше значения $K_{кр} = 2,269$ для первого варианта $W^*(p)$. Годографы Найквиста астатического канала разгона САУ ГТД приведены на рис. 7.

Таким образом, использование астатического регулятора переходных режимов позволяет обеспечить повышение не только точности системы по скорости изменения частоты вращения ротора [3], но и устойчивости.

Различные варианты введения управляемого интегратора в каналы управления переходными режимами ГТД подробно рассмотрены в статье [3]. Одна из таких структурных схем астатического канала разгона представлена на рис. 8, где УИ – управляемый интегратор; ЛУ – логическое устройство; УМ – умножитель; РЧВ, РР, ИУ, ИЧВ условно не показаны.

