

УДК 629.7.05(075)

СИСТЕМА ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ САМОВАКУУМИРУЮЩЕЙСЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ДИФFUЗОРА

© 2007 В.П. Алексеенко¹, Т.С. Дорофеева²

¹ Поволжское отделение секции прикладных проблем РАН, г. Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет

В статье произведен расчет характеристик вихревой системы термостатирования с автоматическим регулированием параметров диффузора на основе самовакумирующейся вихревой трубы.

Вихревые системы термостатирования (ВСТ) просты по конструкции, надежны в эксплуатации и имеют высокий ресурс работы по сравнению с другими системами принудительного охлаждения. Существенным недостатком ВСТ является ограниченный диапазон их использования. Это связано с неизменным значением геометрических параметров ВСТ.

Существенно повысить эффективность работы ВСТ позволяет использование автоматического регулирования параметров ВСТ в зависимости от параметров набегающего потока. В результате ВСТ обеспечит достаточно стабильную температуру стержня в широком диапазоне условий и режимов полета летательного аппарата.

Одним из вариантов автоматического регулирования параметров ВСТ является изменение геометрических параметров диффузора с помощью перемещающейся задней стенки диффузора.

Система автоматического регулирования представляет собой сложный комплекс устройств и приборов, включающий измерители параметров объекта регулирования, усилители, сумматоры, фильтры, преобразователи, программные и исполнительные устройства. Система регулирования вырабатывает управляющий фактор, подаваемый в исполнительное устройство и изменяющий геометрические параметры диффузора.

Регулируемым параметром объекта управления является температура $T_{ст}$ цилиндрического стержня, расположенного на оси СВТ.

На рис. 1. показан вариант функциональной схемы ВСТ на основе самовакумирующейся вихревой трубы с автоматическим регулированием параметров диффузора.

Система содержит “улитку” 2 с воздухозаборником 1. Из “улитки” закрученный поток поступает в камеру энергетического разделения СВТ, в которой за счет сложных вихревых процессов происходит разделение потока на периферийную – горячую и осевую – холодную составляющие. Осевой холодный поток охлаждает цилиндрический стержень 3, подмешивается к периферийному горячему потоку и с осредненной температурой через зазор в диффузоре 5 выводится за пределы СВТ. Температура стержня замеряется датчиком температуры, выход которого соединен через усилитель с исполнительным устройством, перемещающим стенку диффузора 4.

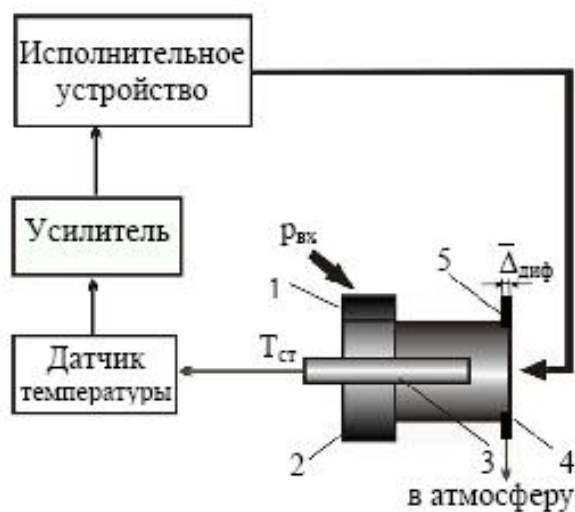


Рис. 1. Структурная схема ВСТ с автоматическим регулированием параметров диффузора:

- 1 – сопловой ввод; 2 – улитка; 3 – цилиндрический стержень; 4 – регулируемая стенка диффузора; 5 – диффузор

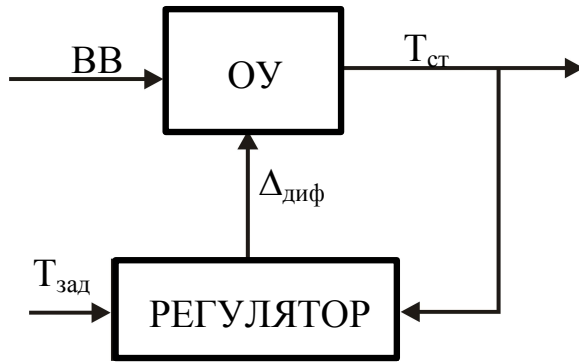


Рис. 2. Функциональная схема замкнутого типа

ВСТ с автоматическим регулированием параметров диффузора относится к системам замкнутого типа, непрямого действия, рис. 2.

Регулируемым параметром является температура стержня.

Функциональная схема ВСТ на основе самовакумирующейся вихревой трубы с автоматическим регулированием параметров диффузора представлена на рис. 3. Она включает:

- обобщенный объект управления (ОУ), состоящий из СВТ и цилиндрического стержня;
- измерительное устройство (Изм. У), которым является датчик температуры, измеряющий температуру стержня;
- усилительное устройство (У), в качестве которого используются усилители по напряжению и мощности (магнитный усилитель);
- исполнительное устройство (ИУ), состоящее из исполнительного механизма и исполнительного органа.

В качестве исполнительного механизма можно использовать электродвигатель с редук-

тором, обеспечивающие требуемые скорость и диапазон перемещения задней стенки диффузора. Исполнительным органом является задняя стенка диффузора, перемещение которой изменяет параметры диффузора.

Динамические свойства системы в целом и отдельных её элементов можно описать посредством передаточных функций. Структурная схема рассматриваемого устройства представлена на рис. 4.

В качестве датчика температуры используется терморезистор. Динамические свойства датчика температуры могут быть представлены коэффициентом усиления $k_{дт}$. Значения постоянной времени $T_{дт}$ находятся в интервале 1..3 с.

Динамические свойства усилителя отражены на схеме коэффициентом передачи k_y .

Передаточная функция магнитного усилителя представлена передаточной функцией аperiodического звена и описывается уравнением:

$$W_{ум}(p) = \frac{\Delta U_{ум}(p)}{\Delta U(p)} = \frac{k_{ум}}{(T_{ум}p + 1)}, \quad (1)$$

где $T_{ум}$ – постоянная времени авиационных магнитных усилителей. $T_{ум} = 0,01 \dots 0,5с$;

$k_{ум}$ – коэффициент усиления по мощности, может иметь порядок нескольких тысяч единиц.

Динамические свойства электродвигателя совместно с редуктором, когда в качестве выходного сигнала принимается перемещение на выходе редуктора, описываются передаточной функцией:

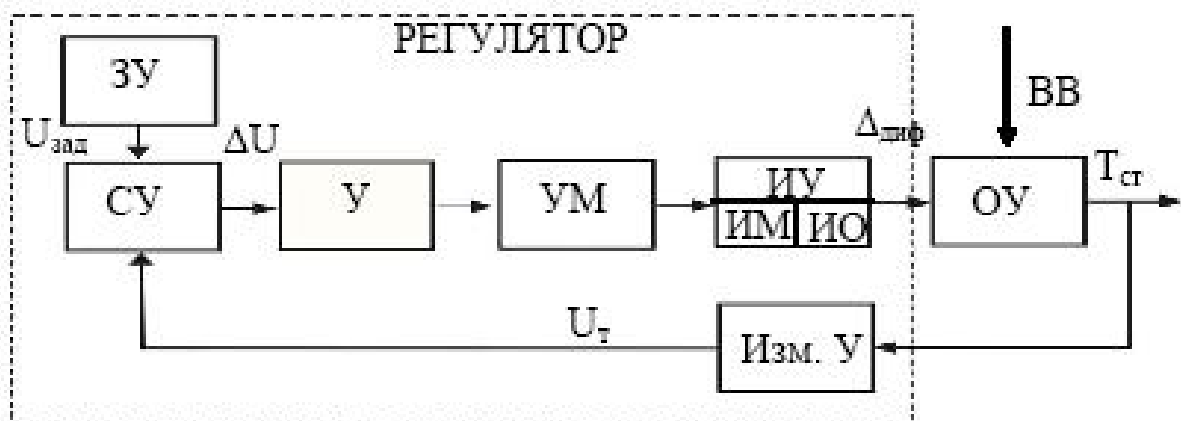


Рис. 3. Функциональная схема ВСТ с автоматическим регулированием параметров диффузора

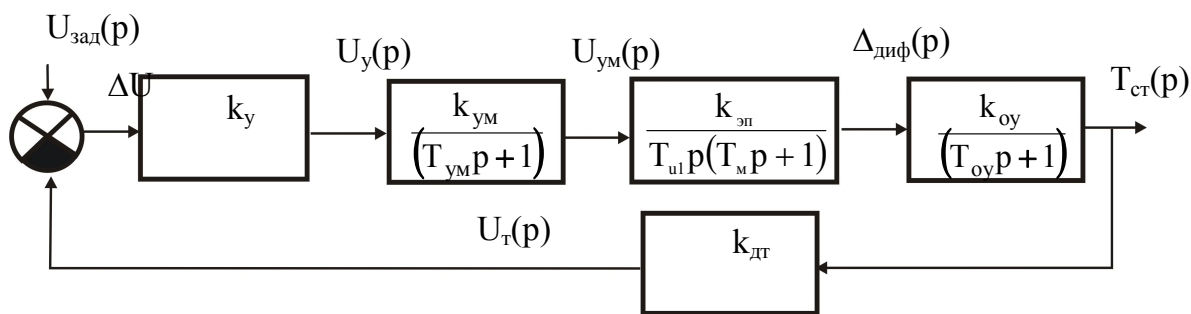


Рис. 4. Структурная схема ВСТ с автоматическим регулированием параметров диффузора

$$W_{эп}(p) = \frac{\Delta x(p)}{\Delta U_{ум}(p)} = \frac{k_d}{i_p p \cdot (T_m \cdot T_э p^2 + T_{мп} p + 1)}, \quad (2)$$

где k_d – коэффициент передачи двигателя;
 i_p – передаточное отношение редуктора;
 $T_m, T_э$ – электромагнитная и электромагнитная постоянные времени электродвигателя соответственно.

Из-за малого значения индуктивности электромагнитная постоянная времени значительно меньше электромагнитической постоянной времени ($T_э \ll T_m$). Учитывая это, передаточную функцию электропривода можно записать в виде последовательного соединения апериодического и интегрирующего звеньев:

$$W_{эп}(p) = \frac{\Delta x(p)}{\Delta U_{ум}(p)} = \frac{1}{T_u p \cdot (T_m p + 1)}, \quad (3)$$

где T_u – постоянная времени, вычисляемая по формуле: $T_u = k_d / i_p$.

Динамические свойства объединенного объекта управления, когда выходным сигналом является изменение температуры ДТ стержня, а входным – перемещение стенки диффузора, можно описать передаточной функцией апериодического звена:

$$W_{оу}(p) = \frac{\Delta T(p)}{\Delta x(p)} = \frac{k_{оу}}{(T_{оу} p + 1)}, \quad (4)$$

где $k_{оу}$ – коэффициент передачи ОУ;
 $T_{оу}$ – постоянные времени ОУ.

При проведении анализа устойчивости система автоматического управления (САУ) стабилизации температуры стержня в приборном отсеке может рассматриваться как САУ замкнутого типа.

Для анализа устойчивости рассматриваемой САУ воспользуемся методом логарифмических частотных характеристик.

Передаточная функция САУ с учетом выше изложенного имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_y \cdot k_{ум} \cdot k_{оу} \cdot k_{дт}}{T_u p (T_{оу} p + 1) \cdot (T_m p + 1) \cdot (T_{ум} p + 1)}. \quad (5)$$

Преобразуем выражение 5 к виду удобному для дальнейшего анализа:

$$W(p) = \frac{1}{T_{ул} p \cdot (T_{оу} p + 1) \cdot (T_m p + 1) \cdot (T_{ум} p + 1)}, \quad (6)$$

где $T_{ул}$ – эквивалентная постоянная времени системы.

$$T_{ул} = \frac{T_u}{k_y \cdot k_{ум} \cdot k_{оу} \cdot k_{дт}}.$$

Требуемое значение T_u в разработанной САУ обеспечивается выбором соответствующего значения коэффициента k_y усиления усилителя 234.

Значения постоянных времени, входящих в выражение 4.6 приняты по результатам теоретических и экспериментальных исследований: $T_{оу} = 6$ с, $T_m = 0,1$ с, $T_{ум} = 0,05$ с.

Исходное значение $T_{ул}$ примем равным 1с.

Для построения логарифмических частотных характеристик исходной системы определены значения частоты:

$$\omega_{сн1} = \frac{1}{T_{ул}} = 1 \text{ рад/с};$$

$$\lg \omega_{сн1} = 0 \text{ дек}$$

и частот сопряжения апериодических звеньев:

$$\omega_{с0} = \frac{1}{T_{оу}} = 0,166 \text{ рад/с}; \quad \lg \omega_{с0} = -0,78 \text{ дек};$$

$$\omega_{с1} = \frac{1}{T_m} = 10 \text{ рад/с}; \quad \lg \omega_{с1} = 1 \text{ дек};$$

$$\omega_{с2} = \frac{1}{T_{ум}} = 20 \text{ рад/с}; \quad \lg \omega_{с2} = 1,3 \text{ дек}. \quad (7)$$

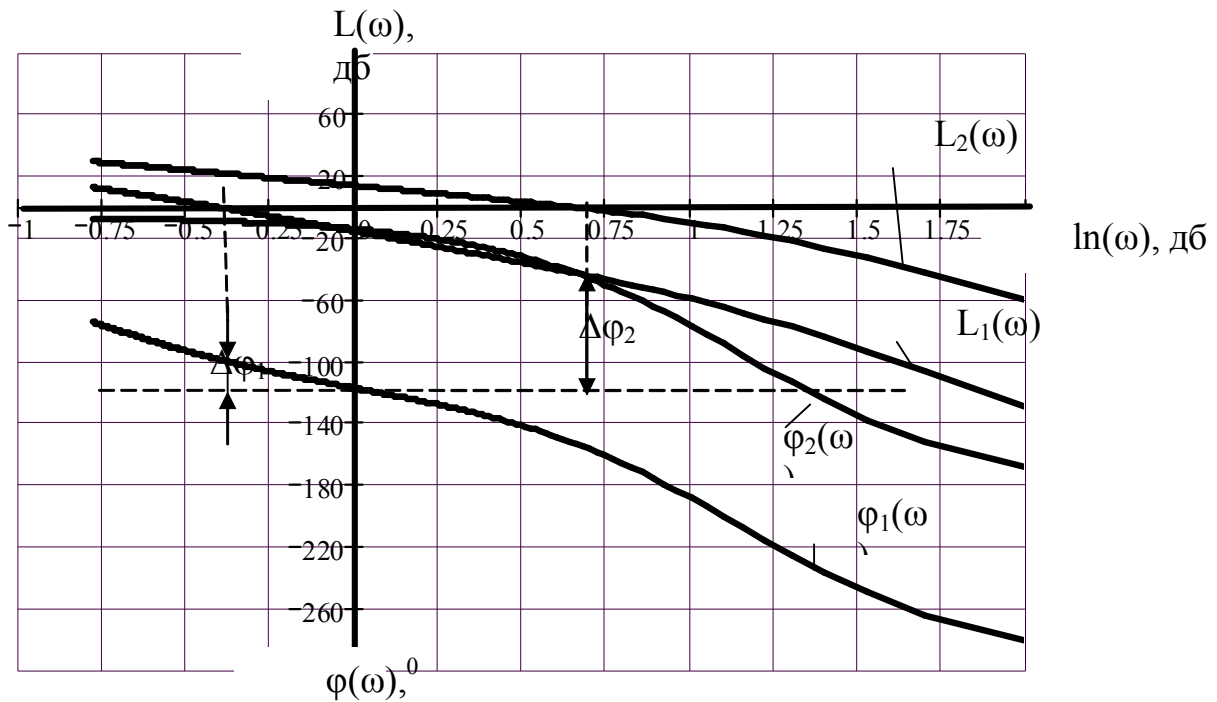


Рис. 5. Графики ЛАХ и ЛФХ системы:
 $L_1(\omega), \varphi_1(\omega)$ – без корректирующего звена;
 $L_2(\omega), \varphi_2(\omega)$ – с корректирующим звеном.

Логарифмическая амплитудная характеристика (ЛАХ) и логарифмическая фазовая характеристика (ЛФХ) вычисляется по расчетным формулам:

- для ЛАХ:

$$L_1(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1 + T_{oy}^2 \omega^2)} - 20 \lg \sqrt{(1 + T_m^2 \omega^2)} - 20 \lg \sqrt{(1 + T_{ym}^2 \omega^2)} - 20 \lg T_{ul} \omega$$

- для ЛФХ:

$$\varphi_1(\omega) = -\arctg T_{oy} \cdot \omega - \arctg T_m \cdot \omega - \arctg T_{ym} \cdot \omega - \frac{T_{ul}}{2} \cdot \omega \quad (8)$$

Расчет характеристик производился с использованием ЭВМ.

Графики логарифмической амплитудной и логарифмической фазовой характеристик, построенные по результатам расчета на ЭВМ, представлены на рис. 5.

Анализ характеристик показывает, что данная система автоматического регулирования параметров диффузора устойчива. Однако запас по фазе $D\varphi_1$ составляет менее 20%, что считается недостаточным при изменении входных параметров в широком диапазоне

изменения высотно-скоростных характеристик летательного аппарата. Кроме того, система имеет малую полосу пропускания, что свидетельствует о ее невысоком быстродействии. Для повышения устойчивости и быстродействия системы необходимо провести коррекцию САУ.

В современных САУ для достижения максимального быстродействия системы с учетом ограничения на полосу пропускания используют стандартные настройки. В данном случае используем настройку на модульный оптимум. При такой настройке передаточная функция будет иметь вид:

$$W_\mu(p) = \frac{1}{2T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)}, \quad (9)$$

где T_m – “малая” некомпенсированная постоянная времени.

При настройке на модульный оптимум постоянную интегрирующего преобразования T_{u2} выбирают в два раза больше “малой” некомпенсированной постоянной времени T_m . Некомпенсированную постоянную времени следует выдирать равной $T_m = 1/w_{cl}$, тогда:

$$T_{u2} = 2T_m = 0,2 \text{ с.}$$

В качестве корректирующего звена, вве-

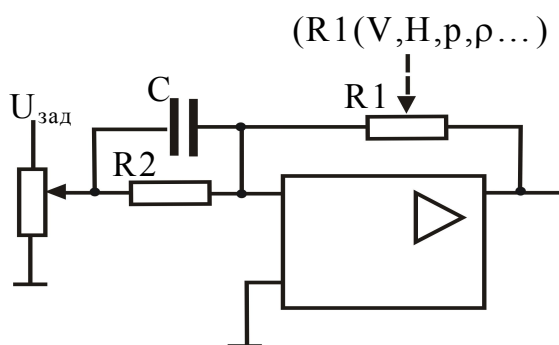


Рис. 6. Принципиальная схема корректирующего устройства

денного в систему, используется пропорционально- дифференцирующее звено (рис. 6).

Передаточная функция корректирующего звена имеет вид:

$$W_{кор}(p) = k_{кор} \cdot (T_{кор} p + 1), \quad (10)$$

где $k_{кор}$ – коэффициент передачи;

$$k_{кор} = \frac{R_2}{R_1},$$

$T_{кор}$ – постоянная времени;

$$T_{кор} = C_1 \cdot R_1.$$

Постоянная времени корректирующего устройства принимается равной постоянной времени объекта управления: $T_{кор} = T_{оу}$.

Структурная схема САУ с корректирующим звеном представлена на рис. 7.

Передаточная функция системы с учетом корректирующего звена имеет вид:

$$W_c(p) = W_{кор}(p) \cdot W(p) = \frac{1}{T_{u2} p \cdot (T_m p + 1) \cdot (T_{ym} p + 1)}. \quad (11)$$

Логарифмическая амплитудная характеристика (ЛАХ) и логарифмическая фазовая характеристика (ЛФХ) вычисляется по рас-

четным формулам:

- для ЛАХ:

$$L_2(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1 + T_m^2 \omega^2)} - 20 \lg \sqrt{(1 + T_{ym}^2 \omega^2)} - 20 \lg T_{u2} \omega$$

- для ЛФХ:

$$\varphi_2(\omega) = -\arctg T_m \cdot \omega - \arctg T_{ym} \cdot \omega - \frac{T_{u2}}{2}$$

ЛАХ $L_1(\omega)$, построенная при новом значении постоянной интегрирующего преобразования T_{u2} приведена на рис. 5.

Анализ ЛФХ $L_1(\omega)$, приведенный на рис. 5, показывает, что запас по фазе равен 70%, что говорит о высоком быстродействии системы и возможности её эффективного использования в процессе эксплуатации.

Произведем оценку показателей качества переходного процесса, достигаемого в скорректированной САУ, с помощью метода, базирующегося на обратном преобразовании Лапласа.

Передаточная функция замкнутой системы относительно задающего воздействия $U_{зад}$ описывается выражением:

$$W_3(p) = \frac{W_{кор}(p) \cdot W_{ум}(p) \cdot W_{эл}(p) \cdot W_{оу}(p)}{1 + W(p)}, \quad (12)$$

После преобразований с учетом передаточных функций отдельных звеньев выражение (12) примет вид:

$$W_3(p) = \frac{1}{k_{дт} T_{u2} p \cdot (T_m p + 1) \cdot (T_{ym} p + 1) + 1}. \quad (13)$$

Обозначим полином знаменателя в выражении 4.13 как $D(p)$ и запишем его в стандартной форме:

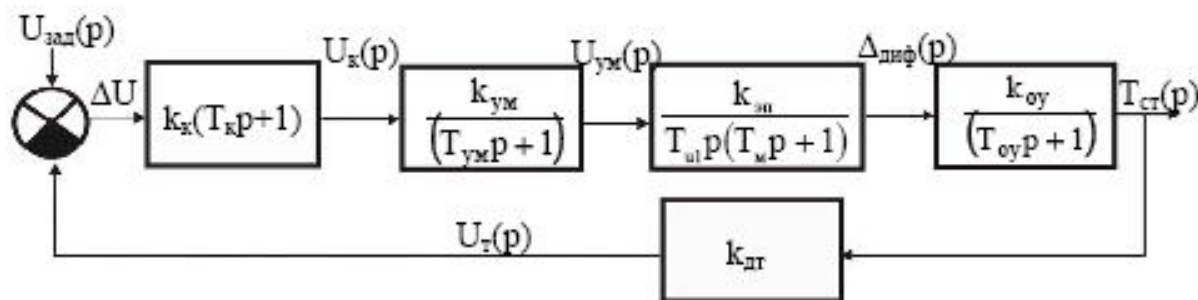


Рис. 7. Структурная схема САУ с корректирующим устройством

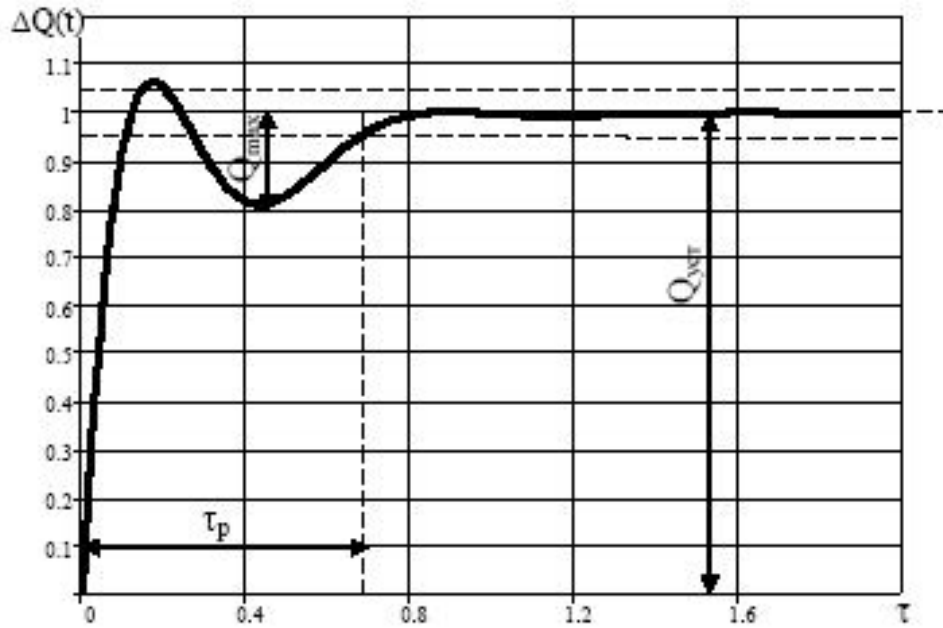


Рис. 8. Переходная характеристика САУ с корректирующим звеном

$$D(p) = a_0 \cdot p^3 + a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + a_3; \quad (14)$$

Полином содержит пару комплексных сопряженных корней с отрицательной вещественной частью: $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\beta_1$; и отрицательный вещественный корень: $p_3 = -\alpha_3$.

Это позволяет выражение 4.13 привести к виду:

$$D(p) = (T^2 p^2 + 2\xi p + 1) \cdot (T_1 p + 1), \quad (15)$$

$$\text{где } T = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2}}; \quad \xi = -\alpha_1 T;$$

$$T_1 = -\frac{1}{\alpha_3}.$$

В результате подстановки полученных значений в выражение 13 передаточная функция системы примет вид:

$$W_3(p) = \frac{1}{k_{дт}} \frac{1}{(T^2 p^2 + 2\xi p + 1) \cdot (T_1 p + 1)}. \quad (16)$$

Умножим правую часть выражения на изображение скачка задающего сигнала $\Delta U_{зад}/p$, получим изображение выходной переменной для переходного процесса по управляющему воздействию:

$$\Delta Q(p) = \frac{\Delta U_{зад}}{k_{дт}} \frac{1}{p \cdot (T^2 p^2 + 2\xi p + 1) \cdot (T_1 p + 1)}. \quad (17)$$

По таблицам обратных преобразований

Лапласа находится оригинал, соответствующий изображению функции 15. В результате получает аналитическое выражение, описывающее переходный процесс.

$$\Delta Q(t) = \frac{\Delta U_{зад}}{k_{дт}} [1 - C \cdot e^{-\gamma t} \cdot \sin(\lambda t - Q) - C_1 \cdot e^{-\gamma t}] \quad (18)$$

$$\text{где } C = \frac{1}{\lambda \cdot \sqrt{T^2 \cdot (1 - 2\gamma\gamma_1) + T_1^2}};$$

$$C_1 = \frac{T_1^2}{(1 - 2\gamma\gamma_1) \cdot T^2 + T_1^2};$$

$$Q = \arctg \frac{\lambda T_1}{1 - \gamma T_1} - \arctg \frac{\lambda}{\gamma};$$

$$\gamma = \frac{\xi}{T}; \quad \lambda = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}.$$

Для общности расчета величина $DU_{зад}/k_{дт}$ принята равной 1.

Расчет переходной характеристики регулятора производилась с использованием ЭВМ. Переходная характеристика представлен на рис. 8.

Время регулирования для 5% зоны допустимых отклонений составляет:

$$t_p = 0,68 \text{ с,}$$

перерегулирование:

$$\sigma = \frac{\Delta Q_{\text{зад}}}{\Delta Q_{\text{уст}}} \cdot 100\% = 18\%.$$

Таким образом, в скорректированной системе обеспечивается достаточно высокое качество процесса регулирования, следовательно, данная система автоматического регулирования параметров диффузора может использоваться в широком диапазоне изменения высотно-скоростных характеристик летательного аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеенко В.П., Бирюк В.В., Леонович Г.И., Лукачев С.В.* Вихревые системы термостатирования // Самарский научный центр РАН. 2005
2. *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике. Самара, 1997.
3. *Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М.* Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М. УНПЦ "Энергия", 2000.
4. *Бирюк В.В.* Применение вихревого эффекта разделения газов в конверсионных разработках. Материалы Всероссийской НПК. Самара: СГАУ, 1994.
5. *Бирюк В.В.* Вихревая регенеративная установка // Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленное применение. Труды 1-й ВНТК. Куйбышев: КуАИ, 1974.
6. *Серебряков Р.А., Бирюк В.В.* Вихревой эффект энергетического разделения газов в системах охлаждения и кондиционирования // Вестник МАИ. 1994. №10.

TERMOSTABILIZATION AVIONICS VORTICAL SYSTEM WITH NOZZLE AUTOMATIC CONTROL PARAMETRES BASED ON SELFVACUUM VORTEX TUBE

© 2007 V.P. Alekseenko ¹, T.S. Dorofeeva ²

¹ Volga Branch of Applied Section Problems of Russian Academy of Sciences, Samara

² Samara State Aerospace University

The calculation of thermostabilization vortical system characteristics with nozzle automatic control parametres based on selfvacuum vortex tube.