

УДК 681.5

А.С. Кулик, С.Н. Пасичник

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОТОКА ЭНТАЛЬПИИ ВИХРЕВОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛИТЕЛЯ

Приведена структура системы автоматического позиционирования (САП) потока энтальпии холодного воздуха вихревого энергоразделителя (ВЭ). Получены интервальные передаточные функции разомкнутой и замкнутой САП. Выполнен расчет коэффициента передачи разомкнутой САП из условия обеспечения точности. Проведен анализ и обеспечение устойчивости замкнутой системы, а так же синтез САП методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик. Получена интервальная передаточная функция корректирующего элемента. Проведено экспериментальное исследование скорректированной САП на макетном образце ВЭ.

**Ключевые слова:** вихревой энергоразделитель, система автоматического позиционирования, поток энтальпии, частотные характеристики.

### Введение

В современных энергетических технологиях находят применение нетрадиционные способы получения и преобразования энергии [1]. Одним из перспективных является способ преобразования тепловой энергии на основе вихревого эффекта, что выгодно отличает его от традиционных простотой технической реализации.

Среди направлений использования вихревого эффекта можно выделить получение холодного и горячего воздуха для систем кондиционирования кабин и салонов транспортных средств промышленного и гражданского назначения. Основным элементом таких систем является устройство, в котором реализуется вихревой эффект – вихревой энергоразделитель.

Для обеспечения комфортных условий в кабине необходимо целенаправленно изменять температуру

$T_x^*$  и количество  $G_x$  подаваемого в кабину холодного воздуха. В известных конструкциях вихревых систем кондиционирования [2] используются либо однорежимные вихревые энергоразделители, либо с позиционированием потока энтальпии холодного воздуха при постоянном давлении сжатого воздуха.

Такой подход существенно ограничивает диапазон рабочих режимов и не учитывает динамические свойства вихревого энергоразделителя.

В данной работе выполнен синтез системы автоматического позиционирования (САП) потока энтальпии холодного воздуха ВЭ, что позволит в последующем решить задачу разработки вихревой системы кондиционирования транспортного средства.

**Постановка задачи исследования.** Для обеспечения изменения потока энтальпии холодного воздуха вихревого энергоразделителя в широком диапазоне режимов, удовлетворяющего заданным

показателям качества переходных процессов требуется построить функциональную схему САП.

Используя результаты экспериментального определения статических и динамических характеристик [3], а также структуры и параметров математической модели ВЭ [4], сформировать структурную схему и математическую модель САП в виде интервальных передаточных функций.

Решить задачу обеспечения точности и устойчивости позиционирования потока энтальпии ВЭ в широком диапазоне режимов.

Обеспечить соответствие динамических показателей качества системы заданным методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ).

Провести экспериментальное исследование скорректированной САП на макетном образце системы.

### 1. Формирование структуры САП ВЭ

Для выполнения процедуры синтеза системы позиционирования выбран способ изменения потока энтальпии  $G_x = \text{var}$ ,  $T_x^* = \text{var}$  [3]. Функциональная схема САП приведена на рис. 1: ЗУ – задающее устройство; КЭ – корректирующий элемент; УМ – усилитель мощности; ШД – шаговый двигатель; В – вентиль; ВЭ – вихревой энергоразделитель; Дтвх – датчик температуры воздуха на входе ВЭ; Дтх – датчик температуры холодного воздуха; Дтг – датчик температуры горячего воздуха; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ОАП – объект автоматического позиционирования; МК – микроконтроллер; Qx – блок вычисления потока энтальпии холодного воздуха; Qxz[kT0] – заданное значение потока энтальпии холодного воздуха, Вт;  $\epsilon$ [kT0] – ошибка системы, Вт;  $\nu$ [kT0] – частота на входе усилителя мощности, Гц;  $\varphi(t)$  – угловое положение вала двигателя, рад;  $\zeta(t)$  – линейное положение регулирующего

органа вентиля, м;  $P_k^*(t)$  – давление торможения воздуха на выходе компрессора, Па;  $F(t)$  – площадь сечения вентиля, м<sup>2</sup>;  $T_c^*(t)$  – температура торможения сжатого воздуха, К;  $T_x^*(t)$  – температура торможения холодного воздуха, К;  $T_r^*(t)$  – температура торможения горячего воздуха, К;  $U_{tc}(t)$  – напряжение датчика температуры сжатого воздуха, В;  $U_{tx}(t)$  – напряжение датчика температуры холодного воздуха, В;  $U_{tr}(t)$  – напряжение датчика темпера-

туры горячего воздуха, В;  $U_{tvx}[kT_0]$  – дискретное значение напряжения датчика температуры воздуха на входе ВТ, В;  $U_{tx}[kT_0]$  – дискретное значение напряжения датчика температуры холодного воздуха, В;  $U_{tr}[kT_0]$  – дискретное значение напряжения датчика температуры горячего воздуха, В;  $\hat{Q}_x$  kT<sub>0</sub> – дискретное оценочное значение потока энтальпии холодного воздуха, Вт.

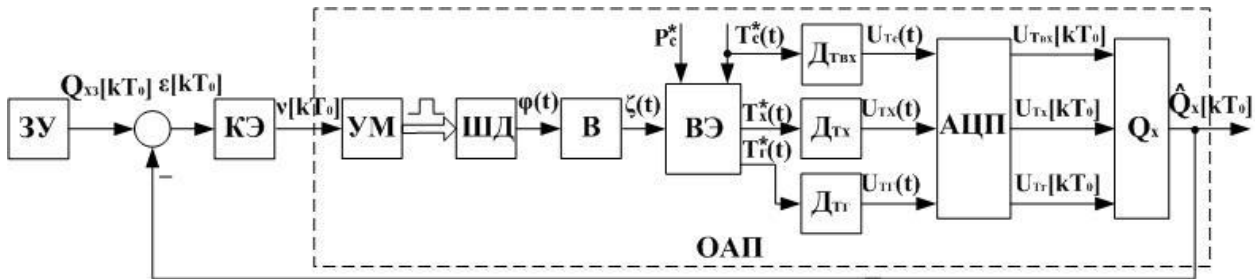


Рис. 1. Функциональная схема САП

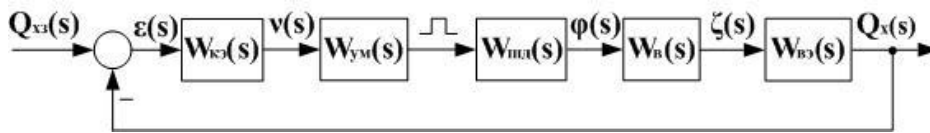


Рис. 2. Структурная схема САП

Особенностью функциональной схемы является то, что все элементы системы входят в структуру объекта автоматического позиционирования. При формировании структурной схемы принято, что давление сжатого воздуха, вводимого в вихревой энергоразделитель, постоянно  $P_c^* = var$  (рис. 2). На рис. 2 обозначено:  $W_{KЭ}(s)$  – передаточная функция корректирующего элемента;  $W_{УМ}(s)$  – передаточная функция усилителя мощности;  $W_{ШД}(s)$  – передаточная функция шагового двигателя;  $W_В(s)$  – передаточная функция вентиля;  $W_{ВЭ}(s)$  – передаточная функция ВЭ по управляющему воздействию;  $Q_{x3}(s)$  – изображение заданного значения потока энтальпии холодного воздуха;  $\varepsilon(s)$  – изображение сигнала ошибки;  $v(s)$  – изображение частоты на выходе преобразовательного элемента;  $v_{УМ}(s)$  – изображение частоты на выходе усилителя мощности;  $\zeta(s)$  – изображение линейного положения регулирующего органа вентиля;  $Q_x(s)$  – изображение действительного значения потока энтальпии холодного воздуха.

Шаговый двигатель, который используется в системе в качестве исполнительного элемента, является разомкнутым и не содержит редуктора. Это объясняется тем, что момент сопротивления на валу ШД, определяемый силой нормального давления воздуха на регулирующий орган вентиля, на порядок меньше номинального крутящего момента ШД за счет выбора профиля регулирующего органа вентиля в виде конуса с малым углом конусности. Это, в свою очередь, дает возможность записать переда-

точную функцию (ПФ) двигателя совместно с вентилем в виде:

$$W_{шд} s = \frac{\zeta s}{v_{УМ} s} = \frac{K_{шд}}{s}, \quad (1)$$

где  $K_{шд}$  – коэффициент передачи, м/Гц.

Интервальная передаточная функция вихревого энергоразделителя, учитывающая динамические свойства ВЭ и датчиков температуры, может быть представлена в виде [4]:

$$\bar{W}_{ВЭ} s = \frac{\bar{Q}_x s}{\bar{Z} s} = \frac{\bar{K}_{ВЭ}}{\bar{T}_1 s + 1} \frac{1}{\bar{v}_1} \frac{1}{\bar{T}_2 s + 1} \frac{1}{\bar{v}_2}, \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_x s$  – изображение интервального значения потока энтальпии холодного воздуха;  $\bar{Z} s$  – изображение интервального значения линейного положения регулирующего органа вентиля;  $\bar{K}_{ВЭ} = [-1, 7 \cdot 10^5; -9 \cdot 10^4]$  – интервальное значение коэффициента передачи, Вт/м;  $\bar{T}_1 = 11,8; 20$ ,  $\bar{T}_2 = 1,5; 1,66$  – интервальные значения постоянных времени, с;  $\bar{v}_1 = 0,2; 0,46$ ,  $\bar{v}_2 = 0,72; 1,79$  – интервальные значения показателей степени.

С учетом (1) и (2) передаточные функции САП примут вид:

– ПФ разомкнутой системы:

$$\bar{W}_p s = \frac{\bar{Q}_x s}{Q_{x3} s} = \frac{\bar{K}_p}{s \bar{T}_1 s + 1} \frac{1}{\bar{v}_1} \frac{1}{\bar{T}_2 s + 1} \frac{1}{\bar{v}_2}; \quad (3)$$

– ПФ замкнутой системы:

$$\bar{\Phi}_s = \frac{\bar{Q}_x s}{\bar{Q}_{x3} s} = \frac{\bar{K}_p}{s \bar{T}_1 s + 1 \bar{v}_1 \bar{T}_2 s + 1 \bar{v}_2 + \bar{K}_p}; \quad (4)$$

– ПФ замкнутой системы по ошибке от задающего воздействия:

$$\bar{\Phi}_\varepsilon s = \frac{\bar{\varepsilon} s}{\bar{Q}_{x3} s} = \frac{s \bar{T}_1 s + 1 \bar{v}_1 \bar{T}_2 s + 1 \bar{v}_2}{s \bar{T}_1 s + 1 \bar{v}_1 \bar{T}_2 s + 1 \bar{v}_2 + \bar{K}_p}, \quad (5)$$

где  $\bar{K}_p = 2,7; 9,5$  – интервальное значение коэффициента передачи разомкнутой САП.

## 2. Обеспечение точности и устойчивости САП ВЭ

Обеспечение точности САП предполагает определение требуемого значения коэффициента передачи разомкнутой системы. Так как ПФ (3) содержит нулевой полюс, то точность замкнутой системы в установившемся режиме обеспечивается автоматически. Поэтому коэффициент передачи найден из условия обеспечения добротности по скорости:

$$\bar{\varepsilon}_{ск} = \lim_{s \rightarrow 0} \bar{\Phi}_\varepsilon s \bar{Q}_{x3} s \leq \varepsilon_{доп}, \quad (6)$$

где  $\bar{\varepsilon}_{ск}$  – интервальное значение скоростной ошибки, Вт;  $\bar{Q}_{x3} s = \frac{V_Q}{s^2}$  – изображение линейного задающего воздействия;  $V_Q$  – скорость нарастания задающего воздействия, Вт/с;  $\varepsilon_{доп}$  – допустимое значение скоростной ошибки, Вт.

Совместное решение уравнений (5) и (6), с учетом  $V_Q = 100$  Вт/с и  $\varepsilon_{доп} = 7$  Вт, позволяет получить требуемое значение коэффициента передачи:

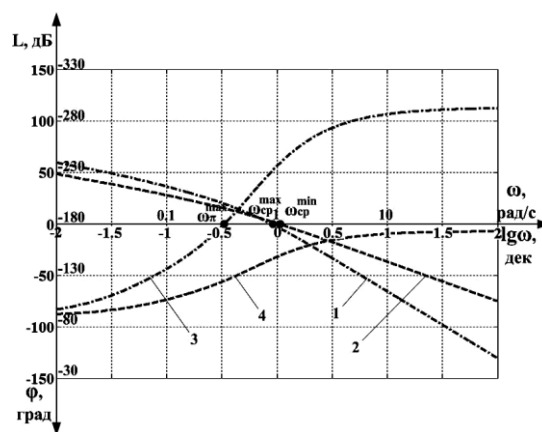
$$\bar{K}_{ртр} \geq \frac{V_Q}{\varepsilon_{доп}} = 20; 20. \quad (7)$$

Оценку устойчивости замкнутой САП удобно произвести по расположению логарифмической амплитудно-фазовой частотной характеристики (ЛАФЧХ) разомкнутой системы, используя логарифмический критерий Найквиста. Для этого следует записать частотную интервальную передаточную функцию разомкнутой системы, выполнив замену  $s \rightarrow j\omega$  в выражении (3) с учетом (7):

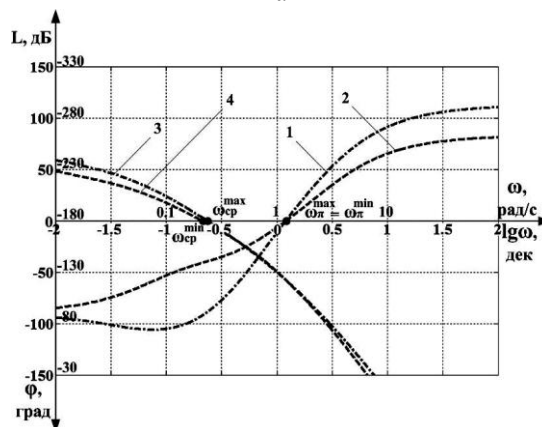
$$\bar{W}_p j\omega = \frac{\bar{Q}_x j\omega}{\bar{Q}_{x3} j\omega} = \frac{\bar{K}_{ртр}}{j\omega \bar{T}_1 j\omega + 1 \bar{v}_1 \bar{T}_2 j\omega + 1 \bar{v}_2}. \quad (8)$$

По уравнениям (9), (10) построены интервальные ЛАФЧХ исходной разомкнутой системы, удовлетворяющей требованиям точности для граничных значений параметров ПФ ОАП (рис. 3, а) в частотном диапазоне  $\omega \in 0,01; 100$  рад/с.

Из (8) получены выражения для ЛАЧХ и ЛФЧХ:



а



б

Рис. 3. Интервальные ЛАФЧХ: а – исходной; б – устойчивой; 1, 3 –  $T_{к1max}, T_{к2max}$ ; 2, 4 –  $T_{к1min}, T_{к2min}$

$$\bar{L}_p \omega = 20 \lg \bar{K}_{ртр} - 20 \lg \omega - 20 \bar{v}_1 \lg \sqrt{\bar{T}_1^2 \omega^2 + 1} - 20 \bar{v}_2 \lg \sqrt{\bar{T}_2^2 \omega^2 + 1}; \quad (9)$$

$$\bar{\varphi}_p \omega = -\frac{\pi}{2} - \bar{v}_1 \arctg \bar{T}_1 \omega - \bar{v}_2 \arctg \bar{T}_2 \omega. \quad (10)$$

Анализ графиков показывает, что при максимальных значениях параметров ПФ система является неустойчивой, так как частота среза лежит правее частоты, соответствующей значению ФЧХ  $-180$  град  $\omega_{ср}^{max} > \omega_{-\pi}^{max}$ .

Для обеспечения устойчивости САП на границах интервальных значений параметров ПФ в структуру системы введен корректирующий элемент (КЭ), передаточная функция которого имеет вид:

$$\bar{W}_k s = \frac{\bar{T}_{к2} s + 1}{\bar{T}_{к1} s + 1}, \quad (11)$$

где  $\bar{T}_{к2} = 0,5$ ,  $\bar{T}_{к1} = -20; 10$  – интервальные значения постоянных времени, с.

Коррекция системы путем подавления высоких частот (рис. 4, б) позволила обеспечить высокие значения запасов устойчивости по амплитуде  $\bar{L}_3 = 60; 60$  дБ и по фазе  $\bar{\varphi}_3 = 40; 80$  град.

Для оценки качества функционирования устойчивой замкнутой САП построены интервальные переходные характеристики (ИПФ). Расчет произведен методом Солодовникова с использованием интегрального соотношения между переходной и вещественной частотной функциями:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} U_3(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega, \quad (12)$$

где  $h(t)$  – переходная функция;  $U_3(\omega)$  – вещественная частотная функция замкнутой системы.

Передаточная функция разомкнутой системы, устойчивой в замкнутом состоянии примет вид:

$$\bar{W}_p(s) = \frac{\bar{Q}_x(s)}{\bar{Q}_{x3}(s)} = \frac{\bar{K}_{ртр} \bar{T}_{к2}s + 1}{s \bar{T}_{1s} + 1 \bar{v}_1 \bar{T}_{2s} + 1 \bar{v}_2 \bar{T}_{к1s} + 1}. \quad (13)$$

Выполнив в (13) переход к частотной форме записи, и перейдя к декартовым координатам, выражение для интервальной вещественной частотной функции замкнутой системы примет вид:

$$\bar{U}_3(\omega) = \frac{\bar{U}_p(\omega) [1 + \bar{U}_p(\omega) + V_p^2(\omega)]}{1 + \bar{U}_p(\omega)^2 + V_p^2(\omega)}, \quad (14)$$

где  $\bar{U}_p(\omega)$ ,  $V_p(\omega)$  – интервальные вещественная и мнимая частотные функции разомкнутой системы.

В результате совместного решения (12), (14) методом прямоугольников с нижним и верхним пределами интегрирования  $\omega_H = 0,001$  рад/с,  $\omega_B \cong 10\omega_{ср}$  рад/с получены графики переходных характеристик замкнутой системы при минимальных, средних и максимальных значениях параметров ПФ КЭ в относительных координатах (рис. 4).

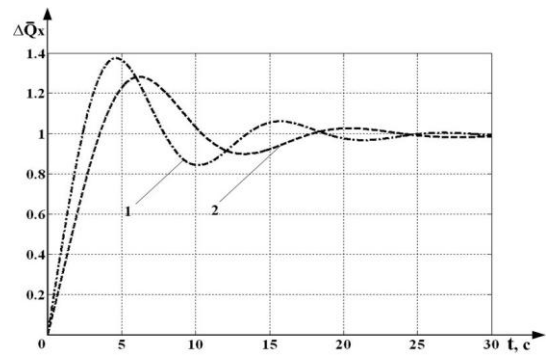
Интервальные значения динамических показателей качества, определенные по графикам переходных процессов (рис. 4): время переходного процесса  $\bar{t}_{пп} = 3; 60$  с; степень затухания  $\bar{\chi} = 1,1; 14$ ; перерегулирование  $\bar{\sigma} = 0; 110$  %. Максимальные значения полученных показателей качества не удовлетворяют заданным, что требует дополнительной коррекции динамических свойств системы.

### 3. Коррекция динамических свойств САП ВЭ

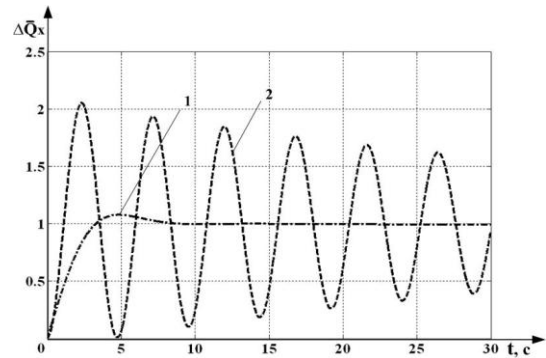
Коррекция динамических свойств САП выполнена методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик с заменой исходных ЛАЧХ асимптотическими. Для этого получено уравнение интервальной располагаемой ЛАЧХ по вещественной и мнимой частотным функциям разомкнутой системы:

$$\bar{L}_p(\omega) = 20 \lg \sqrt{\bar{U}_p^2(\omega) + \bar{V}_p^2(\omega)}. \quad (15)$$

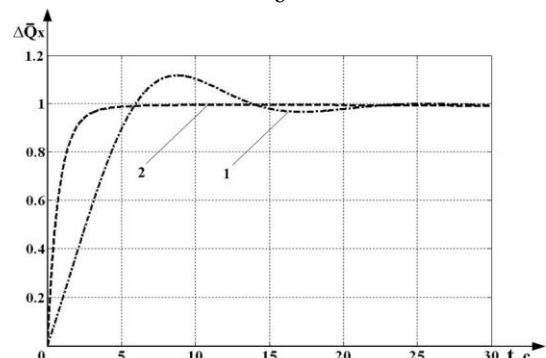
В развернутом виде выражение (15) примет вид:



а



б



в

Рис. 4. Переходные характеристики замкнутой устойчивой САП: 1 – максимальные значения параметров ПФ ОАП; 2 – минимальные значения параметров ПФ ОАП; а –  $T_{к1min}, T_{к2min}$ ; б –  $T_{к1ср}, T_{к2ср}$ ; в –  $T_{к1max}, T_{к2max}$

$$\begin{aligned} \bar{L}_p(\omega) = & 20 \lg \bar{K}_{ртр} - 20 \lg \omega - 20 \bar{v}_1 \lg \bar{T}_1^2 \omega^2 + 1^{1/2} - \\ & - 20 \bar{v}_2 \lg \bar{T}_2^2 \omega^2 + 1^{1/2} + 20 \lg \bar{T}_{к2}^2 \omega^2 + 1^{1/2} - \\ & - 20 \lg \bar{T}_{к1}^2 \omega^2 + 1^{1/2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для записи уравнений асимптот вводится следующее допущение: в каждом слагаемом уравнения (16), содержащем постоянную времени, при значениях частоты  $\omega \leq 1/T$  произведение  $T\omega \ll 1$  и им пренебрегают ввиду его малости, а при значениях частоты  $\omega > 1/T$  произведение  $T\omega \gg 1$ , и в этом случае отбрасывают единицу. Тогда уравнения асимптот для максимальных и минимальных значений ЛАЧХ примет вид:

$$L_{pmax} \omega = 20 \lg K_{pTP} - 20 \lg \omega - 20v_{1min} \lg T_{1min} \omega - 20v_{2min} \lg T_{2min} \omega + 20 \lg T_{k2max} \omega - 20 \lg T_{k1min} \omega ; \quad (17)$$

$$L_{pmin} \omega = 20 \lg K_{pTP} - 20 \lg \omega - 20v_{1max} \lg T_{1max} \omega - 20v_{2max} \lg T_{2max} \omega + 20 \lg T_{k2min} \omega - 20 \lg T_{k1max} \omega . \quad (18)$$

Наклоны асимптот характеристик (17), (18) примут следующие значения:

- $L_{pmin}$  : -20 дБ/дек, -29,4 дБ/дек, -65 дБ/дек;
- $L_{pmax}$  : -20 дБ/дек, -40 дБ/дек, -14,8 дБ/дек; -34,8 дБ/дек.

Используя выражения (17), (18), построены располагаемые интервальные асимптотические ЛАЧХ разомкнутой системы (рис. 5).

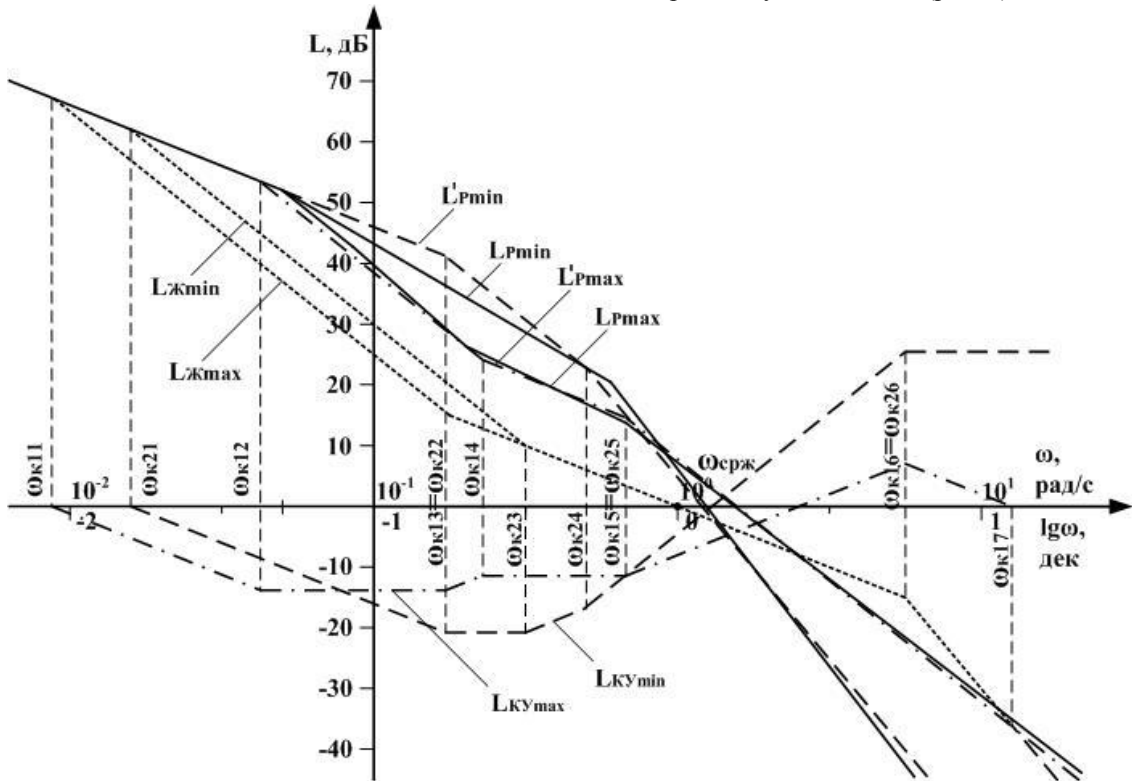


Рис. 5. Интервальные располагаемые, желаемые и ЛАЧХ корректирующего устройства

При построении желаемых ЛАЧХ с использованием асимптот, имеющих целочисленные значения углов наклона, кратные двадцати, характеристика корректирующего элемента в результате будет содержать асимптоты с дробными значениями углов наклона. Это, в свою очередь, приведет к появлению дробных показателей степени в передаточной функции КЭ, что значительно усложнит практическую реализацию такого уравнения в виде вычислительного алгоритма.

Чтобы избежать подобных затруднений, исходные располагаемые ЛАЧХ аппроксимированы асимптотическими ЛАЧХ с целочисленными значениями углов наклона (на рис. 5 обозначены  $L'_{pmin}$ ,  $L'_{pmax}$ ). Максимальная погрешность аппроксимации на частотах сопряжения асимптот не превышает 10 дБ.

Процедура построения желаемых ЛАЧХ начинается с выбора желаемой частоты среза, значение которой зависит от требуемых значений динамических показателей качества системы. Требуемые значения показателей качества, в свою очередь, определяются назначением САП. Вихревой энергоразделитель является исполнительным элементом системы

кондиционирования кабины транспортного средства, которая представляет собой существенно инерционный объект (объемом порядка 10 м<sup>3</sup>). Поэтому требования к быстродействию и перерегулированию САП могут быть не жесткими. Так как частоты среза располагаемых интервальных ЛАЧХ расположены близко друг к другу ( $\omega_{срmax} - \omega_{срmin} \approx 0,3$  рад/с), это дает возможность требуемое максимальное время переходного процесса задать в виде точечного значения  $t_{ппmax} = 15$  с, максимальное значение перерегулирования  $\sigma_{max} = 30\%$ .

Желаемая частота среза определяется следующим образом [5]:  $\omega_{срж} = k\pi / t_{ппmax}$ . Для требуемых значений времени переходного процесса и перерегулирования по номограммам [5] определен коэффициент пропорциональности  $k = 4,8$ . Тогда частота среза примет значение  $\omega_{срж} = 1$  рад/с или в логарифмическом масштабе  $\lg \omega_{срж} = 0$  дек.

Среднечастотная асимптота желаемой ЛАЧХ проходит через частоту среза под углом -20 дБ/дек,

что характерно для аperiodического звена первого порядка, переходный процесс в котором протекает без перерегулирования. Данная асимптота формирует среднечастотный участок ЛАЧХ, отвечающий за динамические свойства системы. Протяженность среднечастотного участка ограничивается запасами по амплитуде, определяемыми по номограммам Солодовникова [5]. Для принятого значения перерегулирования величина запаса по амплитуде составит  $L_3 = 15$  дБ, а по фазе  $\varphi_3 = 45$  град.

Сопряжение среднечастотного участка желаемой ЛАЧХ с низкочастотным участком располагаемых ЛАЧХ выполнено с помощью промежуточной асимптоты с наклоном -40 дБ/дек, что обусловлено стремлением обеспечить простой вид передаточной функции корректирующего элемента. По той же причине промежуточная асимптота на характеристике  $L_{ж\min}$  смещена относительно  $L_{ж\max}$  на 0.1 дек вправо. Кроме того, такое смещение позволит:

- уменьшить величину наибольшей постоянной времени разомкнутой системы, определяемую частотой сопряжения промежуточной и низкочастотной асимптот;

- обеспечит интервальное значение этой постоянной времени, что позволит в дальнейшем оптимизировать работу корректирующего элемента в широком диапазоне режимов САП.

В области высоких частот системы среднечастотная асимптота пересекает высокочастотные асимптоты интервальной располагаемой ЛАЧХ в точках, удаленных от оси частот на величину 5 дБ на характеристике  $L'_{p\min}$  и 10 дБ на характеристике  $L'_{p\max}$  соответственно. Высокочастотная область существенно не влияет на динамические свойства системы, так как ОАП в силу своих инерционных свойств является фильтром низких частот. Поэтому для характеристики  $L_{ж\max}$  высокочастотный участок совпадает с высокочастотным участком  $L'_{p\max}$ . Высокочастотный участок характеристики  $L_{ж\min}$  выполнен путем проведения из точки пересечения  $L_{ж}$  с  $L'_{p\max}$  асимптоты, параллельной высокочастотному участку  $L'_{p\min}$ .

Интервальные ЛАЧХ КЭ получены графическим вычитанием располагаемых ЛАЧХ из соответствующих желаемых ЛАЧХ  $L_{кэ} = L_{ж} - L'_{р}$ . По  $L_{кэ}$  найдена интервальная передаточная функция корректирующего элемента:

$$\bar{W}_{кэ} s = \frac{\bar{Q}_{кэ} s}{\varepsilon s} = \frac{\bar{T}_{кэ2}s + 1}{\bar{T}_{кэ1}s + 1} \frac{\bar{T}_{кэ4}s + 1}{\bar{T}_{кэ3}s + 1} \frac{\bar{T}_{кэ6}s + 1}{\bar{T}_{кэ5}s + 1}, (19)$$

где интервальные значения параметров ПФ КЭ соответственно равны:

$$\bar{T}_{кэ1} = 63; 114,8 ; \bar{T}_{кэ3} = 0,4; 4,4 ; \bar{T}_{кэ5} = 0,4; 0,4 ; \bar{T}_{кэ2} = 5,8; 23,6 ; \bar{T}_{кэ4} = 3,2; 5,8 ; \bar{T}_{кэ6} = 1,5; 2 .$$

Таким образом, КЭ представляет собой интегрально-дифференциальное звено третьего порядка.

#### 4. Результаты экспериментального исследования скорректированной САП

Экспериментальное исследование проведено на макетном образце ВЭ в двух рабочих точках системы:  $Q_{x1} = 40$  Вт,  $Q_{x2} = 100$  Вт. Амплитуды задающего ступенчатого воздействия составили:  $\Delta Q_{x3} \in 30; -30; 60; -60$  Вт. Значения потока энтропии показаны в относительных величинах:

$$\Delta \bar{Q}_x = \frac{Q_x - Q_{xi}}{\Delta Q_{x3}}, i = \bar{1}, 2 .$$

Экспериментальные переходные характеристики приведены на рис. 6.

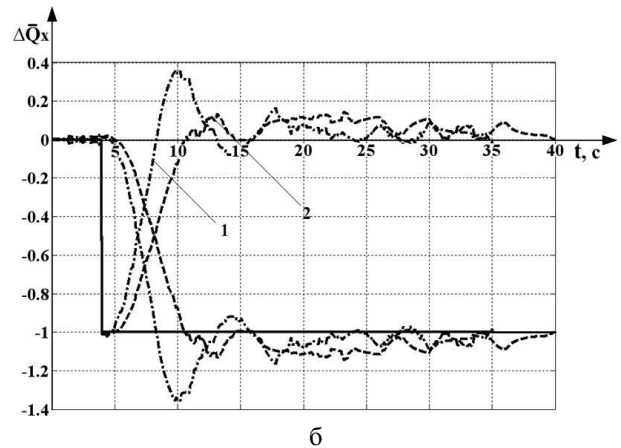
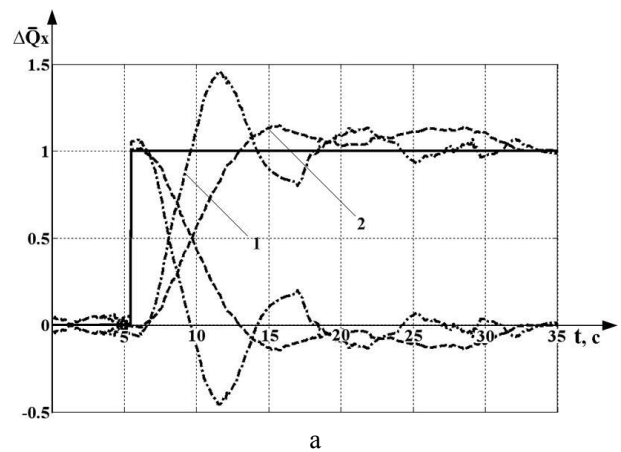


Рис. 6. Экспериментальные переходные характеристики скорректированной САП: а – рабочая точка  $Q_{x1} = 40$  Вт; б – рабочая точка  $Q_{x2} = 100$  Вт; 1 –  $|\Delta Q_{x3}| = 30$  Вт;

$$2 - |\Delta Q_{x3}| = 60 \text{ Вт}$$

По графикам переходных характеристик определены интервальные значения показателей качества:

- интервальная ошибка  $\bar{\varepsilon} = 3,7; 5$  %;

- время переходного процесса  $\bar{t}_{\text{пн}} = 26; 30$  с;
- перегуливание  $\bar{\sigma} = 10; 40$  %;
- степень затухания  $\bar{\chi} = 1,4; 2$ .

Анализ полученных характеристик показал, что переходные процессы в САП носят колебательный характер. Причем, колебательность в большей мере проявляется при отработке системой задающего ступенчатого воздействия  $\Delta Q_{\text{хз}} = \pm 30$  Вт. Это объясняется тем, что процесс в системе приближается к области экстремума на статической характеристике температуры холодного воздуха [4]. В этой области система приближается к границе устойчивости, в частности, из-за более интенсивного изменения температуры.

### Заключение

В работе построена функциональная и структурная схема САП потока энтальпии холодного воздуха ВЭ, определены интервальные ПФ разомкнутой и замкнутой системы. Показано, что характеристическое уравнение разомкнутой и замкнутой системы имеет дробный порядок.

Выполнен расчет требуемого значения коэффициента передачи разомкнутой САП из условия обеспечения точности системы в широком диапазоне режимов.

Проведен анализ устойчивости замкнутой САП логарифмическим методом Найквиста. Показано, что для обеспечения приемлемых запасов устойчивости на границах интервалов ЛАЧХ необходимо ввести в структуру системы интегрально-дифференцирующее звено.

Выполнен синтез САП методом асимптотических ЛАЧХ, определена структура и интервальные значения параметров ПФ КЭ. Показано, что для упрощения структуры ПФ КЭ целесообразно аппроксимировать исходную ЛАЧХ асимптотической с

целочисленными значениями угла наклона асимптот, кратными 20 дБ/дек.

Проведено экспериментальное исследование скорректированной САП на макетном образце ВЭ. Показано, что основные показатели качества функционирования удовлетворяют заданным в широком диапазоне режимов функционирования вихревого энергоразделителя.

Полученные результаты позволят в дальнейшем решить задачу стабилизации температуры в кабине транспортного средства.

### Список литературы

1. Азаров А.И. От однокамерной вихревой трубы Фултона к модульным многокамерным вихревым воздухоохладителям: развитие, промышленное использование, перспективы: доклад-лекция / А.И. Азаров // XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках. 26-30 мая 2003г., Рыбинск. – М. Изд. МЭИ, 2003. – Т. 2. – С. 195-203.
2. Пат. 2213016 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В60Н1/22, В60Н3/00. Климатическая установка транспортного средства / Курносое Н.Е.; Заявитель и патентообладатель Курносое Н.Е. – № 2001126082/28; заявл. 24.09.01; опубл. 27.09.03. – 6 с.
3. Кулик А.С. Экспериментальное исследование характеристик вихревого энергоразделителя / А.С. Кулик, С.Н. Пасичник, В.Г. Джулгаков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – Вып. 3 (70). – С. 65-68.
4. Кулик А.С. Идентификация математической модели вихревого энергоразделителя / А.С. Кулик, С.Н. Пасичник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – Вып. 10 (77). – С. 192-196.
5. Бесекекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.

Поступила в редколлегию 22.09.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНАННЯ ПОТОКУ ЕНТАЛЬПІЇ ВИХРОВОГО ЕНЕРГОРОЗДІЛЮВАЧА

А.С. Кулік, С.М. Пасічник

Наведено структуру системи автоматичного позиціонування (САП) потоку ентальпії холодного повітря вихрового енергорозділювача (ВЕ). Отримано інтервальні передаточні функції розімкненої та замкненої САП. Виконано розрахунок коефіцієнту передачі розімкненої САП за умови забезпечення точності. Проведено аналіз та забезпечення стійкості замкненої системи, а також синтез САП методом логарифмічних амплітудно-частотних характеристик. Отримано інтервальну передаточну функцію коректуючого елементу. Проведено експериментальне дослідження скоректованої САП на макетному зразку ВЕ.

**Ключові слова:** вихровий енергорозділювач, система автоматичного позиціонування, потік ентальпії, частотні характеристики.

### SYNTHESIS OF AUTOMATIC POSITIONING SYSTEM OF VORTICAL POWER DIVIDER ENTHALPY STREAM

A.S. Kulik, S.N. Pasichnik

Automatic positioning system (APS) structure of cold air enthalpy stream of a vortical power divider (VPD) is resulted. Interval transfer functions of open-loop and closed loop APS are received. Calculation of open-loop ASP transfer factor from a condition of accuracy assurance is executed. The analysis and assurance of the closed loop system stability, and ASP synthesis by a method of logarithmic peak-frequency characteristics are performed. Interval transfer function of a correcting element is received. The experimental research of corrected ASP on VPD model sample is spent.

**Keywords:** vortical power divider, automatic positioning system, enthalpy stream, frequency characteristics.