

УДК 681.5

А. С. КУЛИК, С. Н. ПАСИЧНИК

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДРОБНОГО ПОРЯДКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ВИХРЕВОГО ЭНЕРГОРАЗДЕЛИТЕЛЯ

Приведена структура системы автоматического позиционирования (САП) потока энергии холодного воздуха вихревого энергоразделителя (ВЭ). Получены интервальные передаточные функции (ПФ) разомкнутой и замкнутой САП. Проведен синтез САП методом асимптотических логарифмических амплитудно-частотных характеристик. Получена интервальная передаточная функция корректирующего элемента (КЭ) дробного порядка. Выполнена аппроксимация передаточной функции КЭ эквивалентным динамическим звеном, допускающим переход к дифференциальному уравнению в конечно-разностной форме.

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

Введение

Одним из нетрадиционных способов преобразования тепловой энергии является способ, основанный на вихревом эффекте Ранка [1]. 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 энергии холодного воздуха при постоянном давлении сжатого воздуха. Такой подход ограничивает диапазон рабочих режимов и не учитывает динамические свойства вихревого энергоразделителя.

Возможным вариантом расширения диапазона рабочих режимов может быть решение задачи синтеза САП режимов ВЭ с использованием метода интервальных логарифмических частотных характеристик [3]. Для реализации, полученной при этом передаточной функции (ПФ), КЭ дробного порядка получена аппроксимированная ЛАЧХ КЭ с наклонами асимптот, кратными 20 дБ/дек, что ухудшило динамические показатели качества системы.

Обеспечение требуемых динамических показа-

телей качества управления тепловыми и газодинамическими процессами с использованием КЭ ПИД-типа дробного порядка [4] связано с необходимостью проведения большого объема экспериментальных исследований для выбора настроечных параметров КЭ.

В данной работе приводятся результаты синтеза САП режимов ВЭ методом ЛАЧХ, что позволит в дальнейшем решить задачу разработки вихревой системы кондиционирования транспортного средства

1. Постановка задачи исследования

Для обеспечения изменения потока энергии холодного воздуха вихревого энергоразделителя в широком диапазоне режимов, удовлетворяющего заданным показателям качества переходных процессов, требуется построить функциональную схему САП [3].

Используя результаты экспериментального определения статических и динамических характеристик, а также структуры и параметров математической модели ВЭ, сформировать структурную схему и математическую модель САП в виде интервальных передаточных функций [5].

Решить задачу обеспечения устойчивости и качества позиционирования потока энергии ВЭ в широком диапазоне режимов с использованием интервальных ЛАЧХ.

Выполнить аппроксимацию передаточной функции КЭ эквивалентным динамическим звеном, допускающим переход к дифференциальному уравнению дробного порядка в конечно-разностной форме для реализации цифрового корректирующего элемента.

2. Формирование структуры САП ВЭ

Функциональная схема САП приведена на рис. 1 [3]: ЗУ – задающее устройство; КЭ – корректирующий элемент; УМ – усилитель мощности; ШД – шаговый двигатель; В – вентиль; ВЭ – вихревой энергоразделитель; Дтс, Дтх, Дтг – датчики температуры сжатого, холодного и горячего воздуха; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ОАП – объект автоматического позиционирования; Q_x – блок вычисления потока энергии холодного воздуха; Q_{x3}[kT₀] – заданное значение потока энергии холодного воздуха, Вт; ε[kT₀] – ошибка системы, Вт; ν[kT₀] – частота на входе усилителя мощности, Гц; φ(t) – угловое положение вала двигателя, рад; ζ(t) – линейное положение регулирующего органа вентиля, м; P_c^{*}(t) – давление сжатого воздуха, Па; T_c^{*}(t), T_x^{*}(t), T_r^{*}(t) – температуры торможения сжатого, холодного и горячего воздуха, К; U_{тс}(t), U_{тх}(t), U_{тр}(t) – напряжения датчиков температуры сжатого, холодного и горячего воздуха, В; U_{тс}[kT₀], U_{тх}[kT₀], U_{тр}[kT₀] – дискретные значения напряжений датчиков температуры сжатого, холодного и горячего воздуха, В; Q̂_x[kT₀] – дискретное оценочное значение потока энергии холодного воздуха, Вт.

При формировании структурной схемы принято, что давление сжатого воздуха постоянно P_c^{*} = const (рис. 2) [3]. На рис. 2 обозначено: W_{кэ}(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 управля-

ющему воздействию; Q_{x3}(s) – изображение заданного значения потока энтальпии холодного воздуха; E(s) – изображение сигнала ошибки; N(s) – изображение частоты на выходе корректирующего элемента; изображение угла поворота вала двигателя; Z(s) – изображение линейного положения регулирующего органа вентиля; Q_x(s) – изображение действительного значения потока энергии холодного воздуха.

Шаговый двигатель, который используется в системе в качестве исполнительного элемента, является разомкнутым и не содержит редуктора, что связано с недогруженностью двигателя. Это в свою очередь дает возможность представить ПФ двигателя совместно с вентиляем в виде интегрирующего звена:

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

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

Интервальная передаточная функция вихревого энергоразделителя, учитывающая динамические свойства ВЭ и датчиков температуры, может быть представлена в виде апериодического звена дробного порядка [5]:

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

где Q̄_x(s) – изображение интервального значения потока энергии холодного воздуха;

Z̄(s) – изображение интервального значения линейного положения регулирующего органа вентиля;

K̄_{вэ} = [−1, 7 · 10⁵; −9 · 10⁴] – интервальное значение коэффициента передачи, Вт/м;

T̄₁ = [11, 8; 20], T̄₂ = [1, 5; 1, 7] – интервальные значения постоянных времени, с;

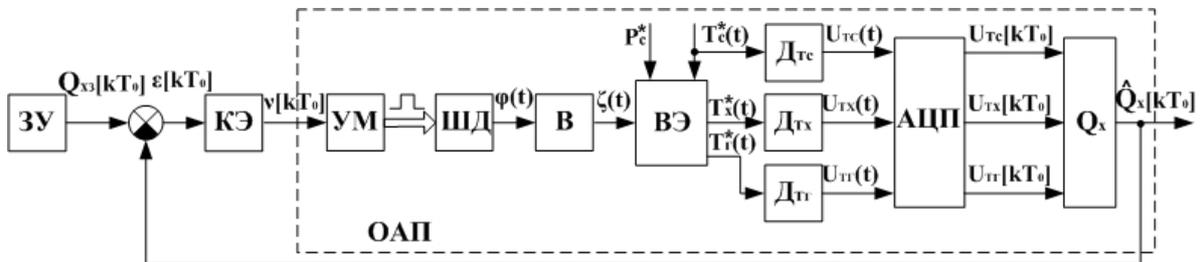


Рис. 1. Функциональная схема САП

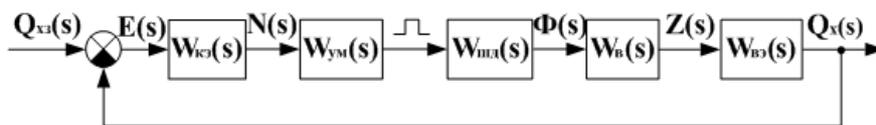


Рис. 2. Структурная схема САП

$\bar{v}_1 = [0, 2; 0, 46]$, $\bar{v}_2 = [0, 72; 1, 8]$ – интервальные значения показателей степени.

С учетом (1), (2) передаточные функции САП примут вид [3]:

– передаточная функция разомкнутой системы:

$$\bar{W}_p(s) = \frac{\bar{Q}_x(s)}{\bar{Q}_{x3}(s)} = \frac{\bar{K}_p}{s(\bar{T}_1s+1)^{\bar{v}_1}(\bar{T}_2s+1)^{\bar{v}_2}}; \quad (3)$$

– передаточная функция замкнутой системы:

$$\bar{\Phi}(s) = \frac{\bar{Q}_x(s)}{\bar{Q}_{x3}(s)} = \frac{\bar{K}_p}{s(\bar{T}_1s+1)^{\bar{v}_1}(\bar{T}_2s+1)^{\bar{v}_2} + \bar{K}_p}; \quad (4)$$

– передаточная функция замкнутой системы по ошибке от задающего воздействия:

$$\bar{\Phi}_\varepsilon(s) = \frac{\bar{E}(s)}{\bar{Q}_{x3}(s)} = \frac{s(\bar{T}_1s+1)^{\bar{v}_1}(\bar{T}_2s+1)^{\bar{v}_2}}{s(\bar{T}_1s+1)^{\bar{v}_1}(\bar{T}_2s+1)^{\bar{v}_2} + \bar{K}_p}, \quad (5)$$

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

3. Обеспечение точности и анализа качества исходной САП

Обеспечение точности САП предполагает определение требуемого значения коэффициента передачи разомкнутой системы. Так как исходная разомкнутая САП обладает астатизмом, то коэффициент передачи найден из условия обеспечения добротности по скорости:

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

где $\bar{\varepsilon}_{\text{ск}}$ – интервальное значение скоростной ошибки, Вт;

$$\bar{Q}_{x3}(s) = \frac{V_Q}{s^2} \quad \text{– изображение линейного задающего воздействия};$$

V_Q – скорость нарастания задающего воздействия, Вт/с.

$\varepsilon_{\text{доп}}$ – допустимое значение скоростной ошибки, Вт.

Совместное решение уравнений (5) и (6), с учетом $V_Q = 1, 5$ Вт/с и $\varepsilon_{\text{доп}} = 1, 5$ Вт, позволяет получить требуемое значение коэффициента передачи:

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

Для оценки качества функционирования замкнутой САП, удовлетворяющей требованиям точности, построены интервальные переходные характеристики. Расчет произведен методом Солодовникова с использованием интегрального соотношения

между переходной и вещественной частотной характеристиками [6]:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty U_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega, \quad (8)$$

где $h(t)$ – переходная характеристика;

$U_3(\omega)$ – вещественная частотная характеристика (ВЧХ) замкнутой системы.

Для этого следует записать частотную интервальную передаточную функцию разомкнутой системы, выполнив замену $s \rightarrow j\omega$ в выражении (3) с учетом (7):

$$\bar{W}_p(j\omega) = \frac{\bar{Q}_x(j\omega)}{\bar{Q}_{x3}(j\omega)} = \frac{\bar{K}_{\text{ртр}}}{j\omega(\bar{T}_1j\omega+1)^{\bar{v}_1}(\bar{T}_2j\omega+1)^{\bar{v}_2}}. \quad (9)$$

Выполнив в (9) переход к декартовым координатам, выражение для интервальной ВЧХ замкнутой системы примет вид:

$$\bar{U}_3(\omega) = \frac{\bar{U}_p(\omega)(1 + \bar{U}_p(\omega)) + \bar{V}_p^2(\omega)}{(1 + \bar{U}_p(\omega))^2 + \bar{V}_p^2(\omega)}, \quad (10)$$

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

В результате совместного решения (8), (10) с нижним и верхним пределами интегрирования $\omega_n = 0, 001$ рад/с, $\omega_b \cong 10\omega_{\text{ср}}$ рад/с получены графики переходных характеристик замкнутой системы при минимальных и максимальных значениях параметров ПФ КЭ в относительных координатах (рис. 3).

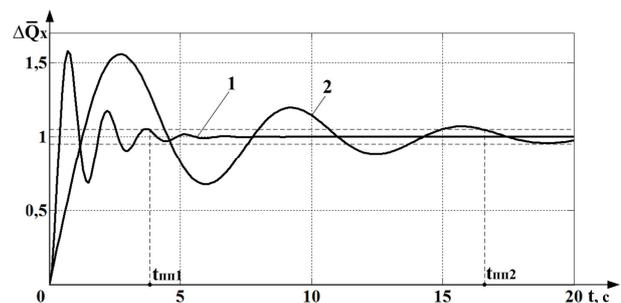


Рис. 3. Переходные характеристики замкнутой САП: 1 – $T_{1\text{min}}, T_{2\text{min}}, K_{p\text{max}}$; 2 – $T_{1\text{max}}, T_{2\text{max}}, K_{p\text{min}}$

Интервальные значения динамических показателей качества полученных переходных характеристик (рис. 3): время переходного процесса $\bar{t}_{\text{пп}} = [3, 8; 17]$ с; степень затухания $\bar{\chi} = [2, 8; 3, 4]$; перерегулирование $\bar{\sigma} = [58; 60]\%$. Наличие существенной колебательности требует дополнительной коррекции динамических свойств системы.

4. Коррекция динамических свойств системы

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

Для этого из (9) получены выражения для ЛАЧХ и ЛФЧХ:

$$\bar{L}_p(\omega) = 20 \lg \bar{K}_{ртр} - 20 \lg \omega - 20\bar{v}_1 \lg(\bar{T}_1^2 \omega^2 + 1)^{1/2} - 20\bar{v}_2 \lg(\bar{T}_2^2 \omega^2 + 1)^{1/2}; \quad (11)$$

$$\bar{\varphi}_p(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \bar{v}_1 \arctg(\bar{T}_1 \omega) - \bar{v}_2 \arctg(\bar{T}_2 \omega). \quad (12)$$

По уравнению (11) построены интервальные располагаемые асимптотические ЛАЧХ исходной разомкнутой системы, удовлетворяющей требованиям точности для граничных значений параметров ПФ ОАП в частотном диапазоне $\omega \in \{0, 01; 100\}$ рад/с (рис. 4).

Процедура построения желаемой 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.

Поэтому требования к быстрдействию и перерегулированию САП могут быть не жесткими: максимальное время переходного процесса $t_{пп\max} = 20$ с, максимальное значение перерегулирования $\sigma_{\max} = 30\%$.

Желаемая частота среза определяется следующим образом [6]: $\omega_{срж} = k\pi / t_{пп\max}$. Для требуемых значений времени переходного процесса и перерегулирования определен коэффициент пропорциональности $k = 4,8$. Тогда частота среза примет значение $\omega_{срж} = 0,77$ рад/с или в логарифмическом масштабе $\lg \omega_{срж} = -0,11$ дек.

Среднечастотная асимптота желаемой ЛАЧХ проходит через частоту среза с наклоном -20 дБ/дек, что характерно для апериодического звена первого порядка. Протяженность среднечастотного участка ограничивается запасами по амплитуде, определяемыми по номограммам Солодовникова [6]. 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.

В области высоких частот системы располагаемая и желаемая ЛАЧХ параллельны, так как высокочастотная область существенно не влияет на динамические свойства системы.

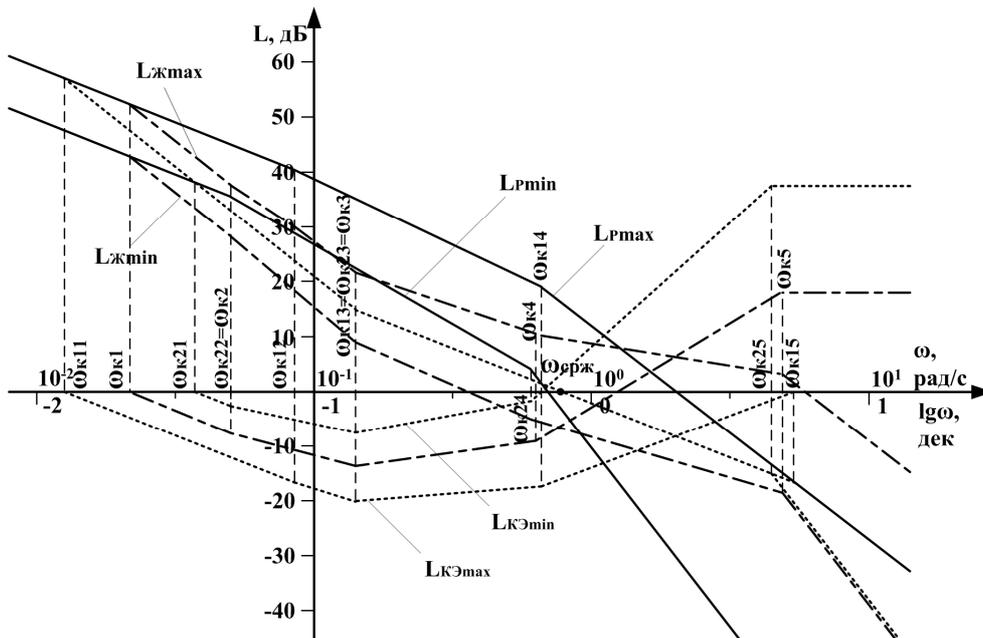


Рис. 4. Интервальные располагаемые, желаемые и ЛАЧХ корректирующего устройства

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 КЭ:

$$\bar{W}_{кэ}(s) = \frac{\bar{N}(s)}{\bar{E}(s)} = \bar{K}_к \frac{(\bar{T}_{к2}s+1)^{\bar{\mu}_2} (\bar{T}_{к3}s+1)^{\bar{\mu}_3} (\bar{T}_{к4}s+1)^{\bar{\mu}_4}}{(\bar{T}_{к1}s+1)^{\bar{\mu}_1} (\bar{T}_{к5}s+1)^{\bar{\mu}_5}}, \quad (13)$$

где интервальные значения параметров ПФ КЭ соответственно равны:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{к1} &= [24; 66]; \bar{T}_{к2} = [11, 8; 20]; \bar{T}_{к3} = [7, 6; 7, 6]; \\ \bar{T}_{к4} &= [1, 5; 1, 7]; \bar{T}_{к5} = [0, 15; 0, 15]; \\ \bar{\mu}_1 &= [1; 1]; \bar{\mu}_2 = [0, 2; 0, 46]; \bar{\mu}_3 = [1; 1]; \\ \bar{\mu}_4 &= [0, 72; 1, 8]; \bar{\mu}_5 = [0, 92; 2, 26]. \end{aligned}$$

Практическая реализация КЭ предполагает переход к точечным значениям параметров ПФ. Такой переход может быть выполнен в предположении о равновероятном нахождении значений параметров ПФ внутри интервалов. В этом случае ПФ КЭ (13) может быть представлена в виде:

$$W_{кэ}(s) = \frac{N(s)}{E(s)} = K_к \frac{(T_{к2}s+1)^{\mu_2} (T_{к3}s+1)^{\mu_3}}{(T_{к1}s+1)^{\mu_1} (T_{к4}s+1)^{\mu_4}}, \quad (14)$$

где значения параметров соответственно равны:

$$\begin{aligned} K_к &= 1; T_{к1} = 45, 7; T_{к2} = 9, 1; T_{к3} = 1, 6; T_{к4} = 0, 2; \\ \mu_1 &= 1; \mu_2 = 1, 4; \mu_3 = 1, 16; \mu_4 = 1, 56. \end{aligned}$$

Для оценки качества функционирования скорректированной САП запишем частотную ПФ КЭ:

$$W_{кэ}(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{E(j\omega)} = K_к \frac{(T_{к2}j\omega+1)^{\mu_2} (T_{к3}j\omega+1)^{\mu_3}}{(T_{к1}j\omega+1)^{\mu_1} (T_{к4}j\omega+1)^{\mu_4}}. \quad (15)$$

Решением совместно уравнений (3), (8), (9), (10), (15), получены интервальные переходные характеристики САП (рис. 5).

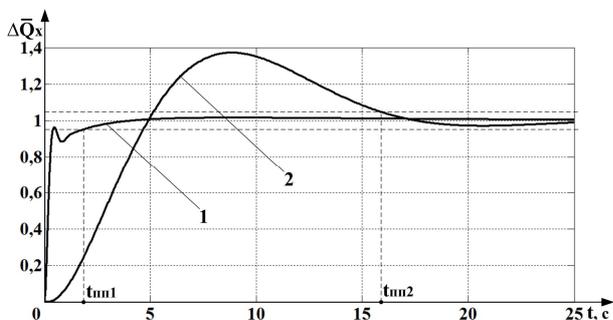


Рис. 5. Переходные характеристики скорректированной САП: 1 – U_{3max} ; 2 – U_{3min}

Интервальные значения динамических показателей качества системы: время переходного процесса $\bar{t}_{пп} = [2; 16]$ с; перерегулирование $\bar{\sigma} = [0; 38]$ %.

Выражение (14) не позволяет получить дифференциальное уравнение КЭ для реализации алгоритма управления. Поэтому целесообразно найти эквивалентную структуру ПФ дробного порядка, допускающую переход во временную область.

Для этого необходимо выделить в выражении (14) множители с целым и дробным порядком:

$$\begin{aligned} W_{кэ}(s) &= W_{к1}(s) W_{к2}(s) = \\ &= \frac{(T_{к2}s+1)(T_{к3}s+1)}{(T_{к1}s+1)(T_{к4}s+1)} \cdot \frac{(T_{к2}s+1)^{\mu_2-1} (T_{к3}s+1)^{\mu_3-1}}{(T_{к4}s+1)^{\mu_4-1}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Множитель дробного порядка в (16) можно записать в виде произведения

$$\begin{aligned} W_{к2}(s) &= W_{к21}(s) \cdot W_{к22}(s) = \\ &= \frac{((T_{к2}s)^{\mu_2-1} + 1)((T_{к3}s)^{\mu_3-1} + 1)}{(T_{к4}s)^{\mu_4-1} + 1} \cdot W_{к22}(s), \end{aligned} \quad (17)$$

где $W_{к22}(s)$ – искомое добавочное звено.

Структура и параметры звена $W_{к22}(s)$ определены графоаналитическим способом с использованием свойств производных ЛАЧХ и ЛФЧХ

$$L_{к22}(\omega) = L_{к2}(\omega) - L_{к21}(\omega); \quad (18)$$

$$\varphi_{к22}(\omega) = \varphi_{к2}(\omega) - \varphi_{к21}(\omega) \quad (19)$$

по логарифму частоты [5], имеющих экстремумы на частотах сопряжения (рис. 6).

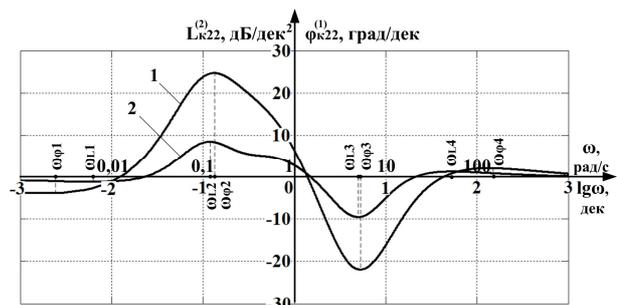


Рис. 6. Производные ЛАЧХ и ЛФЧХ звена $W_{к22}(s)$: 1 – $L_{к22}^{(2)}(\omega)$; 2 – $\varphi_{к22}^{(1)}(\omega)$

Расположение экстремумов на рис. 6 позволяет получить ПФ добавочного звена в виде:

$$W_{к22}(s) = \frac{((T_{к6}s)^{\mu_6} + 1)((T_{к8}s)^{\mu_8} + 1)}{((T_{к5}s)^{\mu_5} + 1)((T_{к7}s)^{\mu_7} + 1)}, \quad (20)$$

где $T_{к5} = 220, 7$; $T_{к6} = 8$; $T_{к7} = 0, 2$; $T_{к8} = 0, 012$ – постоянные времени, соответствующие частотам, на

которых располагаются экстремумы. При этом локальные максимумы указывают на наличие нулей, а минимумы – полюсов ПФ.

Показатели степени $\mu_i, i = \overline{5, 8}$ получены решением системы нелинейных алгебраических уравнений (18), (19) на частотах сопряжения методом наименьших квадратов: $\mu_5 = 0,37$; $\mu_6 = 0,72$; $\mu_7 = 0,64$; $\mu_8 = 0,4$.

Таким образом, структура эквивалентного КЭ дробного порядка с учетом (16), (17), (20) примет вид:

$$W_{кЭ}^3(s) = W_{к1}(s) W_{к21}(s) W_{к22}(s). \quad (21)$$

Проверка адекватности полученного эквивалентного КЭ выполнена путем сравнения его переходной характеристики с аналогичной характеристикой исходного КЭ, для чего получена частотная форма выражения (21):

$$\begin{aligned} W_{кЭ}^3(j\omega) &= W_{к1}(j\omega) W_{к21}(j\omega) W_{к22}(j\omega) = \\ &= \frac{(T_{к2}j\omega + 1)(T_{к3}j\omega + 1)}{(T_{к1}j\omega + 1)(T_{к4}j\omega + 1)} \times \\ &\times \frac{\left((T_{к2}j\omega)^{\mu_2-1} + 1 \right) \left((T_{к3}j\omega)^{\mu_3-1} + 1 \right)}{(T_{к4}j\omega)^{\mu_4-1} + 1} \times \\ &\times \frac{\left((T_{к6}j\omega)^{\mu_6} + 1 \right) \left((T_{к8}j\omega)^{\mu_8} + 1 \right)}{\left((T_{к5}j\omega)^{\mu_5} + 1 \right) \left((T_{к7}j\omega)^{\mu_7} + 1 \right)} = A_{кЭ}^3(\omega) \cdot e^{j\varphi_{кЭ}^3(\omega)}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $A_{кЭ}^3(\omega)$, $\varphi_{кЭ}^3(\omega)$ – АЧХ и ФЧХ эквивалентного КЭ.

Вещественная частотная характеристика КЭ определена как проекция вектора частотной передаточной функции (22) на вещественную ось

$$U_{кЭ}^3(\omega) = A_{кЭ}^3(\omega) \cdot \cos\left(\varphi_{кЭ}^3(\omega)\right), \quad (23)$$

при этом АЧХ и ФЧХ отдельного множителя дробного порядка имеют вид:

$$A_i(\omega) = \left((T_i\omega)^{2\mu_i} + 2(T_i\omega)^{\mu_i} \cos\left(\mu_i \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (24)$$

$$\varphi_i(\omega) = \frac{(T_i\omega)^{\mu_i} \sin\left(\mu_i \frac{\pi}{2}\right)}{(T_i\omega)^{\mu_i} \cos\left(\mu_i \frac{\pi}{2}\right) + 1}, \quad i = \overline{1, 7}. \quad (25)$$

Переходные характеристики (рис. 7) получены с использованием интегрального соотношения (8), выражения (15) и частотной формы (22) с учетом (23) – (25).

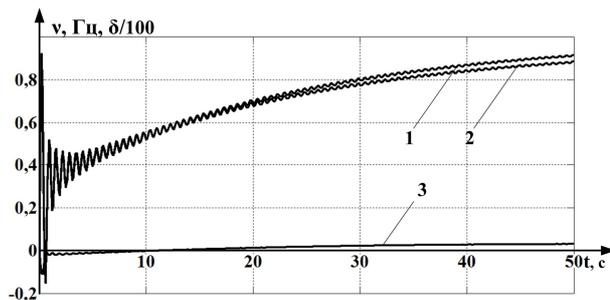


Рис. 7. Переходные характеристики КЭ: 1 – исходный; 2 – эквивалентный; 3 – интервальная погрешность

Сравнительный анализ графиков на рис. 7 показывает, что максимальное значение интервальной погрешности не превышает $\bar{\delta}_{\max} = 4\%$.

Передаточную функцию (21) во временной области удобно представить в виде системы трех дифференциальных уравнений, первое из которых содержит производные целого, а два других – дробного порядка. Для получения конечно-разностной формы первого уравнения используется разностная схема Эйлера первого и второго порядка

$$\frac{dv}{dt} \approx \frac{v(kT_0) - v([k-1]T_0)}{T_0}; \quad (26)$$

$$\frac{d^2v}{dt^2} \approx \frac{v(kT_0) - 2v([k-1]T_0) + v([k-2]T_0)}{T_0^2}, \quad (27)$$

а для второго и третьего уравнений – разностная схема Грюнвальда-Летникова дробного порядка [7]

$$\frac{d^\mu v}{dt^\mu} = T_0^{-\mu} \sum_{k=0}^{[t/T_0]} (-1)^k \frac{\Gamma(\mu+1)}{\Gamma(k+1)\Gamma(\mu+1-k)} v(t-kT_0), \quad (28)$$

где T_0 – период квантования;

$[\cdot]$ – целая часть;

$\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

Заключение

В работе построена функциональная и структурная схема САП потока энергии холодного воздуха ВЭ, определены интервальные ПФ дробного порядка разомкнутой и замкнутой системы.

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

Выполнен синтез САП методом асимптотических ЛАЧХ, определена структура и интервальные значения параметров ПФ КЭ.

Сформирована структура и определены параметры эквивалентной ПФ КЭ, допускающей пере-

ход к дифференциальному уравнению дробного порядка в конечно-разностной форме.

Для проверки полученных результатов будет проведено экспериментальное исследование цифровой САП ВЭ с КЭ дробного порядка, что позволит в дальнейшем решить задачу стабилизации температуры в кабине транспортного средства.

Литература

1. Азаров, А. И. Вихревые трубы в промышленности. Изобретатель – машиностроению. Энергосбережение и вихревой эффект: исследование и освоение инновационных проектов [Текст] / А. И. Азаров. – СПб. : ЛЕМА, 2010. – 170 с.

2. Пат. 2213016 Российская Федерация, МПК⁷ В 60 Н 1/22, В 60 Н 3/00. Климатическая установка транспортного средства [Текст] / Курносов Н. Е. ; заявитель и патентообладатель Курносов Н. Е. – № 2001126082/28 ; заявл. 24.09.01 ; опубл. 27.09.03, Бюл. № 19. – 6 с. : ил.

3. Кулик, А. С. Синтез системы позиционирования потока энthalпии вихревого энергораздели-

теля [Текст] / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник // Системы обработки информации. – 2010. – Вып. 6 (87). – С. 115 – 121.

4. Sreerai, P. V. Design and Implementation of PID Controller with Lead Compensator for Thermal Process [Text] / P. V. Sreerai // International Journal of Computer Applications. – 2013. – Vol. 67, № 1. – P. 26 – 31.

5. Кулик, А. С. Идентификация математической модели вихревого энергоразделителя в частотной области [Текст] / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7(94). – С. 192 – 196.

6. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования [Текст] / под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1967. – 682 с.

7. Учайкин, В. В. Метод дробных производных [Текст] / В. В. Учайкин. – Ульяновск : «Артишок», 2008. – 512 с.

Поступила в редакцию 14.05.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, доцент каф. «Системы управления летательных аппаратов» А. С. Гольцов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕДАТОЧНИХ ФУНКЦІЙ ДРОБОВОГО ПОРЯДКУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНАВАННЯ РЕЖИМІВ ВИХРОВОГО ЕНЕРГОРОЗДІЛЮВАЧА

А. С. Кулік, С. М. Пасічник

Наведено структуру системи автоматичного позиціонування (САП) потоку енергії холодного повітря вихрового енергорозділювача (ВЕ). Отримано інтервальні передаточні функції (ПФ) розімкненої та замкненої САП. Проведено синтез САП методом асимптотичних логарифмічних амплітудно-частотних характеристик. Отримано інтервальну передаточну функцію коректуючого елементу (КЕ) дробового порядку. Виконано апроксимацію передаточної функції КЕ еквівалентною динамічною ланкою, яка дозволяє перехід до диференціального рівняння в кінцево-різницевої формі.

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

FRACTIONAL ORDER TRANSFER FUNCTION USAGE FOR SYNTHESIS OF THE AUTOMATIC POSITIONING SYSTEM OF OPERATING MODE OF VORTICAL POWER SEPARATOR

A. S. Kulik, S. N. Pasichnik

The structure of the automatic positioning system (APS) of flow cold air's energy of vortical power separator (VPS) is shown. Interval transfer functions (TF) of open-loop and close-loop APS are given. The synthesis of APS by asymptotic logarithmic amplitude-frequency characteristics is carried out. The interval transfer function of correction element (CE) with fractional order is given. Approximation of the transfer function of CE with the equivalent dynamic link that allows a transition to a differential equation in finite difference form is made.

Key words: vortical power separator, automatic positioning system, energy flow, frequency characteristics.

Кулик Анатолій Степанович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Системы управления летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Пасичник Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент каф. «Системы управления летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: snpasichnik@gmail.com.