

УДК 621.452.3

Е.В. ПАВЛЮК<sup>1</sup>, С.В.ЕПИФАНОВ<sup>2</sup>, С.И.СУХОВЕЙ<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Украина

### СИНТЕЗ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ СВОБОДНОЙ ТУРБИНЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрены подходы к структуре контура управления частотой вращения свободной турбины ВСУ. Проведено сравнение достижимых динамических характеристик контура при его независимой работе и последовательно с контуром регулирования частоты вращения турбокомпрессора. Приведен алгоритм анализа в частотной области.

**система автоматического управления, свободная турбина, турбокомпрессор, частотные характеристики, синтез, анализ**

При синтезе многоконтурной САУ ГТД всегда возникает вопрос совместной работы различных регуляторов. Известны различные способы минимизации взаимного влияния регуляторов. Рассмотрим некоторые из них на примере согласования работы регуляторов  $dn_{TK}/dt$  и  $n_{CT}$  САУ вспомогательной силовой установки (ВСУ) со свободной турбиной (СТ).

Однорежимный регулятор  $n_{CT} = \text{const}$  является основным регулятором САУ ВСУ со свободной турбиной. Один из важнейших контуров САУ такого двигателя на участках разгона, приемистости и сброса выполняет программу  $dn_{TK}/dt = f(U)$ , где  $U$  – вектор параметров состояния ВСУ,  $n_{TK}$  – частота вращения ротора турбокомпрессора (ТК).

Согласование работы регулятора  $dn_{TK}/dt$  с регулятором  $n_{CT} = \text{const}$  возможно двумя способами. Первый и наиболее распространенный из них заключается в селектировании управляющего воздействия по принципу минимума расхода топлива, требуемого в текущий момент времени для работы каждого из регуляторов [1]. Однако реализация регулятора  $dn_{TK}/dt$  требует вычисления ускорения турбокомпрессора по результатам измерения его скорости (частоты вращения), что приводит к усилению шумов в соответствующем канале и ужесточает требования к фильтрации результатов измерения частоты вращения. При использовании быстродействующего дозатора топ-

лива (например, дозатора с непосредственным приводом от электромеханического преобразователя (ПЭМ)) работа регулятора  $dn_{TK}/dt$  приводит к существенной пульсации расхода топлива.

Другим возможным способом согласования работы регуляторов  $dn_{TK}/dt$  и  $n_{CT}$  является выделение дополнительного внутреннего контура регулирования частоты вращения турбокомпрессора, задание для которого формирует контур  $n_{CT}$ . В этом случае регулирование  $dn_{TK}/dt$  сводится к ограничению темпа изменения заданного значения  $n_{TK}$ , а точность его поддержания определяется пропорциональной составляющей закона регулирования [2]. Недостатком этого способа является последовательная работа двух регуляторов, что может приводить к уменьшению запасов устойчивости и ухудшению других динамических характеристик САУ.

**Целью данного исследования** является анализ динамических характеристик контура  $n_{CT}$  при независимой и последовательной работе регуляторов  $n_{TK}$  и  $n_{CT}$  САУ ВСУ со свободной турбиной на примере ВСУ АИ450-МС.

В качестве метода исследования используем анализ в частотной области по логарифмическим частотным характеристикам (ЛЧХ) линеаризованной САУ.

Математическая модель объекта регулирования (здесь и далее рассматриваются отклонения пере-

менных состояния от установившихся значений) имеет вид

$$\begin{aligned} T_1 \frac{dn_{TK}}{dt} + n_{TK} &= k_{11} G_T; \\ T_2 \frac{dn_{CT}}{dt} + n_{CT} &= k_{21} G_T + k_{22} n_{TK}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $G_T$  – расход топлива;

$T_1, T_2$  – постоянные времени;

$k_{11}, k_{21}, k_{22}$  – коэффициенты усиления.

Для удобства анализа объект регулирования можно представить в виде последовательного соединения динамических звеньев с передаточными функциями:

$$\begin{aligned} W_{TK} &= \frac{n_{TK}}{G_T} = \frac{k_{11}}{T_1 p + 1}; \\ W_{CT} &= \frac{n_{CT}}{n_{TK}} = \left(1 + \frac{k_{21}}{k_{22} W_{TK}}\right) \cdot \frac{k_{22}}{T_2 p + 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Математическая модель дозатора топлива с непосредственным приводом от ПЭМ [3] после линеаризации сухого трения приобретает вид

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + k_v \frac{d\alpha}{dt} = k_i \cdot i; \quad G_T = k_{GT} \cdot \alpha, \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции ротора;

$\alpha$  – угол поворота ротора;

$k_v, k_i$  и  $k_{GT}$  – коэффициенты вязкого трения, крутящего момента и расхода топлива;

$i$  – ток управления.

Соответственно, передаточную функцию дозатора можно представить следующим образом:

$$W_{dT} = \frac{k_i k_{GT}}{p(Jp + k_v)}. \quad (4)$$

Для внутреннего контура регулирования расхода топлива принимаем пропорционально-дифференциальный закон регулирования:

$$W_{ПД} = \frac{i}{G_{T.зад} - G_T} = k_{П0} + k_{Д} p, \quad (5)$$

где  $G_{T.зад}$  – заданное значение расхода топлива;

$k_{П0}$  и  $k_{Д}$  – коэффициенты усиления пропорциональной и дифференциальной составляющих.

Для качественной оценки и с целью избежать громоздкого вычисления частотной передаточной функции цифровой САУ для учета запаздывания цифрового блока управления вводим звено чистого запаздывания на  $1,5 T$ , где  $T$  – период дискретизации по времени:

$$W_3 = e^{-1,5 p T}. \quad (6)$$

В итоге для передаточной функции замкнутого внутреннего контура регулирования расхода топлива можно получить следующее выражение:

$$W_{GT} = \frac{W_0}{1 + W_0}, \quad (7)$$

где  $W_0 = W_3 W_{ПД} W_{dT}$ .

В качестве закона регулирования  $n_{CT}$  рассматриваем пропорционально-интегральный закон с передаточной функцией

$$W_{ПИ} = \frac{i}{n_{CT.зад} - n_{CT}} = k_{ПИ} + \frac{k_{И}}{p}, \quad (8)$$

где  $n_{CT.зад}$  – заданное значение частоты вращения свободной турбины;

$k_{ПИ}$  и  $k_{И}$  – коэффициенты усиления пропорциональной и интегральной составляющих.

Для исключения последовательного включения двух интегральных составляющих для дополнительного внутреннего контура регулирования  $n_{TK}$  принимаем пропорциональный закон регулирования

$$W_{П} = \frac{G_{T.зад}}{n_{TK.зад} - n_{TK}} = k_{П2}, \quad (9)$$

где  $n_{TK.зад}$  – заданное значение частоты вращения ТК;

$k_{П2}$  – коэффициент усиления.

При этом значение коэффициента усиления выбираем из условия обеспечения требуемой точности реализации закона  $dn_{TK}/dt = f(U)$  на всех режимах работы двигателя.

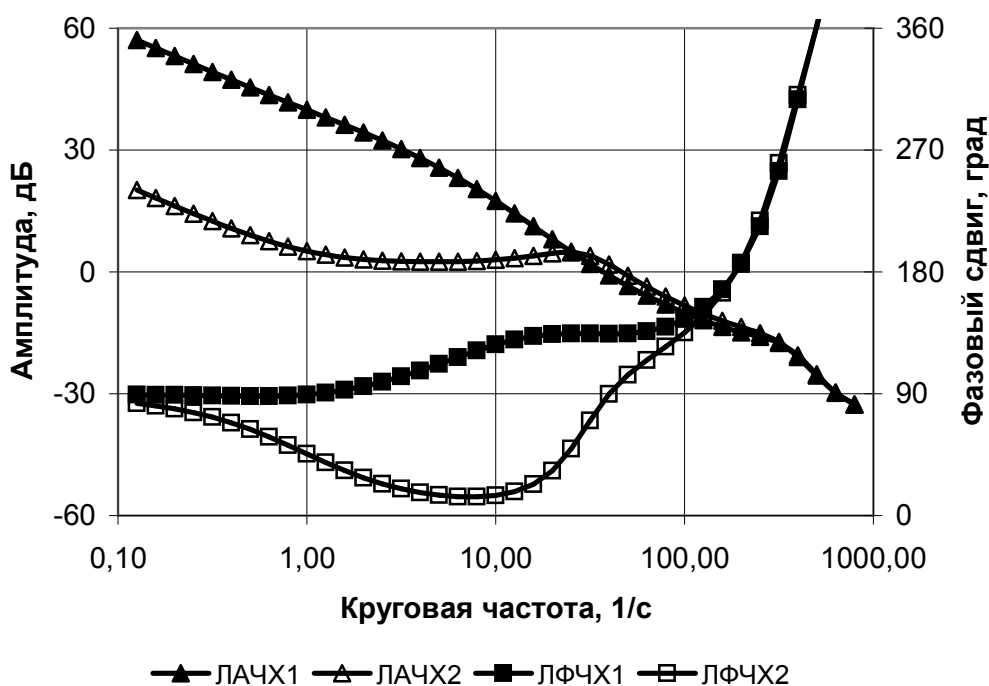


Рис. 1. ЛЧХ для различных вариантов формирования контура  $n_{ст}$  при одинаковых значениях составляющих закона регулирования

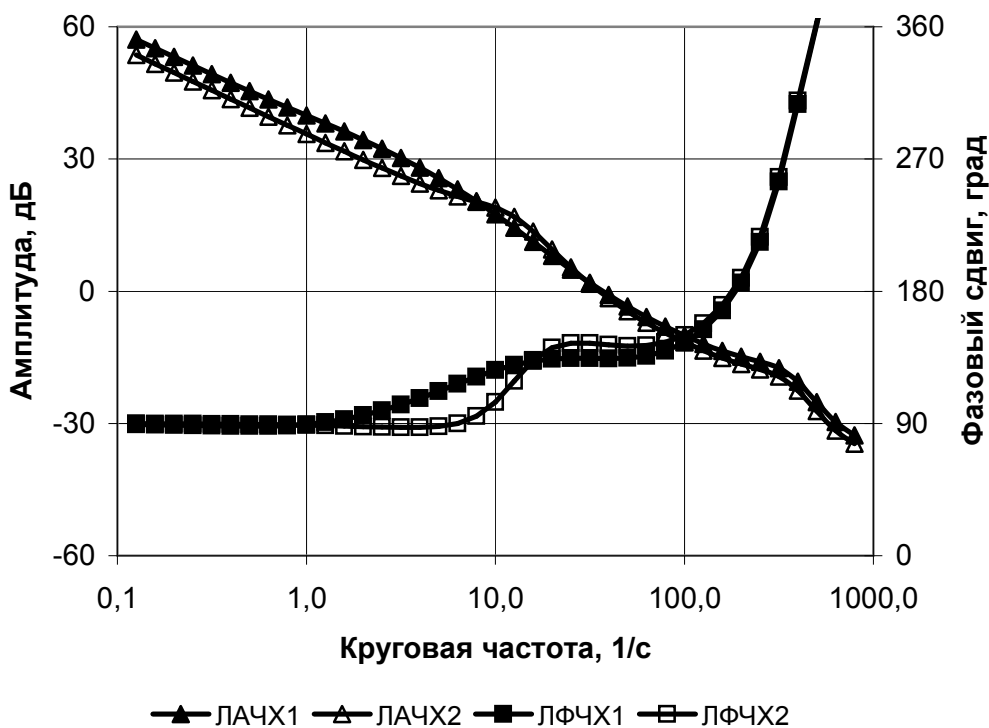


Рис. 3. ЛЧХ для различных вариантов формирования контура  $n_{ст}$  при рациональном выборе значений составляющих закона регулирования

На основе проведенного анализа получаем структурную схему контура  $n_{CT}$  в виде, приведенном на рис. 3, где  $K_3 = 0$  для случая независимой работы регулятора  $n_{CT}$  (вариант 1) и  $K_3 = 1$  для случая работы регулятора  $n_{CT}$  последовательно с регулятором  $n_{TK}$ .

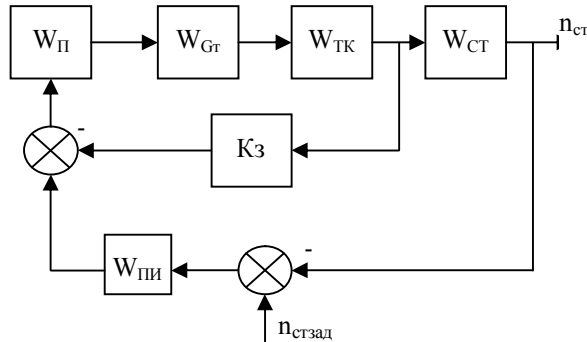


Рис. 3. Структурная схема контура  $n_{CT}$

В соответствии со структурной схемой передаточную функцию разомкнутого контура регулирования  $n_{CT}$  при независимой работе регулятора можно выразить в следующем виде:

$$W_1 = W_{ПИ} W_{П} W_{Gr} W_{TK} W_{CT}. \quad (10)$$

Аналогично получаем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования  $n_{CT}$  при работе последовательно с регулятором  $n_{TK}$ :

$$W_2 = W_1 W_4, \quad (11)$$

где 
$$W_4 = \frac{1}{1 + W_{П} W_{Gr} W_{TK}}. \quad (12)$$

На рис. 1 и 2 приведены логарифмические амплитудно-частотные характеристики ЛАЧХ и фазо-частотные характеристики ЛФЧХ разомкнутого контура регулирования  $n_{CT}$  САУ ВСУ для рассматриваемых вариантов независимого включения регулятора  $n_{CT}$  (индекс 1) и последовательно с регулятором  $n_{TK}$  (индекс 2). На рис. 1 рассмотрен случай одинаковых значений составляющих закона регулирования в обоих рассматриваемых вариантах. Как следует из рисунка, в области высоких частот ЛЧХ

практически совпадают, а в области низких частот введение дополнительной внутренней обратной связи по  $n_{TK}$  приводит к значительному снижению амплитудной характеристики при соответствующем уменьшении фазового запаздывания. Анализ частотной передаточной функции  $W_4$  позволяет сделать вывод о необходимости значительного увеличения интегральной составляющей закона регулирования  $n_{CT}$  при введении дополнительной обратной связи для обеспечения близости ЛЧХ с вариантом без дополнительной обратной связи. При реализации этого ЛЧХ для обоих вариантов практически полностью совпадают во всей области частот (рис. 2).

Таким образом, включение регулятора  $n_{CT}$  последовательно с регулятором  $n_{TK}$ , позволяя существенно улучшить структуру алгоритма управления, не влечет за собой ухудшение достижимых динамических характеристик САУ ВСУ. Рассмотренное включение регуляторов  $n_{TK}$  и  $n_{CT}$  реализовано в САУ ВСУ АИ-450-МС.

## Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов и др. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
2. Орлова Г.Г. Системы регулирования, агрегаты и датчики для авиационных ГТД (Обзор фирменных материалов с выставок, состоявшихся в 1980 г.). – М.: ЦИАМ, 1982. – 107 с.
3. Павлюк Е.В. Адаптивное управление положением дозирующего элемента насоса-дозатора с приводом от электромеханического преобразователя в условиях изменения модуля сухого трения // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2003. – Вып. 6 (41). – С. 111 – 114.

Поступила в редакцию 1.06.2004

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, ИПМаш НАН Украины, Харьков.