

УДК 621.452.3

Е.В. ПАВЛЮК¹, С.В.ЕПИФАНОВ², С.И.СУХОВЕЙ²¹ГП «Харьковское агрегатное конструкторское бюро», Украина²Национальный 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;

α – 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:

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

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 $W_0 = W_3 W_{ПД} W_{дт}$.

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.

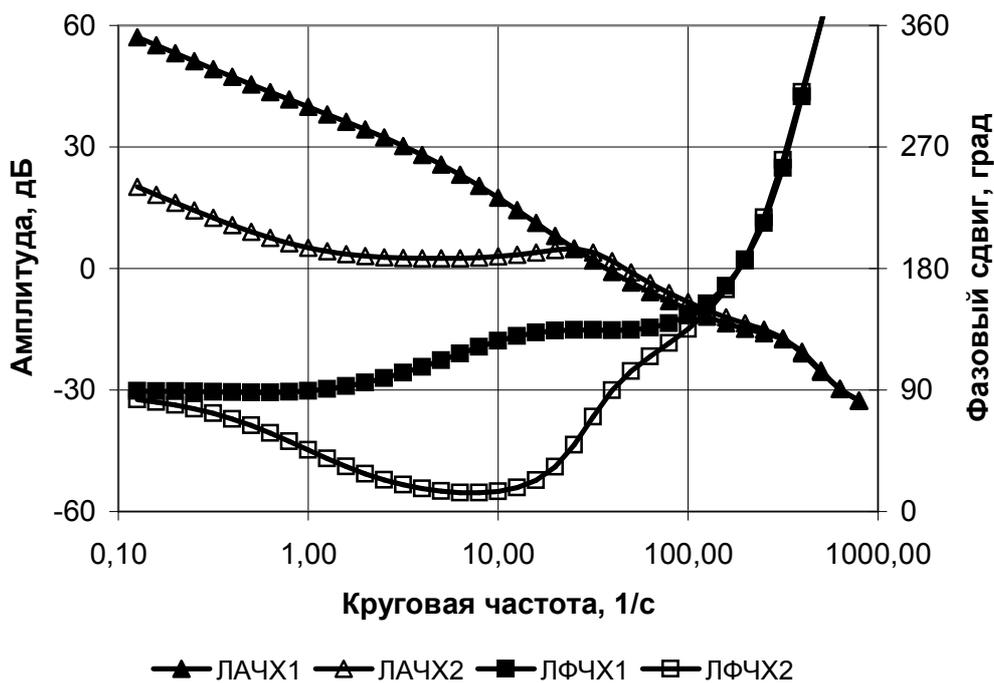


Рис. 1. ЛЧХ для различных вариантов формирования контура $n_{ст}$ при одинаковых значениях составляющих закона регулирования

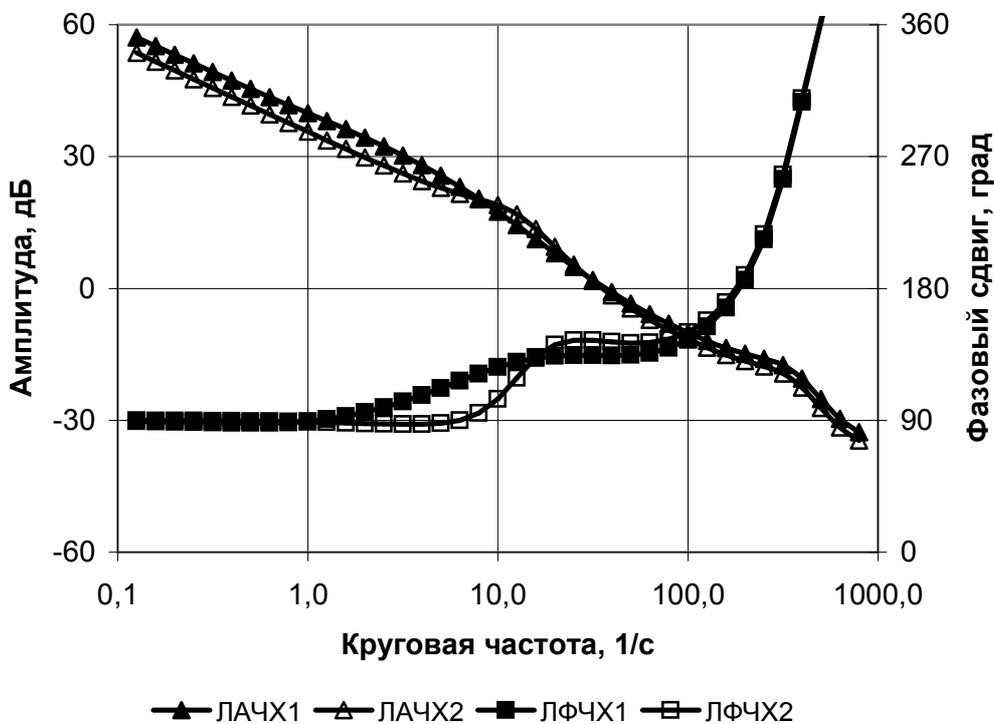


Рис. 3. ЛЧХ для различных вариантов формирования контура $n_{ст}$ при рациональном выборе значений составляющих закона регулирования

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} .

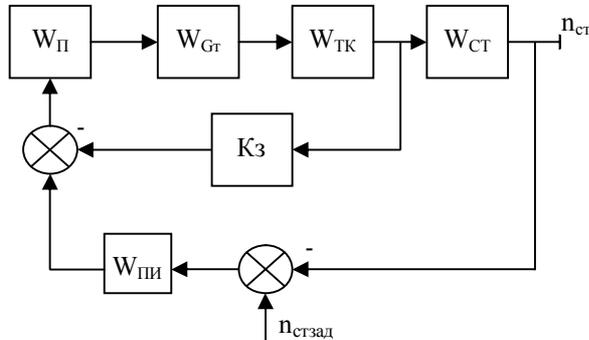


Рис. 3. Структурная схема контура n_{CT}

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.