

## ДИНАМИКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ВОДОРОДНОГО ГТД НК-88

© 2016 В.А. Букин<sup>1</sup>, А.Г. Гимадиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Кузнецов», Самара

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 20.10.2016

Представлена линеаризованная модель контура автоматического регулирования частоты вращения турбокомпрессорного агрегата водородного ГТД НК-88, созданного в 1980-ые годы. Наличие в системе топливопитания и регулирования двигателя НК-88 теплообменника-газификатора приводит к появлению значительного запаздывания, являющегося основным фактором, определяющим конфигурацию системы. Турбокомпрессорный агрегат также имеет инерционность, влияние которого необходимо учитывать при выборе структуры и параметров системы. В статье приведено обоснование принципиальных решений, позволивших отдать предпочтение каскадной системе топливопитания и регулирования. Приведены экспериментальные частотные характеристики теплообменника и других звеньев контура регулирования. Предложены мероприятия по компенсации влияния запаздывания теплообменника на устойчивость системы. Приведенный в статье материал может быть использован при разработке систем автоматического регулирования двигателей и энергетических установок, работающих на криогенном топливе.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель на криогенном топливе, каскадная система регулирования, турбокомпрессорный агрегат, теплообменник, испытания, частотные характеристики, запаздывание, анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

Инициатором исследований применимости криогенных топлив для авиации был академик РАН Н.Д. Кузнецов, благодаря которому и под его руководством в ПАО «КУЗНЕЦОВ» в 1980-1990 годы были созданы двигатели НК-88 и НК-89, работающие на жидком водороде и сжиженном природном газе. Интерес к газотурбинным двигателям, работающим на криогенных компонентах топлива, не стихает до сих пор [1-6]. Это связано с тем, что в последние годы увеличилось энергопотребление и, прежде всего, углеводородных топлив, сопровождавшееся значительным осложнением земной экологической обстановки. Кроме этого, увеличение потребления углеводородных топлив привело к росту темпов исчерпания не возобновляемых запасов нефти.

При создании двигателей на криогенных топливах возникают проблемы, связанные с выбором принципиальной схемы системы топливопитания и регулирования, способами обеспечения взрыво- и пожаробезопасности, с управлением тепло- и газодинамических процессов, с контролем утечек топлива и многими другими явлениями. Однако при этом наиболее важным является обеспечение динамики многоконтурной системы топливопитания и регулирования двигателя, от которого зависит её устойчивость и качество процессов управления.

*Букин Валерий Афанасьевич, ведущий инженер.  
Гимадиев Асгат Гатьятович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок. E-mail: gimadiev\_ag@mail.ru*

Структура созданной системы топливопитания и регулирования авиационного ГТД НК-88, использующего в качестве топлива жидкий водород, обусловлена следующими её особенностями:

- перед подачей в камеру сгорания жидкий водород газифицируется в теплообменнике (ТО), установленном за турбиной;

- для подачи жидкого водорода используется турбокомпрессорный агрегат (ТНА) с центробежным насосом и приводом турбины воздухом, отбираемым из-за компрессора двигателя.

Особенностям систем топливопитания и регулирования авиационных газотурбинных двигателей на криогенном топливе посвящена работа [7], в которой приведены математические модели узлов систем автоматического регулирования (САР), экспериментальные переходные характеристики, сопровождающиеся автоколебательными процессами. Однако в этой работе не полностью вскрыт механизм возникновения неустойчивости систем, что обусловлено сложностью взаимодействия звеньев и имеющимися динамическими контурами.

Наличие в системе регулирования теплообменника-газификатора приводит к появлению значительного запаздывания, зависящего как от расхода или режима работы двигателя и теплофизических свойств водорода, так и от параметров теплообменника (поверхности нагрева, внутреннего объёма). Запаздывание при газификации водорода в теплообменнике является основным фактором, определяющим конфигурацию системы регулирования. ТНА также имеет инерционность, влияние которой

необходимо учитывать при выборе параметров системы.

В практике эксплуатации сложных САР, в том числе с запаздывающими звеньями, каким является теплообменник-газификатор жидкого водорода, зачастую приходится прибегать к каскадному регулированию, когда вводится внутренний контур со статическим регулятором, управляемым внешним, основным контуром [8, 9]. Введение внутреннего контура с дополнительным регулированием значительно улучшает качество переходных процессов.

С другой стороны, многофакторность параметров ТНА (частоты вращения, напорной характеристики насоса) и влияние теплообменника-газификатора на динамические свойства насоса, можно использовать для снижения эффекта запаздывания самого теплообменника.

Цель настоящей статьи – кратко обосновать принципиальные решения, позволившие отдать предпочтение каскадной системе топливопитания и регулирования, при этом основное внимание уделить динамике внутреннего контура регулирования частоты вращения ТНА, которая является ключевой в исследуемой системе.

### ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТОПЛИВО-РЕГУЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Как известно, одноконтурные САР являются предельно простыми, но при значительной инерционности объекта или объектов регулирования (в нашем случае имеется три объекта – ГТД, ТНА и ТО), возможности таких систем по обеспечению устойчивости и быстродействия ограничены, так как единственным способом повышения качества регулирования является введение производной в закон регулирования [8].

Для повышения качества регулирования сложных систем, в том числе с запаздыванием, применяют каскадные системы со стабилизирующим статическим регулятором дополнительной

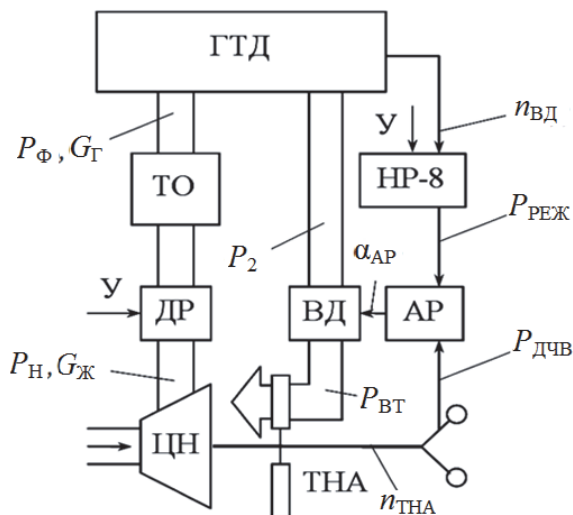


Рис. 1. Функциональная схема САР двигателя НК-88

регулируемой величины во внутреннем контуре. Введение контроля над таким дополнительным регулируемым параметром может значительно улучшить качество переходного процесса в САР [9].

Каскадная САР разработана для водородного ГТД НК-88 (рис. 1). Основной контур, как и у базового ГТД НК-8-2У, управляется регулятором НР-8 по частоте вращения ротора ВД  $n_{ВД}$ , а внутренний топливоподающий контур – по частоте вращения ротора ТНА  $n_{ТНА}$ . Принципиальное решение по топливо-регулирующей системе газотурбинного двигателя НК-88 заключается в том, что управление топливной системой осуществляется контуром регулирования частоты вращения ТНА без непосредственного регулирования расхода водорода [10].

Введение такого внутреннего контура регулирования исключает измерение и использование каких-либо параметров водорода в управлении, а срывные явления в насосе не нарушают нормальную работу САР и не препятствуют восстановлению работы насоса после его срыва. Эти два фактора повышают функциональную надёжность топливо-регулирующей системы, что и подтвердилось при испытаниях двигателя НК-88, в том числе лётных в составе экспериментального самолёта ТУ-155.

В САР ГТД (см. рис. 1) внутренний контур регулирования ТНА включает в себя систему подачи водорода, состоящую из центробежного насоса ЦН, жидкостного дросселя ДР, теплообменника ТО, форсунок камеры сгорания и автоматического регулятора АР частоты вращения ротора ТНА, управляющего воздушным дросселем ВД.

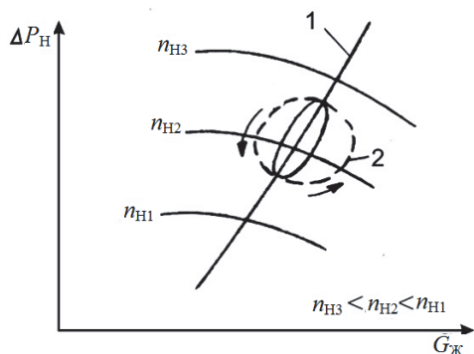
Главные закономерности, определяющие динамику такой системы – взаимосвязь расхода жидкого водорода  $G_{Ж}$ , газифицированного его расхода  $G_T$  и регулируемой величины – частоты вращения ротора ТНА  $n_{ТНА}$ .

Зависимость  $n_{ТНА}$  от давления воздуха перед турбиной  $P_{ВТ}$  характеризует динамику ротора ТНА, а зависимость  $G_T$  от  $P_{ВТ}$  – динамику системы подачи топлива. Зависимость  $G_T$  от управляющего воздействия регулятора основного контура в виде изменения давления  $P_{РЕЖ}$  характеризует динамику всего внутреннего контура.

Определение в динамике влияния расхода жидкого водорода  $G_{Ж}$  на выходе из ЦН от  $n_{ТНА}$  дает возможность оценить важное свойство системы подачи – динамическое форсирование насоса (рис. 2).

В случае «жесткой» сети, когда характеристика сети не регулируется и не изменяется во время переходных процессов, расход топлива на выходе из насоса полностью определяется частотой вращения его ротора. Такой сетью для насоса является жидкостный дроссель ДР с постоянным давлением за ним.

При отставаниях по времени давления от расхода в сети, каковой является сеть с теплообмен-



**Рис. 2.** Изменение давления на выходе ТНА  $\Delta P_H$  от расхода жидкого водорода  $G_{Ж}$  при периодических колебаниях частоты вращения ротора насоса  $n_H$ :  
1 – статическая характеристика топливной магистрали (сети);  
2 – изменение  $G_{Ж}$  и  $P_H$  в динамике

ником-газификатором, механизм взаимодействия приобретает новое качество. Отсутствие регулируемых дросселей в системе позволяет проявить это качество в «чистом» виде. На характеристике насоса (см. рис. 2) в координатах  $\Delta P_H - G_{Ж}$  при различных частотах вращения ротора ТНА  $n_H$  ( $n_{ТНА}$ ) нанесена статическая характеристика сети и траектории изменения расхода  $G_{Ж}$  при периодических колебаниях  $n_{ТНА}$  определенной частоты. Если предположить, что перепад давления на форсунках камеры сгорания сверхкритический, то характеристика сети в основном определяется давлением перед форсунками или газифицированным расходом теплообменника. За счёт временных отставаний при преобразовании жидкого криогенного топлива в газообразное при колебаниях  $n_{ТНА}$  происходит следующее. При увеличении частоты вращения  $n_{ТНА}$  и жидкостного расхода  $G_{Ж}$  давление в сети отстает. Вследствие этого происходит отклонение линии сети в область больших расходов, т.е. жидкостный расход оказывается больше, по сравнению с расходом жидкого водорода на установившемся режиме. При уменьшении  $n_{ТНА}$  расход топлива будет меньше, чем по статической характеристике.

Таким образом, происходит как бы «форсирование» насоса по расходу топлива. Следовательно, схема регулирования, в которой имеется влияние сети на насос, может обладать весьма важным свойством - автоматически регулируемой частичной компенсации запаздывающих свойств теплообменника-газификатора.

### ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТНА

Предлагаемая линеаризованная модель контура регулирования частоты вращения ротора ТНА отражает закономерности динамического взаимодействия звеньев в САР. В этой модели теплообменник-газификатор ТО представлен

последовательным соединением четырех апериодических звеньев, причем три звена из них имеют одинаковые постоянные времени:

$$W_{ТО}(s) = \frac{\Delta \tilde{G}_Г}{\Delta \tilde{G}_Ж} = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^3}, \quad (1)$$

где  $\Delta \tilde{G}_Г$ ,  $\Delta \tilde{G}_Ж$  – изображения по Лапласу приращений расхода газообразного и жидкого водорода. Такая модель ТО определена по результатам аппроксимации экспериментальных частотных характеристик [11].

Остальные звенья представлены следующим образом.

Ротор ТНА, как инерционное звено, описывается передаточной функцией

$$W_{ТНА}(s) = \frac{\Delta \tilde{n}_{ТНА}}{\Delta \tilde{M}} = \frac{k_{ТНА}}{s}, \quad (2)$$

где  $\Delta \tilde{n}_{ТНА}$ ,  $\Delta \tilde{M}$  – приращения изображений по Лапласу частоты вращения и избыточного момента на роторе ТНА;  $k_{ТНА} = 1/J_{ТНА}$  коэффициент передачи ТНА;  $J_{ТНА}$  – приведённый момент инерции ротора ТНА.

Передаточная функция статического регулятора частоты вращения ТНА имеет вид:

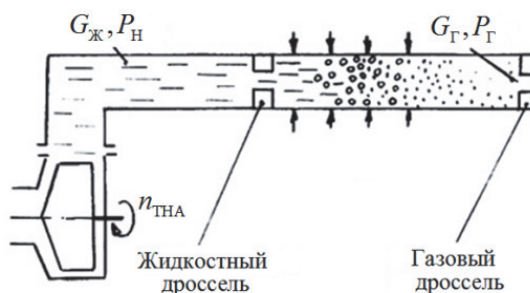
$$W_{рег}(s) = \frac{\Delta \tilde{P}_{ВТ}}{\Delta \tilde{P}_{АР}} = \frac{k_{рег}}{T_{рег} s + 1}, \quad (3)$$

где  $\Delta \tilde{P}_{ВТ}$ ,  $\Delta \tilde{P}_{АР} = \Delta \tilde{P}_{РЕЖ} - \Delta \tilde{P}_{ДЧВ}$  – приращения изображений по Лапласу давления воздуха на входе в турбину и разницы в перепадах давления задатчика  $\Delta \tilde{P}_{РЕЖ}$  и на выходе из датчика частоты вращения ДЧВ  $\Delta \tilde{P}_{ДЧВ}$ ;  $k_{рег}$ ,  $T_{рег}$  – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора.

При определении коэффициентов в представленной модели САР принято допущение о том, что сопротивление криогенной топливной магистрали представлено двумя сосредоточенными дросселями - в жидкостной и газообразной магистралях.

На рис. 3 представлена схема системы подачи топлива, а на рис. 4 – структурная схема системы регулирования  $n_{ТНА}$  с контуром подачи топлива.

Особенностью модели САР, представленной на рис. 4 в виде структурной схемы, является



**Рис. 3.** Схема системы подачи топлива в двигатель

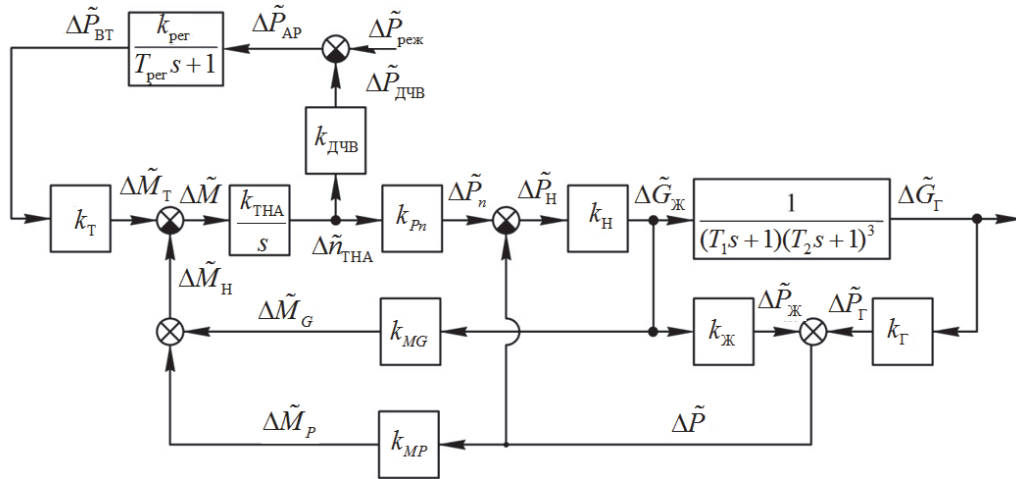


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования ТНА

наличие отрицательных обратных связей, характеризующих влияние жидкостного и газового дросселей на расход топлива на выходе из насоса, а также давления и расхода топлива за насосом на нагрузку ротора ТНА.

Коэффициенты передачи звеньев в структурной схеме САР записываются в следующем виде:  $k_{Ж} = \Delta P_{Ж} / \Delta G_{Ж}$  – коэффициент передачи жидкостного сопротивления;  $\Delta P_{Ж} = \Delta P_{Н} - \Delta P_{Г}$ ;  $k_{Г} = \Delta P_{Г} / \Delta G_{Г}$  – коэффициент передачи газовой магистрали;  $k_{Н} = -\Delta G_{Ж} / \Delta G_{Н}$  – коэффициент передачи насоса по давлению при  $n_{ТНА} = const$ , определяющий наклон характеристики ТНА (в зависимости от наклона характеристики насоса может принимать положительное или отрицательное значения);  $k_{Pn} = \Delta P_{Н} / n_{ТНА}$  – коэффициент передачи насоса по частоте вращения его ротора при  $G_{Ж} = const$ ;  $k_{МГ} = \Delta M_{Г} / \Delta G_{Ж}$  – коэффициент нагрузки насоса по расходу топлива;  $k_{МР} = \Delta M_{Р} / \Delta P_{Н}$  – коэффициент нагрузки насоса по давлению;  $k_{ДЧВ} = \Delta P_{ДЧВ} / \Delta n_{ТНА}$  – коэффициент передачи датчика частоты вращения ТНА;  $k_{Т} = \Delta M_{Т} / \Delta P_{ВТ}$  – коэффициент передачи турбины.

На основании представленной структурной схемы составлены передаточные функции для упомянутых выше характерных зависимостей между звеньями САР.

Передаточная функция  $W_{Н}(s) = \Delta G_{Ж} / \Delta \tilde{n}_{ТНА}$ , характеризующая зависимость расхода водорода на выходе из насоса от частоты вращения его ротора в соответствии с представленной на рис. 4 структурной схемой, имеет следующий вид:

$$W_{Н}(s) = \frac{k_1 \left[ T_1 T_2^3 s^4 + T_2^2 (3T_1 + T_2) s^3 + 3T_2 (T_1 + T_2) s^2 + (T_1 + 3T_2) s + 1 \right]}{\left[ \alpha_{01} s^4 + \alpha_{11} s^3 + \alpha_{21} s^2 + \alpha_{31} s + 1 \right]}, \quad (4)$$

где

$$k_1 = \frac{k_{Pn} k_{Н}}{1 + k_{Н} (k_{Г} + k_{Ж})},$$

$$\alpha_{01} = \frac{1 + k_{Н} k_{Ж}}{1 + k_{Н} (k_{Г} + k_{Ж})},$$

$$\alpha_{11} = \frac{T_2^2 (1 + k_{Н} k_{Ж}) (3T_1 + T_2)}{1 + k_{Н} (k_{Г} + k_{Ж})},$$

$$\alpha_{21} = \frac{3T_2 (1 + k_{Н} k_{Ж}) (T_1 + T_2)}{1 + k_{Н} (k_{Г} + k_{Ж})},$$

$$\alpha_{31} = \frac{(1 + k_{Н} k_{Ж}) (T_1 + 3T_2)}{1 + k_{Н} (k_{Г} + k_{Ж})}.$$

Передаточная функция (4) является форсирующей за счет того, что коэффициенты уравнения знаменателя меньше соответствующих коэффициентов числителя на величину

$$(1 + k_{Н} k_{Ж}) / [1 + k_{Н} (k_{Г} + k_{Ж})],$$

которая всегда меньше единицы, независимо от знака  $k_{Н}$ .

При уменьшении сопротивления жидкостного дросселя ( $k_{Ж}$  уменьшается) и наклона характеристики насоса (при положительном  $k_{Н}$ ), увеличении сопротивления газовой магистрали ( $k_{Г}$  увеличивается) повышается форсирующее свойство топливного насоса.

Передаточная функция ротора ТНА по частоте вращения  $W_{ТНА}(s) = \Delta \tilde{n}_{ТНА} / \Delta \tilde{P}_{ВТ}$  имеет вид:

$$W_{ТНА}(s) = \frac{k_2 (T_s + 1) (T_2 s + 1)^3}{\left[ \alpha_{02} s^5 + \alpha_{12} s^4 + \alpha_{22} s^3 + \alpha_{32} s^2 + \alpha_{42} s + 1 \right]}, \quad (5)$$

где

$$k_1 = \frac{k_{МР}}{k_{Н} k_{Pn} [k_{МГ} + k_{МР} (k_{Г} + k_{Ж})]};$$

$$\alpha_{02} = \frac{T_1 T_2^3 (1 + k_H k_{Ж})}{k_H k_{ТНА} k_{Pn} [k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})]};$$

$$k_4 = \frac{1}{k_{ДЧВ}};$$

$$\alpha_{12} = \frac{T_2^2 \left[ k_H k_{ТНА} k_{Pn} (k_{MG} + k_{MP} k_{Ж}) \right]}{k_H k_{ТНА} k_{Pn} [k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})]};$$

$$\alpha_{04} = \frac{T_{пер} \alpha_{02}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}};$$

$$\alpha_{22} = \frac{T_2 \left[ k_H k_{ТНА} k_{Pn} \left( \frac{k_{MG} + k_{MP} k_{Ж}}{k_{MP} k_{Ж}} \right) (3T_1 + T_2) \right]}{k_H k_{ТНА} k_{Pn} [k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})]};$$

$$\alpha_{14} = \frac{\alpha_{02} + T_{пер} \alpha_{12}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}};$$

$$\alpha_{24} = \frac{\alpha_{12} + T_{пер} \alpha_{22}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}} + T_1 T_2^3;$$

$$\alpha_{32} = \frac{3T_2 \left[ k_H k_{ТНА} k_{Pn} \left( \frac{k_{MG} + k_{MP} k_{Ж}}{k_{MP} k_{Ж}} \right) (T_1 + T_2) \right]}{k_H k_{ТНА} k_{Pn} [k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})]};$$

$$\alpha_{34} = \frac{\alpha_{22} + T_{пер} \alpha_{32}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}} + T_2^2 (3T_1 + T_2);$$

$$\alpha_{44} = \frac{\alpha_{32} + T_{пер} \alpha_{42}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}} + 3T_2 (T_1 + T_2);$$

$$\alpha_{42} = \frac{\left[ k_H k_{ТНА} k_{Pn} (k_{MG} + k_{MP} k_{Ж}) (T_1 + 3T_2) \right]}{k_H k_{ТНА} k_{Pn} [k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})]}.$$

$$\alpha_{54} = \frac{\alpha_{42} + T_{пер} \alpha_{52}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}} + T_1 + 3T_2;$$

Передаточная функция замкнутой системы подачи газообразного водорода  $W_{СПТ}(s) = \Delta \tilde{G}_{Г} / \Delta \tilde{P}_{ВТ}$  имеет вид:

$$W_{СПТ}(s) = \frac{k_3}{\left[ \begin{matrix} \alpha_{02} s^5 + \alpha_{12} s^4 + \alpha_{22} s^3 + \\ \alpha_{32} s^2 + \alpha_{42} s + 1 \end{matrix} \right]}, \quad (6)$$

где

$$k_3 = \frac{k_{Г}}{k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})}.$$

В случае, когда  $T_1$  и  $T_2$  равны нулю или частотный диапазон работы системы подачи топлива (СПТ) позволяет принять эти постоянные времени равными нулю, то передаточные функции ротора ТНА и системы подачи принимают вид апериодического звена с одинаковой постоянной времени:

$$W_{ТНА}(s) = W_{СПТ}(s) = \frac{k_2}{T_{ТНА} s + 1}, \quad (7)$$

где

$$T_{ТНА} = \frac{1 + k_H (k_{Г} + k_{Ж})}{k_H k_{ТНА} k_{Pn} [k_{MG} + k_{MP} (k_{Г} + k_{Ж})]}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования по частоте вращения ротора ТНА  $W_{зам}^{(n)}(s) = \Delta \tilde{n}_{ТНА} / \Delta \tilde{P}_{рег}$  имеет вид:

$$W_{зам}^{(n)}(s) = \frac{k_4 (T_1 s + 1) (T_1 s + 1)}{\left[ \begin{matrix} \alpha_{04} s^6 + \alpha_{14} s^5 + \alpha_{24} s^4 + \\ \alpha_{34} s^3 + \alpha_{44} s^2 + \alpha_{54} s + \alpha_{64} \end{matrix} \right]}, \quad (8)$$

где

$$\alpha_{54} = \frac{\alpha_{52}}{k_3 k_{рег} k_{ДЧВ}} + 1.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования по каналу газифицированного расхода  $W_{зам}^{(G)}(s) = \Delta \tilde{G}_{Г} / \Delta \tilde{P}_{рег}$  равна:

$$W_{зам}^{(G)}(s) = \frac{k_5 (T_1 s + 1) (T_2 s + 1)^3}{\left[ \begin{matrix} \alpha_{01} s^4 + \alpha_{11} s^3 + \\ \alpha_{21} s^2 + \alpha_{31} s + 1 \\ \alpha_{04} s^6 + \alpha_{14} s^5 + \\ \alpha_{24} s^4 + \\ \alpha_{34} s^3 + \alpha_{44} s^2 + \\ \alpha_{54} s + \alpha_{64} \end{matrix} \right]}, \quad (9)$$

где

$$k_5 = \frac{k_{Pn}}{k_{ДЧВ} [1 + k_H (k_{Г} + k_{Ж})]}.$$

Для выражения (9), представляющего собой результирующую передаточную функцию системы, как и для функций (3) и (8), характерно наличие форсирующих звеньев, приводящих к уменьшению отрицательного влияния теплообменника.

### АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТНА

На рис. 5 приведены напорные характеристики центробежного криогенного ТНА с характеристикой сети при различных подогревах водорода и границей кавитационной устойчивости. Особенность характеристик заключается в пологих,

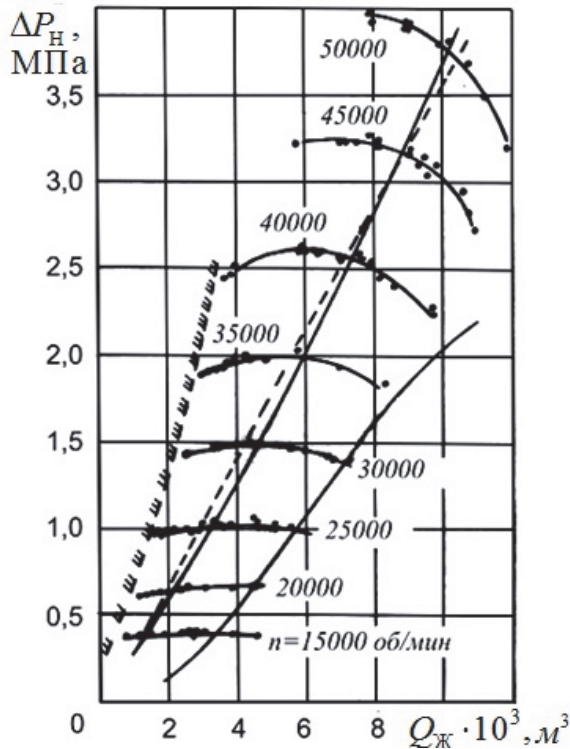


Рис. 5. Напорные характеристики центробежного ТНА

практически горизонтальных характеристиках на низких режимах, что является фактором, способствующим снижению динамической устойчивости системы подачи топлива [12].

На рис. 6 приведена экспериментальная логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАФЧХ) теплообменника (диаметр трубок  $25 \cdot 10^{-3}$  м, объём  $6,1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>, площадь обогрева  $0,97$  м<sup>2</sup>), которая аппроксимирована передаточной функцией (см. формулу (1))

$$W_{Т0}(s) = \frac{1}{(0.18s + 1)(0.02s + 1)^3}$$

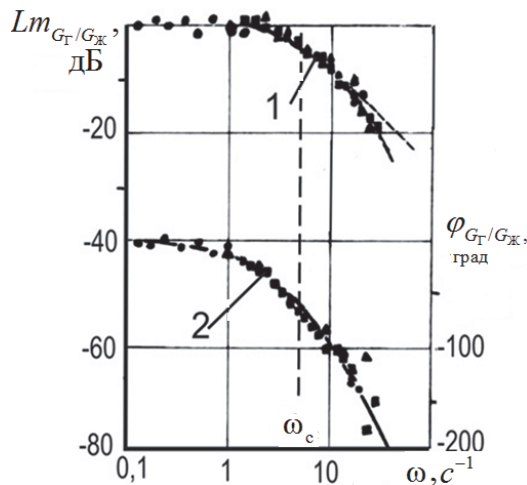


Рис. 6. Экспериментальные логарифмические амплитудно-частотная (1) и фазочастотная (2) характеристики теплообменника (входной параметр  $G_{ж}$ , выходной параметр  $G_T$ ) при  $n_{ВД} = 6650$  об/мин; (сплошные линии – аппроксимация)

Для конкретизации условий работы ТО на ЛАФЧХ указана частота среза основного контура регулирования  $\omega_c$ . На частоте среза  $\omega_c$  основного контура для режима по частоте вращения ротор ВД двигателя  $n_{ВД} = 6650$  об/мин ТО имеет фазовое отставание  $\varphi_{G_T/G_ж}$ , равный минус  $60^\circ$ . Для всех режимов фазовое отставание на частоте среза  $\omega_c$  находится в пределах от минус  $50^\circ$  до минус  $60^\circ$ .

Экспериментальная ЛАФЧХ ротора ТНА на максимальном режиме по каналу  $n_{ТНА}/P_{ВТ}$  приведена на рис. 7.

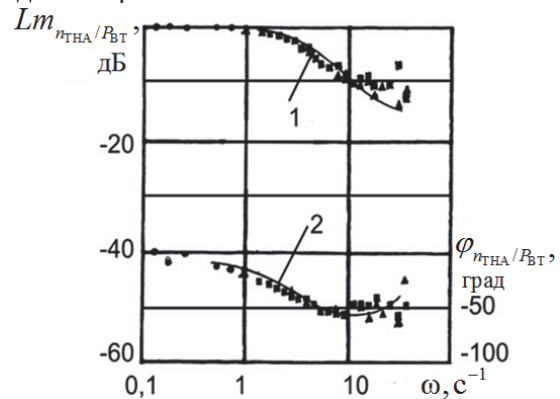


Рис. 7. Экспериментальные логарифмические амплитудно-частотная (1) и фазочастотная (2) характеристики ротора ТНА (входной параметр  $P_{ВТ}$ , выходной параметр  $n_{ТНА}$ ) при  $n_{ТНА} = 6680$  об/мин (сплошные линии – аппроксимация)

Аппроксимирующая передаточная функция ротора ТНА, соответствующая характеристикам, приведенным на рис. 7, представлена в виде  $W_{ТНА}(s) = (T_{ТНА2} + 1)/(T_{ТНА1} + 1)$ .

На рис. 8 представлены зависимости  $T_{ТНА1}$  и  $T_{ТНА2}$  от режима работы двигателя.

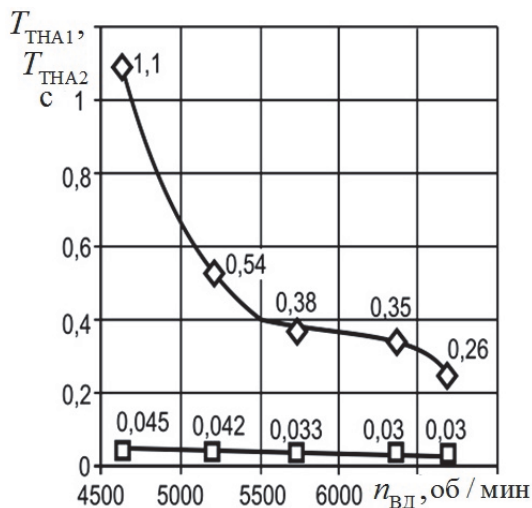
Форсирующие свойства ротора ТНА связаны с влиянием запаздывающего влияния сети насоса, т.е. теплообменника-газификатора.

С увеличением режима работы двигателя инерционность ТНА уменьшается в несколько раз, а относительное влияние форсирования – увеличивается.

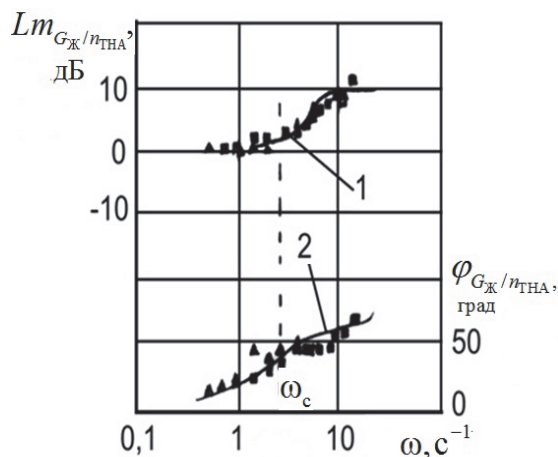
На рис. 9 и рис. 10 приведены характерные экспериментальные ЛАФЧХ звеньев топливо-регулирующей системы двигателя НК-88. На экспериментальные характеристики нанесены расчетные данные, соответствующие группе звеньев, построенных по параметрам структурной схемы контура по частоте вращения ротора ТНА.

Из фазочастотной характеристики насоса (см. рис. 9) ясно, что он обладает форсирующим свойством. Фазовое опережение для представленного режима и частоты среза  $2,82$  с<sup>-1</sup> составляет  $35^\circ$ , а максимальное фазовое опережение достигает  $60^\circ$ .

Необходимо ещё раз обратить внимание на форсирующие свойства внутреннего контура регулирования, не выполняющего прямого регулирования расхода топлива на выходе из насоса.



**Рис. 8.** Экспериментальная зависимость параметров динамических звеньев ТНА от частоты вращения ротора ВД:  
 ◇ -  $T_{ТНА1}$ ; □ -  $T_{ТНА2}$

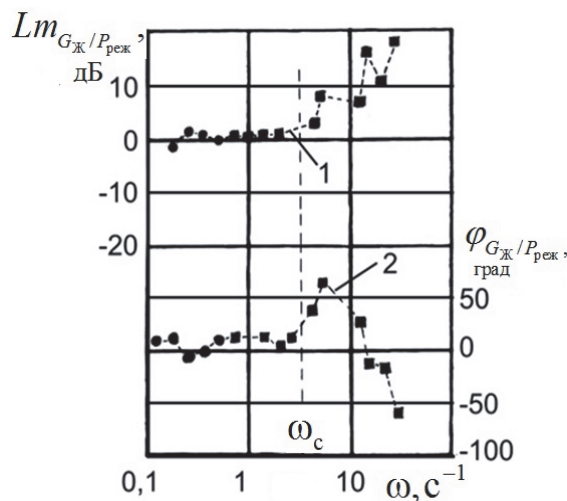


**Рис. 9.** Экспериментальные логарифмические амплитудно-частотная (1) и фазочастотная (2) характеристики насоса ТНА (входной параметр  $n_{ТНА}$ , выходной параметр  $G_{ж}$ ) при частоте вращения ротора ВД двигателя 5700 об/мин

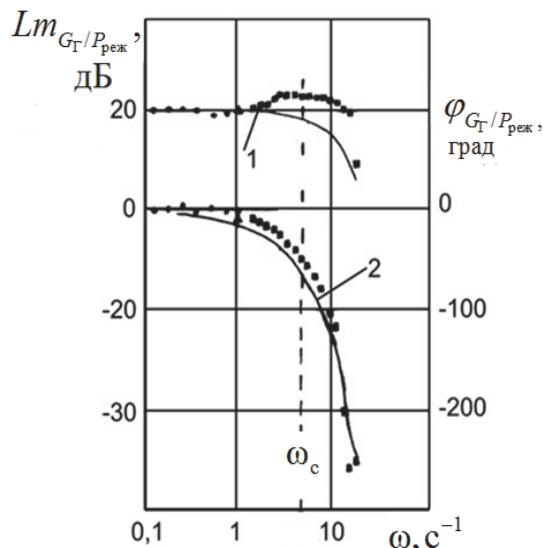
Расход жидкого водорода  $G_{ж}$  опережает по фазе сигнал  $P_{реж}$ , задающий режим работы ТНА (см. рис. 10). На частоте среза  $\omega_c$  опережение составляет  $25^\circ$ , а для всех режимов – в диапазоне  $11^\circ \dots 26^\circ$ .

ЛАФЧХ замкнутой системы внутреннего контура с передаточной функцией  $W_{зам}^{(G)}(s) = \Delta \tilde{G}_Г / \Delta \tilde{P}_{реж}$ , являющейся результирующей характеристикой для номинального режима работы двигателя, представлена на рис. 11.

Благодаря форсирующему свойству насоса по расходу топлива, осуществляется частичная компенсация запаздывания теплообменника-газификатора. На частоте среза основного контура регулирования отрицательный фазовый сдвиг внутреннего контура регулирования ТНА по параметру  $G_{Г}$  относительно  $P_{реж}$  составляет минус  $45^\circ$ . На других, более низких режимах, вплоть до малого газа, фазовое запаздывание находится в



**Рис. 10.** Экспериментальные логарифмические амплитудно-частотная (1) и фазочастотная (2) характеристики соответствующего звена (входной параметр  $G_{ж}$ , выходной параметр  $P_{реж}$ ) при частоте вращения ротора ВД двигателя 6350 об/мин



**Рис. 11.** Экспериментальные логарифмические амплитудно-частотная (1) и фазочастотная (2) характеристики внутреннего контура САР (входной параметр  $P_{реж}$ , выходной параметр  $G_{Г}$ ) при  $n_{ВД} = 6650$  об/мин (сплошные линии – аппроксимация)

пределах от минус  $28^\circ$  до минус  $43^\circ$ .

Дальнейшее повышение быстродействия внутреннего контура достигается уменьшением теплового запаздывания теплообменника за счет уменьшения диаметра трубок и снижения их внутреннего объема.

Так, у теплообменника с диаметром трубок  $3 \cdot 10^{-3}$  м и объемом  $0,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> на частоте среза основного контура  $\omega_c$  отрицательный фазовый сдвиг газообразного расхода относительно жидкостного расхода топлива уменьшается от минус  $50^\circ$  (первый ТО) до минус  $30^\circ$ , что значительно улучшает динамическое качество основного контура.

## ВЫВОДЫ

1. Каскадная схема САР с основным внешним контуром регулирования параметров двигателя и внутренним контуром регулирования частоты вращения ротора ТНА без непосредственного регулирования расхода водорода обеспечила работу двигателя НК-88, в том числе и в процессе лётных испытаний в составе экспериментального самолёта ТУ-155.

2. Аппроксимация экспериментальных частотных характеристик внутреннего контура регулирования частоты вращения ротора ТНА в виде передаточных функций линейных звеньев выявила ряд закономерностей их динамической связи. Контур регулирования частоты вращения ТНА частично компенсирует запаздывание теплообменника-газификатора, что способствует обеспечению устойчивости и приемлемого быстродействия САР во время переходных процессов.

3. Эффективное улучшение качества переходных процессов достигается снижением запаздывания теплообменника за счёт уменьшения диаметра его трубок с соответствующим снижением объёма.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dini Dino*. Hydrogen-fueled engines for low and high supersonic airplanes. Hydrogen Energy Progr. VII: Proc. 7th World Hydrogen Energy Conf. Moscow. 1988. pp. 1855-1885.
2. *Volkhausen R*. Deutsche Airbus. Proc. World Clean Energy Conf.: World Energy Coalit. Glob. Energy Charter, Geneva. Zurich. 1991. pp. 470.
3. *Volkhausen R*. Untersuchungen zur Einfuhrung kryogener Treibstoffe in die zivile Luftfahrt. VDI-BER. 1992. № 912. pp. 171-189.
4. *Contreras S, Yigit K, Ozay and T.N. Veziroglu*. Hydrogen as Aviation Fuel: Comparison With Hydrocarbon Fuels. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 22, No. 10/11, - pp. 1053-1060, 1997.
5. *Kolja Seeckt*. Conceptual Design and Investigation of Hydrogen-Fueled Regional Freighter Aircraft. Licentiate Thesis Stockholm, Sweden 2010. 92 p.
6. Hydrogen powered aircraft: The future of air transport / *Bhupendra Khandelwal, Adam Karakurt, Paulas R. Sekaran, Vishal Sethi, Riti Singh* // Progress in Aerospace Sciences 60 (2013) – pp. 45–59.
7. Особенности систем топливопитания и регулирования авиационных газотурбинных двигателей на криогенном топливе / *В.П. Шорин, С.М. Игначков, Е.В. Шахматов* [и др.]. Самара: СГАУ, 1998. 148 с.
8. *Широкий Д.К., Куриленко О.Д.* Расчёт параметров промышленных систем регулирования. Справочное пособие. Киев: Техніка, 1972. 232 с.
9. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием [пер. с польского]. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
10. *Букин В.А.* Методы инженерного синтеза САР ГТД, работающих на криогенном топливе // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27), часть 2. С. 68-77.
11. *Букин В.А.* Экспериментальные динамические характеристики теплообменников-газификаторов водородного ГТД НК-88 и НК-89 // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, Самара, 5-7 сентября 2012 года: Сборник трудов в 3 томах. Том 2. Самара: Изд. СГАУ, 2012. С. 191-193.
12. *Букин В.А., Гимадиев А.Г.* Анализ устойчивости контура «насос-теплообменник-сеть» криогенной топливной системы ГТД // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, Самара, 5-7 сентября 2012 года: Сборник трудов в 3 томах. Том 2. Самара: Изд. СГАУ, 2012. С. 187-189.

## THE HYDROGEN-FUELED ENGINE NK-88 TURBOPUMP UNIT ROTOR SPEED CONTROL CIRCUIT DYNAMICS

© 2016 V.A. Bukin<sup>1</sup>, A.G. Gimadiev<sup>2</sup><sup>1</sup> PSC «KUZNETSOV»<sup>2</sup> Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

Created in the 1980s hydrogen-fueled engine NK-88 turbopump unit rotor speed automatic control circuit linearized model is presented. The heat exchanger-gasifier system of the NK-88 engine fuel supply and control system leads to a significant lag, which is the main factor determining the system configuration. Turbo-pump unit also has a time lag, the impact of which should be considered when choosing the structure and parameters of the system. The article shows the study of fundamental solutions to select the fuel supply and control cascade system. The experimental frequency characteristics of the heat exchanger and other parts of the control loop presented. The measures to offset the impact of the heat exchanger delay on the stability of the system proposed.

Keywords: hydrogen-fueled turbine engine, cascade control system, turbopump unit, heat exchanger, testing, frequency characteristics, delay, analysis.

---

*Valery Bukin, Leading Engineer.*

*Asgat Gimadiev, Doctor of Technics, Professor at the Automatic Control Systems of Power Plants Department. E-mail: gimadiev\_ag@mail.ru*