

## **МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОГО СИНТЕЗА САР ГТД, РАБОТАЮЩИХ НА КРИОГЕННОМ ТОПЛИВЕ**

© 2011 В. А. Букин

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

В докладе обобщается опыт создания систем автоматического регулирования авиационных и наземных ГТД, работающих на сжиженном водороде (НК-88 на ТУ-155) или сжиженном природном газе (НК-89 на ТУ-155, НК-361 на магистральном газотурбовозе ГТ1-001).

*Газотурбинный двигатель, криогенное топливо, система автоматического регулирования, сжиженный водород, сжиженный природный газ, теплообменник-испаритель, насос, ресивер.*

### **Введение**

В газотурбинных двигателях (ГТД), работающих на криогенным топливе – сжиженном водороде (СВ) или сжиженном природном газе (СПГ), топливо в камеру сгорания (КС) подаётся в газообразном состоянии, а его газификация производится в установленном за турбиной трубчатом теплообменнике-испарителе (ТО).

Характерная особенность систем автоматического регулирования (САР) таких ГТД – близкое или превышающее по влиянию инерционности роторов ГТД запаздывание ТО. Дестабилизирующее влияние запаздывания на устойчивость общеизвестно. Эффект запаздывания может приводить к неустойчивости замкнутой системы с возникновением автоколебаний [1] и даже к потере её работоспособности, а достижение устойчивости зачастую приводит к значительному снижению быстродействия. Создание САР с запаздыванием связано с необходимостью её нейтрализации и, при возможности, уменьшения.

Синтез САР ГТД с обеспечением технических требований можно трактовать как инженерную задачу [2]. Основная цель инженерного синтеза САР ГТД, использующих криогенное топливо - компенсация влияния запаздывания ТО для достижения необходимых запасов устойчивости и быстродействия.

Основными составляющими инженерного синтеза таких САР являются:

- изучение исходных требований и определение вида САР (гидромеханической, электронной или смешанной, необходимость дублирующей САР);

- расчёт или снятие статических и динамических характеристик возможных составляющих частей САР: например, роторов ГТД, ТО, генератора, их сравнительный анализ, а также определение типа насоса и привода;

- анализ вариантов структуры САР при предварительном исследовании взаимодействия ТО, насоса с приводом, объекта регулирования и регуляторов;

- обоснование структуры исходя из относительной инерционности ТО и требований по быстродействию САР;

- техническая реализации САР;

- модельные (на всех этапах синтеза) и натурные динамические исследования,

- разработка методов коррекции исходной структуры и корректирующих устройств (при определении такой необходимости).

Ошибки в выборе структуры САР при игнорировании определяющих факторов могут привести даже к необходимости перехода на другую структурную схему.

Результаты исследования созданных систем позволяют предложить в настоящем докладе классификацию САР ГТД, работающих на криогенном топливе, а также определить область применения каждой системы в зависимости от относительной величины запаздывания ТО и требований по устойчивости и быстродействию.

### **1 Описание создания ряда САР ГТД на криогенном топливе**

#### **1.1 САР НК-88**

В 80-х годах 20 века был создан ГТД НК-88 для работы на СВ с гидромеханической двухконтурной каскадной системой ре-

гулирования и центробежным насосом (ЦН), приводимым от воздушной турбины (рис.1) [3]. Воздух отбирался от компрессора ГТД.

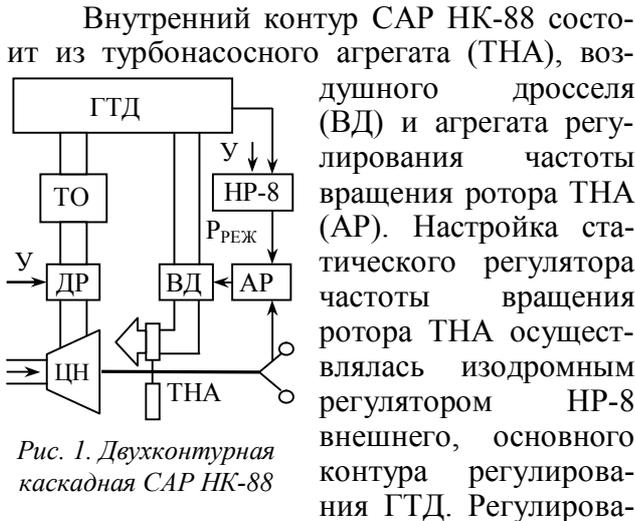


Рис. 1. Двухконтурная каскадная САР НК-88

Внутренний контур САР НК-88 состоит из турбонасосного агрегата (ТНА), воздушного дросселя (ВД) и агрегата регулирования частоты вращения ротора ТНА (АР). Настройка статического регулятора частоты вращения ротора ТНА осуществлялась изодромным регулятором НР-8 внешнего, основного контура регулирования ГТД. Регулирование внутреннего контура по частоте вращения ТНА, а не по расходу топлива, позволило исключить регулятор расхода криогенного топлива и необходимость замеров криогенных параметров в принципиально новой, не изученной системе.

В практике эксплуатации сложных САР, в том числе с запаздывающими звеньями, зачастую приходится прибегать к каскадному регулированию, когда вводится внутренний контур со статическим регулятором, управляемый внешним, основным контуром (ОК) [1, 4, 5]. Введение внутреннего контура с дополнительной регулируемой величиной может значительно улучшить качество переходных процессов [4]. Следует заметить, что корректирующие обратные связи используются для охвата приводов и компенсации инерционности, входящих в этот контур звеньев, что делает их применение часто предпочтительным [2].

Расход водорода определялся частотой вращения ЦН, его характеристикой и сопротивлением топливной магистрали. Положительное качество такой схемы – её функциональная надежность. В случае срыва насоса имелась возможность восстановления работы насоса (рис. 2) и предотвращения остановки двигателя. Это качество было важно для такой пионерной САР.

Топливная система обладала форсирующим свойством – опережением расхода насоса  $Q_{Ж}$  относительно частоты его вращения  $n_{ТНА}$  на величину 60...80% фазового запаздывания ТО. За счёт этого свойства и применения каскадной схемы компенсиру-

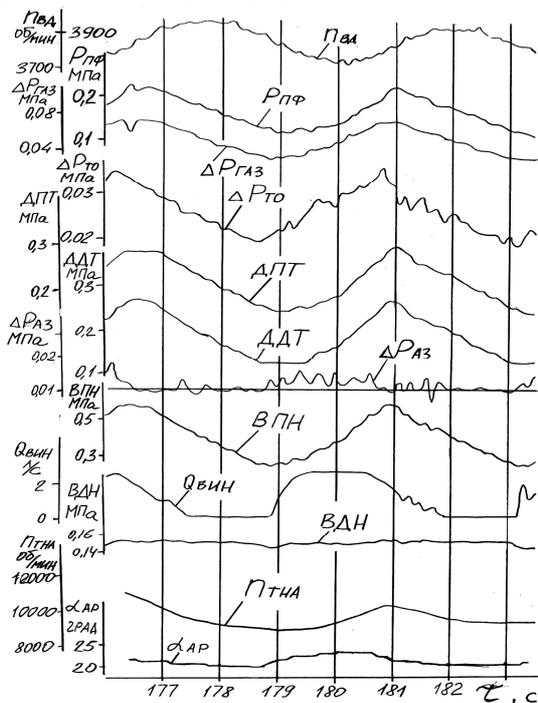


Рис. 2. Срыв и восстановление работы насоса во время автоколебаний ОК на малом газе: НК-88 №6; 1986 г.;  $f = 0,23$  Гц

валось 0,2...0,5 фазового запаздывания ТО относительно задающего воздействия регулятора основного контура Р<sub>РЕЖ</sub>.

На рис. 3 приведена фазовая диаграмма автоколебаний основного контура регулирования, иллюстрирующая свойства СПТ и САР по компенсации запаздывания ТО и инерционности ТНА.

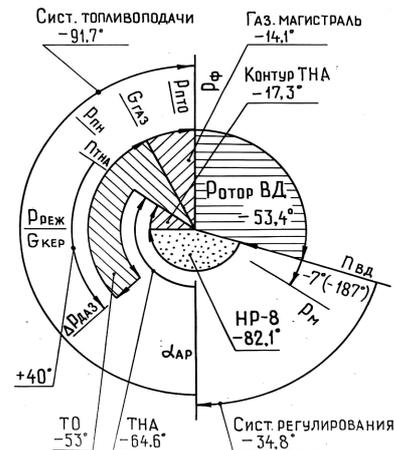


Рис. 3. Фазовая диаграмма автоколебаний ОК на номинальном режиме:  $n_{ВД} = 6600 \pm 57$  об/мин; НК-88 №6; 1986 г.;  $f = 0,532$  Гц

На рис. 4 приведены логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) звена  $W(j\omega) = Q_{Ж}(j\omega)/P_{РЕЖ}(j\omega)$ , подтверждающие форсирующие свойства СПТ по расходу насоса.

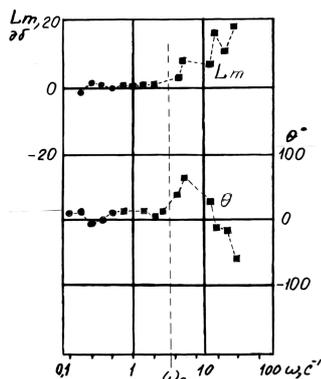


Рис. 4. ЛАФЧХ:  
 $W(j\omega) = Q_{Ж}(j\omega) / P_{РЕЖ}(j\omega)$ ;  
 $n_{ВД} = 6350 \text{ об/мин}$ ;  
 $Q_{Ж} = 5,8 \text{ л/с}$ ; НК-88 №6

С целью устранения имевшихся автоколебаний был разработан гидромеханический ПИД-регулятор. Регулятор использовал расход керосина, дозируемый изодромным регулятором базового двигателя НК-8-2У и сбрасываемый в топливные баки самолёта. Этот расход преобразовывался в давление  $P_{РЕЖ}$  для управления контуром частоты вращения ТНА. На рис. 5 приведена его схема, а на рис. 6 - логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики исходного изодромного и разработанного регуляторов на одном из режимов.

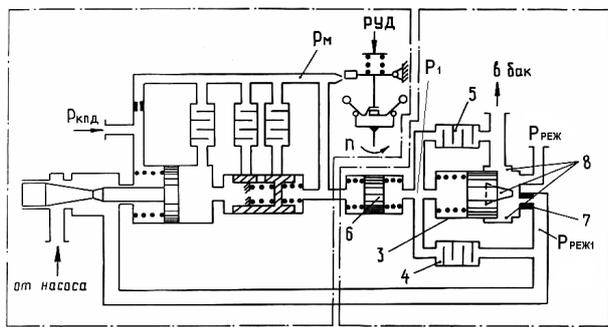


Рис. 5. ПИД-регулятор основного контура:  
 1 – ПИ-регулятор  $n_{ВД}$ ; 2 – задатчик режима ТНА; 3 – клапан; 4, 5 – дроссельные пакеты; 6 – дифференцирующая приставка; 7 – дроссель; 8 – окна клапана 3

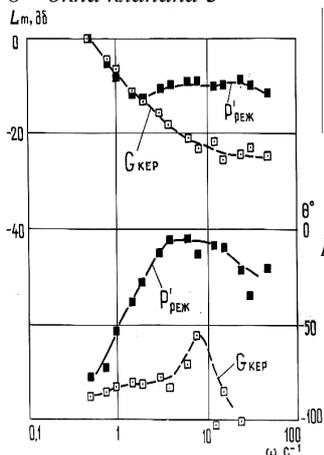


Рис. 6. ЛАФЧХ регуляторов ПИ, ПИД. Номинальный режим:  $A_0 G_{КЕР} = 5800 \text{ кг/ч}$ ; Вход -  $P_M$ ; выход -  $G_{КЕР}$  (ПИ-рег);  $P_{РЕЖ}$  (ПИД-рег)

В процессе работ над НК-88 были изготовлены ТО с различными внутренними диаметрами трубок ( $D_y$ ):

- $D_y = 25 \text{ мм}$  (исходный вариант) с объёмом  $V_{ТО} = 6,1 \dots 8,8 \text{ л}$ ;
- $D_y = 10 \text{ мм}$  ( $V_{ТО} = 1,7 \dots 3,1 \text{ л}$ );
- $D_y = 3 \text{ мм}$  ( $V_{ТО} = 0,8 \text{ л}$ ).

Снижение объёма ТО в 10 раз позволило увеличить частоту при фазовом сдвиге расходов газа и жидкости  $-180^\circ$  примерно в четыре раза, а фазовое отставание на частоте основного контура примерно в 2,5 раза (с  $60$  до  $25^\circ$ ). На рис. 7 приведены ЛАФЧХ двух ТО с  $D_y = 25 \text{ мм}$  и  $D_y = 3 \text{ мм}$  на режиме около  $0,4N$ .

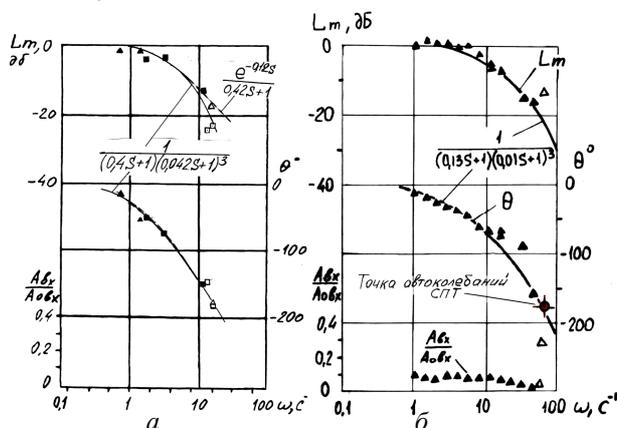


Рис. 7. ЛАФЧХ ТО:  
 вход -  $G_{Ж}$ ; выход -  $G_{Г}$ ;  $0,4N$ ;  $n_{ВД} = 5200 \text{ об/мин}$ ;  
 а -  $D_y = 25 \text{ мм}$ ;  $V_{ТО} = 6,1 \text{ л}$ ;  $f_{-п} = 2,5 \text{ Гц}$ ;  
 б -  $D_y = 3 \text{ мм}$ ;  $V_{ТО} = 0,8 \text{ л}$ ;  $f_{-п} = 10,2 \text{ Гц}$

Проведенные частотные испытания позволили представить ТО в виде передаточной функции

$$W(s) = 1 / (T_{1ТО} s + 1) (T_{2ТО} s + 1)^3$$

и найти область устойчивости СПТ с помощью метода D-разбиения (рис. 8) [6], где  $K = K_H K_G / (1 + K_H K_{Ж})$  – коэффициент передачи разомкнутой СПТ;

$K_H = \Delta m_{Ж} / \Delta P_H$  – коэффициент передачи насоса (со своим знаком);

$K_G = \Delta P_{Ф} / \Delta m_{Г}$  – коэффициент передачи газовой магистрали;

$K_{Ж} = \Delta P_{Ж} / \Delta m_{Ж}$  – коэффициент передачи жидкостной магистрали. Участок АВ линии режимов 1 (рис. 8) соответствует неустойчивой системе на режимах МГ...0,6N с открытым ДР, а линия 1 – устойчивым режимам при  $\Delta P_{Ж} \approx 0,5 \text{ МПа}$ .



Рис. 8. Диаграмма устойчивости контура «насос-ТО-сеть»

При исследованиях выявлена значительная эффективность изменения площади дросселя на динамику СПТ [6] и основного контура САР (рис. 9 и 10). Прикрытие дросселя повышает устойчивость СПТ и основного контура, а снижение сопротивления приводит к неустойчивости СПТ, колебаниям расходов жидкости и газа в противофазе с противотоками расхода жидкости.

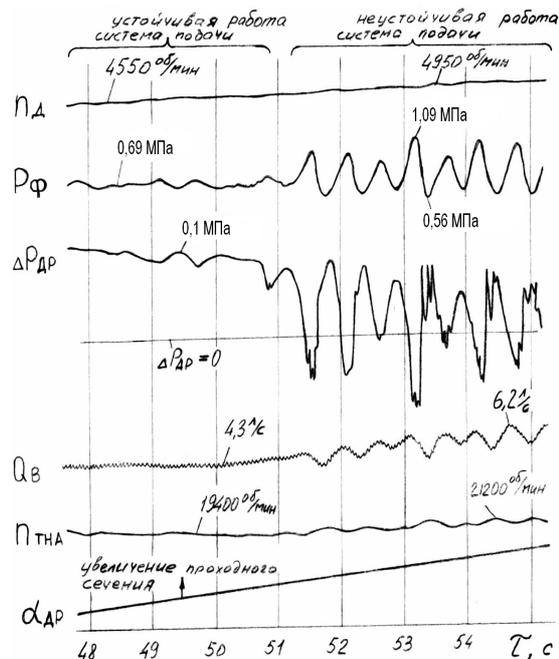


Рис. 9. Изменение параметров СПТ при увеличении проходного сечения дросселя за насосом: НК-88 №7; 1988 г.;  $f_{СПТ} \approx 2$  Гц

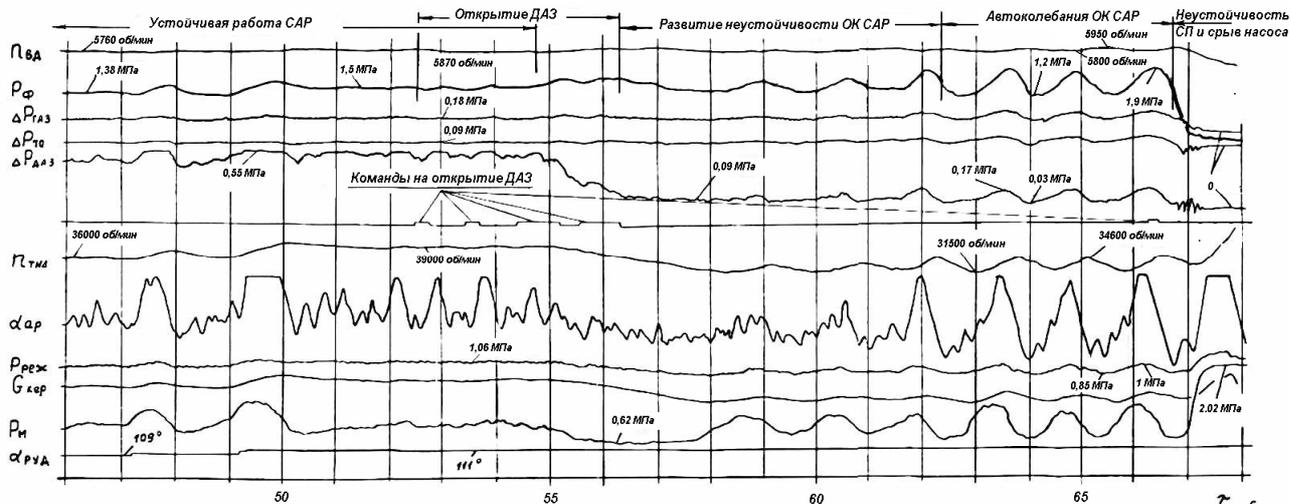


Рис. 10. Открытие дросселя СПТ с возникновением автоколебаний ОК частотой 0,7 Гц и срывом насоса. НК-88 №7; 0,4N; 1987 г.; ПИД-регулятор;  $V_{ТО} = 0,8$  л

Значительное открытие дросселя приводит также к потере устойчивости внешнего контура и появлению автоколебаний (рис. 10). Процессы, зафиксированные на рис. 9 и 10, могут приводить к срыву насоса, как это произошло во время автоколебаний основного контура.

После внедрения ПИД-регулятора, снижения инерционности ТО за счёт уменьшения объёма и использования переменного дросселя (ДР) за насосом получена устойчивая работа контуров с достаточным быстро-

действием (рис. 10, 11) [7], в том числе и в зоне критического давления водорода [6], характерной интенсификацией тепловых процессов и склонностью к неустойчивости.

На рис. 12 приведена экспериментальная ЛАФЧХ разомкнутой САР основного контура с комплексной коррекцией. На этой характеристике запас по фазе равен  $40^\circ$ , а запас по модулю - 12 Дб, что соответствует системам с хорошими показателями качества.

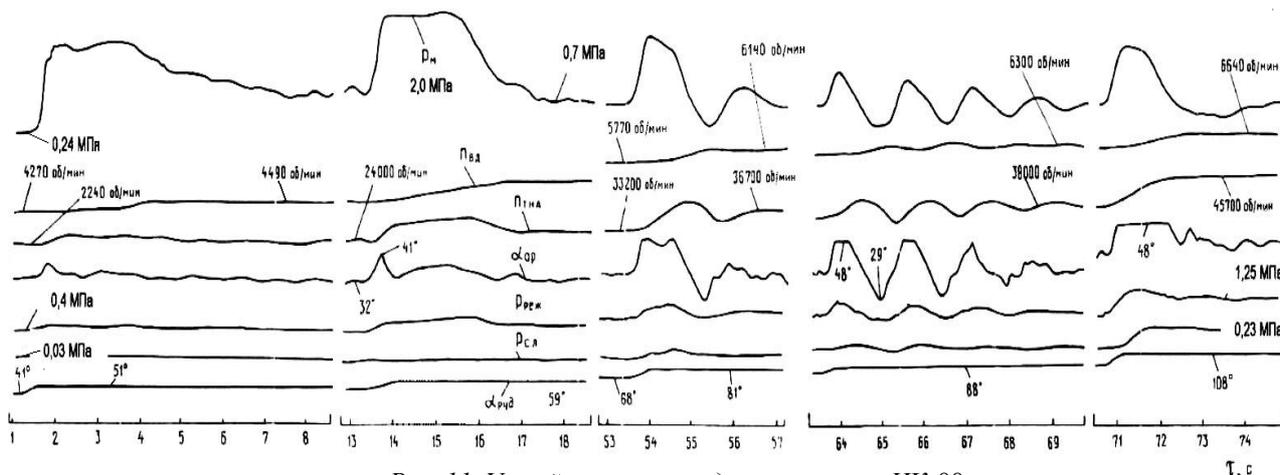


Рис. 11. Устойчивые переходные процессы НК-88 от МГ до номинального режима:  
НК-88 №7; 1988 г; ПИД-регулятор;  $V_{ТО} = 1,7 л$

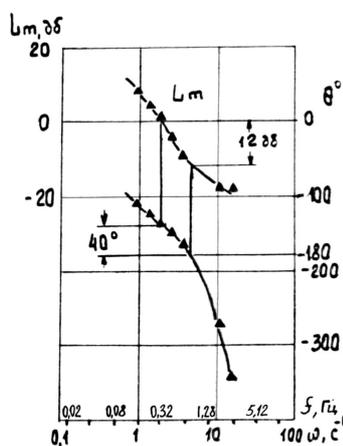


Рис. 12. ЛАФЧХ разомкнутой САР:  
НК-88 №7; ПИД-рег;  
 $V_{ТО} = 1,7 л$ ;  
 $n_{ВД} = 5250 об/мин$ ;  
 $\Delta P_{ДР} = 0,35 МПа$

Для динамических испытаний САР НК-88 был создан автоматизированный комплекс средств частотного исследования с релейным гидравлическим пульсатором возмущений синусоидальной формы на восьми быстродействующих электромагнитных клапанах, воздействующих на давление в маятниковой полости ( $P_M$ ) регулятора внешнего основного контура [8]. Частотный диапазон пульсатора 0...15 Гц является достаточным для исследования систем регулирования ГТД. Точная установка фиксированной частоты возмущений, возможность изменения амплитуды возмущений и частоты с необходимой дискретностью позволяет исследовать даже резонансные явления в системе.

При использовании комплекса были получены частотные характеристики САР НК-88 и составляющих звеньев, представляемые в докладе.

### 1.2 САР НК-89

САР НК-89 (90-е годы) практически аналогична САР НК-88. Существенное отличие работы САР - запаздывание одного и того же ТО при работе на СПГ относительно СВ увеличивается примерно в 4 раза, что негативно сказывается на устойчивости и быстродействии. Причина увеличения запаздывания заключается в увеличении весового расхода СПГ в 2,7 раза при меньших коэффициентах теплоотдачи. Вследствие этого относительная длина экономайзерного и парогенерирующего участков ТО, больше всего влияющих на время запаздывания, увеличивается с 20...25% (СВ) до 75...100% (СПГ).

В подтверждение сказанного на рис. 13 приведена зависимость собственной частоты СПГ (колебания расходов газа и жидкости находятся в противофазе) от режима ГТД для ТО с разными диаметрами трубок  $D_y$  и объемами при работе на СВ и СПГ.

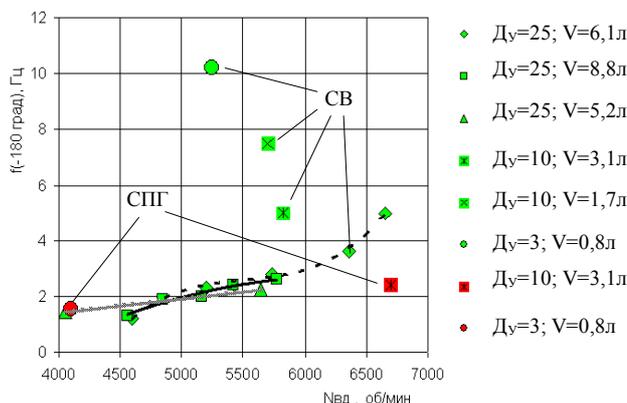


Рис. 13. Зависимость собственной частоты СПГ от режима ГТД с различными ТО на СВ и СПГ

На НК-89 значительно повысилась интенсивность существовавших на НК-88 резонансных явлений во внутреннем контуре, приводящая к автоколебаниям большой амплитуды всех параметров СПТ с частотой 2...3 Гц. Причина этого явления - усугубление неустойчивости течения воздуха в не полностью разгруженном дросселе ВД агрегата регулирования ТНА (АР-88) из-за большого увеличения расхода воздуха через турбину при переходе с СВ на СПТ. ЛАФЧХ агрегата регулирования ТНА АР-88 с ВД, полученные на стенде без подачи воздуха и на двигателе, приведены на рис. 14.

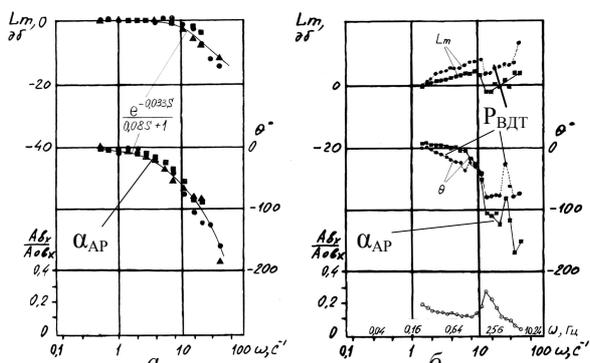


Рис. 14. ЛАФЧХ АР-88 с ВД. Вход  $\Delta P_{AP}$ . а - на стенде без подачи воздуха; б - на НК-89

До прекращения работ над НК-89 динамические проблемы из-за больших запаздываний ТО и резонансных явлений в дросселе АР-88 не были решены, а корректирующие средства не отработаны.

Однако подробно исследованные САР НК-88 и НК-89 позволяют рассмотреть ещё одну коррекцию с целью повышения быстродействия и качества переходных процессов. Коррекция может быть реализована с помощью жесткой обратной связи (ОС), охватывающей всю СПТ. Обратная связь эквивалентна включению в охватываемую им систему форсирующего звена, если в ее цепи установить апериодическое звено. В качестве сигнала обратной связи легко использовать газифицированный расход или практически эквивалентное ему давление перед форсунками  $P_{\Phi}$ . Дополнительное воздействие  $P_{\Phi}$  на регулятор ТНА преобразует каскадную двухконтурную САР в трехконтурную (рис. 15) с настраиваемой глубиной ОС контура  $P_{\Phi}$ .

В переходных процессах модели (рис. 16) коррекция по  $P_{\Phi}$  практически устраняет

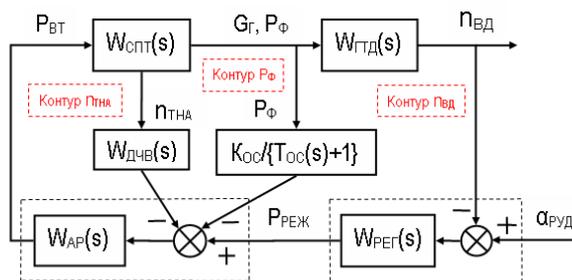


Рис. 15. Структурная схема каскадной трехконтурной САР с коррекцией регулятора ТНА по  $P_{\Phi}$

перерегулирование при сохранении высокого быстродействия.

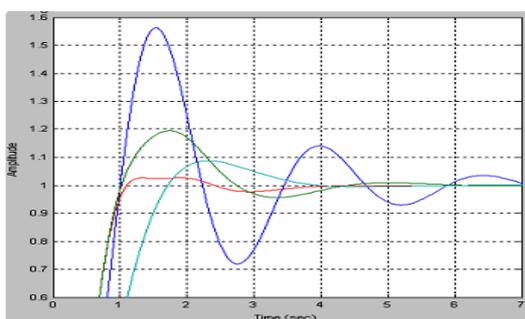


Рис. 16. Переходные процессы модели САР  $n_{ВД} = 6650$  об/мин;  $T_{ГТО} = 0,4$  с;  $T_{ГТО} = 0,04$  с; — ПИ-рег. ( $f=0,4$  Гц); — ПИД-рег. ( $f=0,35$  Гц); — ПИД-рег + корректор  $P_{\Phi}$  ( $f=0,5...0,8$  Гц); — ПИ-рег. ( $K_U=0,5K_{UИСХ}$ )

### 1.3 САР НК-361 с центробежным насосом

На НК-361 (ГТ1-001, 2006...2009 г.) была реализована одноконтурная САР с ЦН и электроприводом ЭД (рис. 17). Аналогичная схема рассматривалась ещё при анализе возможных структурных схем ГТД НК-88. Дросселем (ДЖ) регулировался расход сжиженного газа. На ДЖ регулятором перепада (РП) поддерживался постоянный перепад давлений изменением частоты вращения насоса. Ввиду того, что перед основным теплообменником-газификатором ТО были установлены топливомасляные теплообменники (ТМТ), в которых охлаждалось масло ГТД и генератора, суммарное запаздывание в теплообменниках относительно НК-89 увели-

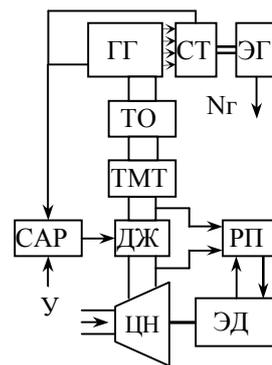


Рис. 17. Одноконтурная САР НК-361

чилось примерно в 10 раз. На рис. 18 представлена зависимость частоты при противофазе расхода газа и сжиженного топлива от мощности генератора и температуры газа перед форсунками - с понижением темпера-

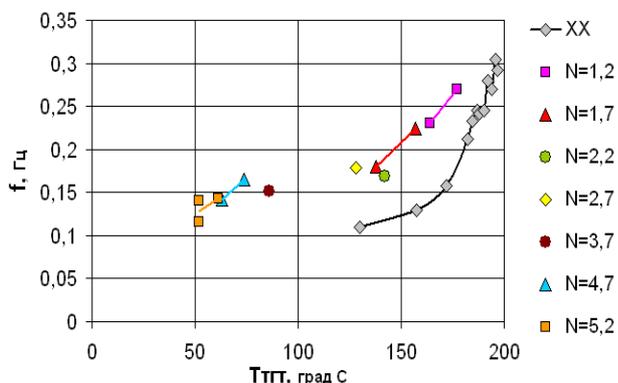


Рис. 18. Зависимость частоты колебания параметров ТО от режима и  $T_{ГТТ}$  при фазовом отставании  $G_{Г}$  от  $G_{Ж}$  в  $180^\circ$

туры от 200 до 50°C частота снижается с 0,3 до 0,1 Гц.

Быстродействие системы на всех режимах оказалось небольшим с тенденцией уменьшения при увеличении мощности, а частота переходных процессов (0,1...0,15 Гц) определялась в основном запаздыванием теплообменников. Переход с регулирования момента генератора на поддержание постоянной мощности генератора, при котором самовыравнивание объекта регулирования (свободной турбины с генератором) отсутствует, приводило к неустойчивости контура регулирования частоты вращения ротора СТ п<sub>СТ</sub> и развитию мощных автоколебаний с амплитудой до 1000 об/мин по п<sub>СТ</sub> (рис. 19).



Рис. 19. Возникновение неустойчивости контура п<sub>СТ</sub> на  $N_{Г}= 4800$  кВт и автоколебания на  $N_{Г}= 3200$  кВт; ГТ1-001; Ходовые испытания; 20.12.2008 г.  $f=0,1$  Гц

#### 1.4 САР НК-361 с поршневым насосом и ресивером

В 2010 г. в ОАО "ВНИКТИ" (г. Коломна Московской обл.) выполнена модернизация топливной системы газотурбовоза. Вместо центробежного насоса применили поршневой (ПН), а также установлены ресивер объёмом 2 м<sup>3</sup> и газовый дозатор ДГ (рис. 20). Организовано два независимых контура – контур регулиро-

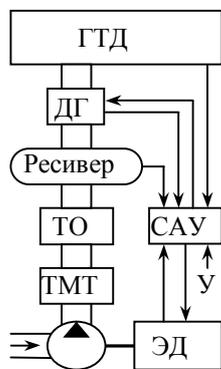


Рис. 20 САР НК-361 с двумя независимыми контурами

вания давления в ресивере и контур регулирования п<sub>СТ</sub> ГТД.

Регулирование давления в ресивере осуществляется изменением частоты вращения насоса. Так как при регулировании расхода газа САУ учитывает изменение давления и температуры газа перед ДГ, к точности поддержания параметров газа в ресивере нет особых требований. Контур регулирования п<sub>СТ</sub> ГТД стал устойчивым и приобрёл высокое быстродействие (рис. 21). В декабре 2010 – январе 2011 г. успешно прошли ходовые испытания магистрального газотурбовоза ГТ1-001 на Московской и Горьковской железных дорогах.

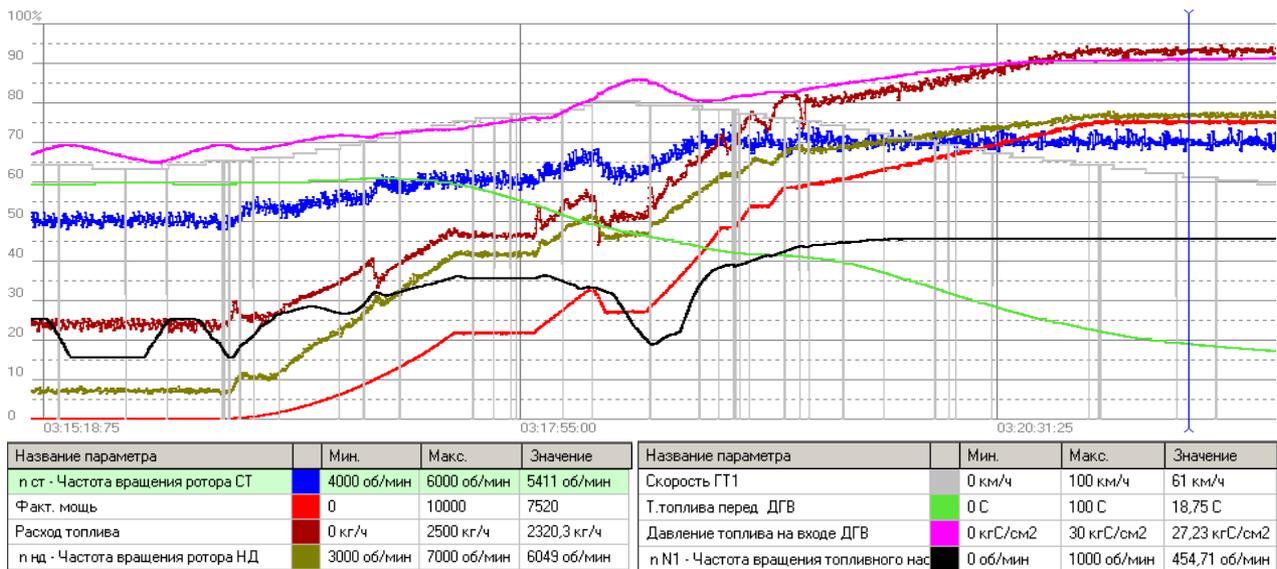


Рис. 21.  $N_T=0 \dots 7500$  кВт; ГТТ-001; ходовые испытания; вес состава 9200 т;  $V_{сост}=60\dots 80$  км/ч; 18.01.2011 г

## 2 Классификация САР ГТД на криогенном топливе

На основании данных по испытанным системам и анализа всех известных схем предлагается классификация САР ГТД, состоящая из четырех групп. С увеличением номера группы степень нейтрализации запаздывания ТО увеличивается – от минимальной в первой группе до полной в последней, четвёртой.

### 2.1. Одноконтурные САР с регулированием расхода сжиженного топлива (НК-361 с ЦН)

независимо от привода насоса являются предельно простыми, но имеют длительные переходные процессы, а для объектов регулирования без самовыравнивания склонны к неустойчивости. Единственный способ повышения качества переходных процессов - введение производных в закон регулирования [4]. Такие системы приемлемы либо при малом запаздывании ТО, либо при допустимости длительных переходных процессов. Рассматриваемая в 90-е годы для модернизации НК-89 такая схема [10] при удовлетворительных переходных процессах не обеспечивает время приёмности авиационного двигателя, которое не может быть больше 10 с. Так, время переходного процесса на номинальном режиме при изменении частоты вращения  $n_{ВД}$  в пределах 700 об/мин составляет 6...7 с (рис. 22), а весь диапазон изменения  $n_{ВД}$  при приёмности около 3000 об/мин.

На близком малому газу режиме при изменении  $n_{ВД}$  в пределах 450 об/мин длительность переходного процесса, составляющая 20...25 с, в принципе неприемлема для обеспечения времени приёмности.

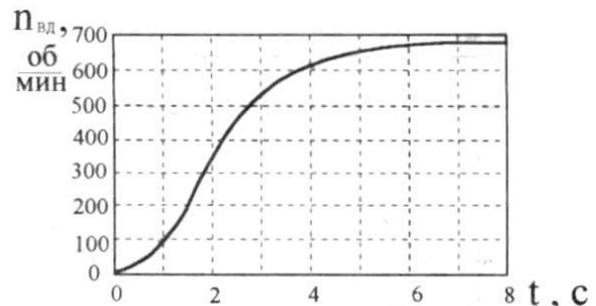


Рис. 22. Переходные процессы модели одноконтурной САР с регулятором расхода в жидкостной линии:

режим N;  $n_{ВД}=6860$  об/мин;  $\tau_{ТО}=0,1$  с;  $T_{ТО}=0,5$  с

### 2.2. Двухконтурные каскадные САР (НК-88 и НК-89)

характерны отсутствием управляемого дросселя в газовой магистрали. Внутренний контур частично компенсирует запаздывание ТО. В качестве регулируемого параметра могут рассматриваться кроме частоты вращения ТНА давление перед форсунками, расход газа и даже расход сжиженного топлива. По сути эта САР, при форсировании СПТ по расходу насоса и рассмотренной коррекции контура ТНА по давлению перед КС становится четырёхконтурной.

### 2.3. Многоконтурные каскадные системы с управляемым дросселем в газовой магистрали (рис. 23) являются развитием

предыдущей группы. На НК-88 первоначально был установлен такой дроссель, управляемый по  $\Delta p_{ВД}$ , оказавшийся при таком управлении неэффективным. Другие корректирующие воздействия не были исследованы. Регулирование расхода

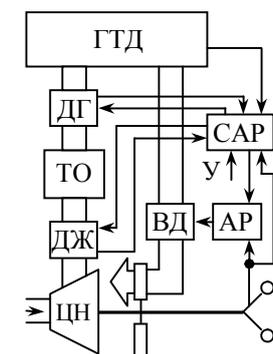


Рис. 23. Схема многоконтурной САР с газовым дросселем ДГ

газа таким дросселем из-за малого объема газа за ТО проблематично, однако дроссель, возможно, будет эффективен в качестве дифференциатора. Для повышения динамического качества можно рассматривать установку небольшого ресивера за ТО. Видимо, такие многомерные системы с перекрестными связями должны обладать большими, по сравнению с группой 2, возможностями улучшения динамики, однако они наиболее сложны как в динамическом отношении, так и в управлении.

**2.4. САР с двумя независимыми контурами: контуром регулирования давления газифицированного топлива в ресивере и контуром регулирования параметров ГТД газовым дозатором (НК-361 на ГТ1-001 с ПН).** В этой относительно простой по динамике системе отсутствует влияние запаздывания ТО на контур регулирования ГТД, но эта система характерна большим весом ресивера.

### Выводы

1 Представлен динамический анализ созданных САР ГТД НК-88, НК-89, НК-361, работающих на криогенном топливе – сжиженном водороде или сжиженном природном газе.

2 Предложена классификация САР, позволяющая в зависимости от относительного запаздывания ТО и динамических требований выполнить инженерный синтез САР с обоснованием соответствующей структуры.

### Библиографический список

1. Гурецкий, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием [Текст]: пер. с польского / Х. Гурецкий.- М.: Машиностроение, 1974. - 328 с.

2. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1975. - 768 с.

3. Исследование и выбор схемы управления и регулирования подачи топлива [Текст] / В.А. Букин, В.Н. Орлов [и др.] // Сб. тр. науч. – теорет. конф., ЦИАМ, 1980.

4. Широкий, Д.К. Расчёт параметров промышленных систем регулирования [Текст]: справ. пособие / Д.К. Широкий, О.Д. Куриленко. – Киев: Техніка, 1972. - 232 с.

5. Добкин, В.М. Автоматическое регулирование тепловых процессов на электростанциях [Текст] / В.М. Добкин, Е.М. Дулеев, Е.П. Фельдман - М.: Госэнергоиздат, 1959.

6. Букин, В.А. Обеспечение устойчивости турбонасосной системы подачи водородного авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / В.А. Букин, А.И. Иванов, И.П. Косицын // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Куйбышев, 1990.

7. Анализ эффективности комплексной динамической коррекции САР и СП двигателей НК-88 и НК-89 [Текст]: техн. отчёт №001.10385 / исполн. В.А. Букин – Самара: ОАО «Кузнецов», 1990.

8. Букин, В.А. Создание комплекса средств для автоматизированного частотного исследования САР ГТД с применением релейного гидравлического пульсатора [Текст] / В.А. Букин, А.А. Мишуков, Е.В. Степанов // Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: межвуз. сб. – Куйбышев: КуАИ, 1988. - 168 с.

9. Исследование динамических свойств системы регулирования силового блока газотурбовоза ГТ1-001 с двигателем НК-361 [Текст]: техн. отчёт № 001.14120 / исполн. В.А. Букин – Самара: ОАО «Кузнецов», 2010.

10. Особенности систем топливопитания и регулирования авиационных газотурбинных двигателей на криогенном топливе [Текст] / В.П. Шорин, С.М. Игначков, Е.В. Шахматов [и др.] – Самара: Изд-во СГАУ, 1998. – 148 с.

**ON SELECTION OF AUTOMATIC CONTROL  
SYSTEM FOR CRVOGENIC FUEL GAS TURBINE ENGINE**

© 2011 V. A. Bukin

JSC «KUZNETSOV», Samara

The article generalizes experience of automatic regulation systems design and development for aircraft and industrial gas turbine engines, operating with liquid hydrogen (NK-88 engine in TU-155 aircraft) or liquid natural gas (NK-89 engine in TU-155 aircraft, NK-361 engine in gas-turbine locomotive GT1-001).

*Gas turbine engine, cryogenic fuel, automatic control system, liquefied hydrogen, liquefied natural gas, gasifier, pump, receiver.*

**Информация об авторах**

**Букин Валерий Афанасьевич**, ведущий инженер конструкторского отдела ОАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: проектирование и доводка систем автоматического регулирования газотурбинных двигателей.

**Bukin Valery Afanasyevich**, position - leading engineer in experimental design bureau of JSC «KUZNETSOV» (Samara). Area of research: gas turbine engine control system design and development.