

**ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ)
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ,
НАЗЕМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
НА БАЗЕ КОНВЕРСИОННЫХ ГТД
И ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Горячкин А.А., Григорьева Т.Л., Ефремов Ю.В., Жуковский А.Е., Козлов В.А.
Самарский государственный аэрокосмический университет,
ОАО СНТК им. Н. Д. Кузнецова, г. Самара

При проектировании широкого класса технических систем таких, как системы автоматического регулирования (САР) авиационных двигателей, наземные энергетические установки и пневмогидравлические системы ракетных комплексов, одним из основных требований является обеспечение качества динамических процессов, происходящих в них.

При проектировании САР вновь создаваемого ГТД традиционно возникают задачи обеспечения качества динамических процессов как в области времени (переходные процессы), так и в области частоты (устойчивость). Особенно трудоемкими эти задачи становятся в условиях использования многоэлементных, многоконтурных САР.

Поиск мероприятий по обеспечению динамического качества экспериментальным путем в значительной мере затруднен из-за больших материальных и временных затрат на проведение испытаний. В связи с этим в условиях имеющихся возможностей современной вычислительной техники и достаточном аналитическом обеспечении становится предпочтительным решение этих задач на математических моделях. При этом возможно получение необходимых рекомендаций по требуемому изменению структуры САР и выбору параметров агрегатов регулирования.

Так при проектировании двигателей типа НК-88 и НК-89, использующих криогенное топливо, возникла необходимость динамической коррекции САР с целью обеспечения заданных показателей точности [1]. Был предложен вариант структурной коррекции САР, заключающийся в использовании в качестве агрегата управления подачей криогенного топлива в камеру сгорания регулятора расхода прямого действия, установленного за насосом.

С целью определения параметров регулятора, обеспечивающих устойчивость САР ГТД НК-88, было проведено D-разбиение в плоскости постоянной времени T_1 регулятора расхода. Структурная схема модифицированной САР приведена на рис. 1.

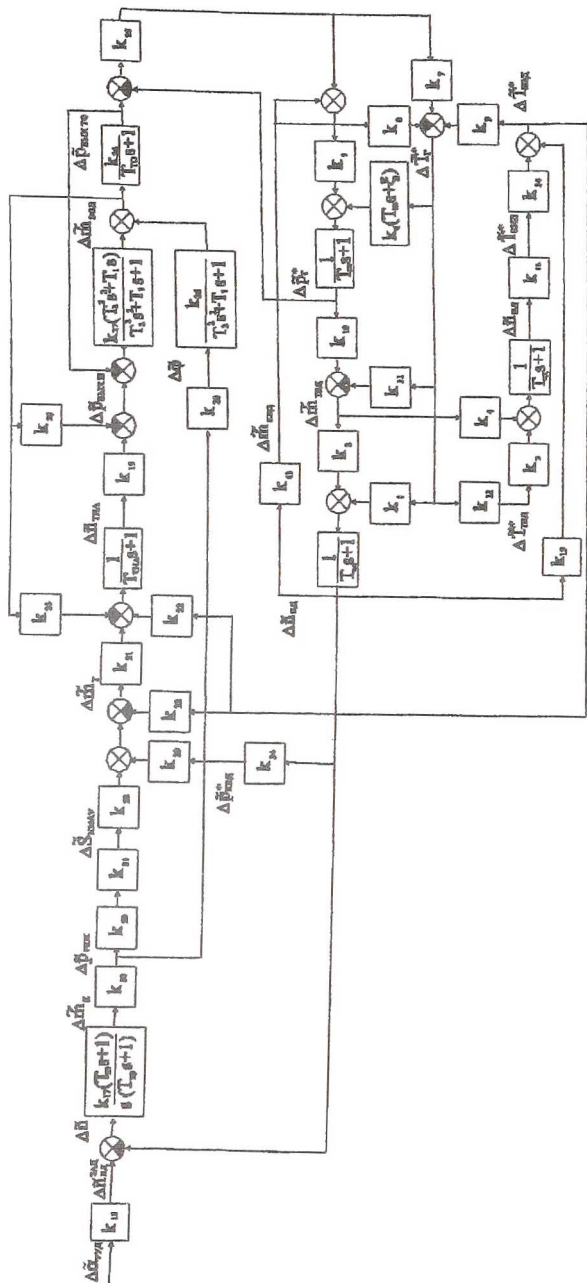


Рис. 1. Структурная схема модифицированной САР ГТД НК-88

Годограф D-разбиения на номинальном режиме, построенный при помощи средств ППП «Matlab» (рис. 2), позволил сделать вывод — рассматриваемая САР будет устойчива при всех положительных значениях T_1 .

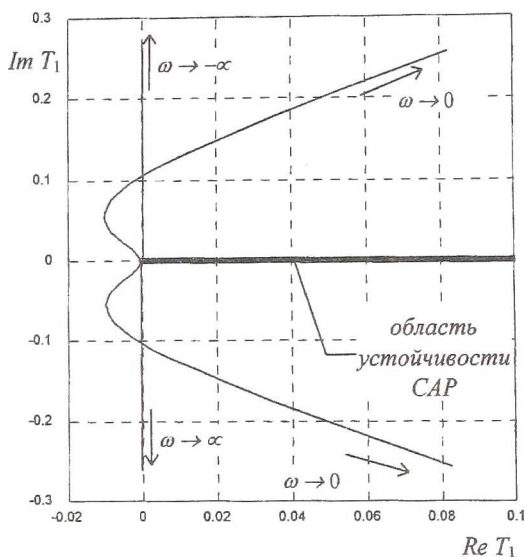


Рисунок 2 - D-разбиение в плоскости постоянной времени регулятора T_1 на номинальном режиме

Выбор постоянной времени в связи с этим целесообразно осуществить из требований к двигателю по качеству переходных процессов — монотонности, минимальному времени переходного процесса. Полученные результаты (рис.3) говорят о практическом удовлетворении этим требованиям в случае принятия значения постоянной времени регулятора T_1 равным 0,3 с.

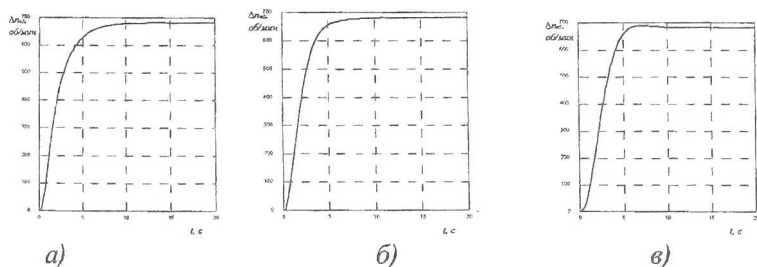


Рисунок 3 - Переходные процессы по каналу управления на номинальном режиме: а) $T_1=0,1$ с; б) $T_1=0,3$ с; в) $T_1=0,5$ с.

При проектировании САР ГТУ НК-37-1, предназначенной для использования в качестве привода электрогенератора, необходимо учитывать следующие обстоятельства. При работе на заданном режиме САР должна автоматически поддерживать потребную мощность газогенератора при изменении частоты вращения свободной турбины привода электрогенератора в пределах, не вносящих существенных изменений в частоту генерируемого тока. Кроме того, при оговоренных в ТЗ сбросах - набросах нагрузки с электрогенератора в пределах 50% от номинальной должна обеспечиваться газодинамическая устойчивость и безопасность работы двигателя.

Математическое моделирование динамических процессов в двигателе как в штатных, так и в аварийных ситуациях позволяет оценить возможность решения поставленных задач, а также провести оценку запасов газодинамической устойчивости компрессоров НД, СД и ВД на переходных режимах, выбирать программы срабатывания клапанов перепуска воздуха [2].

Математическая модель САР ГТУ НК-37-1 приведена на рис. 4.

Кроме этого для оценки запаса газодинамической устойчивости в математическую модель дополнительно введены уравнения, описывающие динамику изменения давлений за компрессорами, традиционно используемые в моделях двигателей [3].

Результаты математического моделирования позволили определить свойства ГТУ, необходимые для дальнейшего анализа. Так наиболее напряженным в смысле устойчивости работы является компрессор низкого давления на режимах быстрого дросселирования, где происходит временная потеря газодинамической устойчивости (рис. 5а). Для сохранения устойчивой работы компрессора высокого давления на режимах "наброса" нагрузки необходимо ограничение скорости нарастания расхода топлива не более $2400 \text{ кг}/(\text{час} \cdot \text{с})$, так как при этом значении запас газодинамической устойчивости выбирается практически до нуля. Величины забросов и провалов частоты вращения свободной турбины при "сбросе" и "набросе" нагрузки с электрогенератора на 50% номинальной мощности лежат в пределах заданных ТЗ за исключением сброса нагрузки с 12,5 МВт до холостого хода (рис. 5б), когда наблюдается кратковременное превышение ограничения $\Delta n_{cm} = 4\% n_{cm}^{\text{ном}}$ на 1,2% (36 об/мин).

Приведенные модельные решения для рассматриваемой задачи требуют экспериментального подтверждения при натурных испытаниях ГТУ с подключенной электрической нагрузкой. Получение уверенности в результатах аналитического моделирования делает возможным поиск эффективных воздействий на алгоритм работы и структуру САР двигателя.

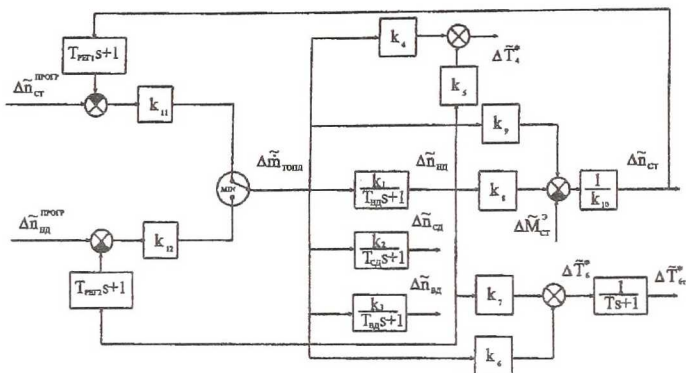


Рисунок 4 - Структурная схема САУ ГТУ НК-37-1.

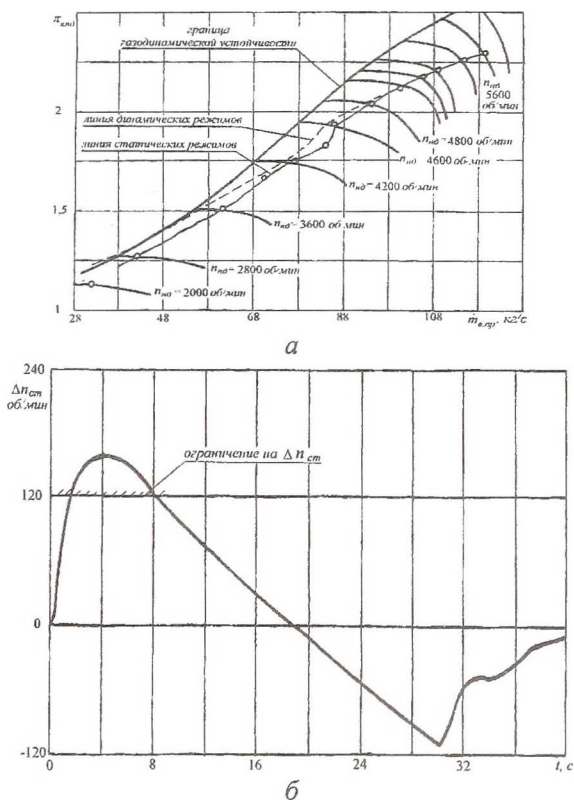


Рисунок 5- Динамические характеристики, полученные на модели САУ ГТУ НК-37-1:

а - КНД при быстром дросселировании; б- переходный процесс по $n_{ст}$ при "сбросе" нагрузки на валу СТ $N_{ст}=13,3-0,8$ МВт за 0,5 с.

При решении задач обеспечения динамической точности для ракетно-космических комплексов (РКК) с ЖРДУ актуальны вопросы обеспечения продольной устойчивости и ограничений в области спектральных характеристик свободных колебаний параметров двигателя. Такие проблемы возникали практически на всех мощных РКК как отечественного, так и зарубежного производства. Их решение также требует обращения к методам математического моделирования, которые на современном этапе достаточно хорошо разработаны [4,5].

Наиболее распространенным способом обеспечения продольной устойчивости ракеты-носителя является коррекция динамических свойств расходных магистралей путем установки в них демпфирующих устройств с податливыми элементами. На рис. 6 представлена исходная математическая модель САР ЖРД закрытой схемы с установленным в магистрали горючего демпфером [4,6]. Применение демпфирующих устройств позволяет сместить резонансные частоты расходной магистрали в область низких частот (рис. 7).

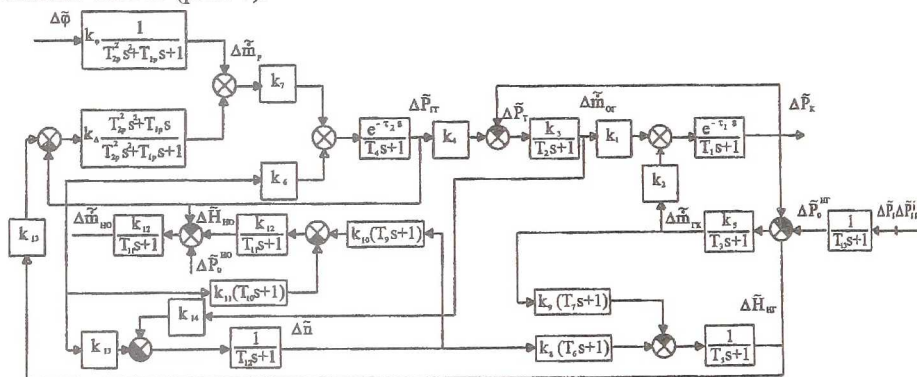


Рисунок 6 - Структурная схема САР ЖРД закрытой схемы.

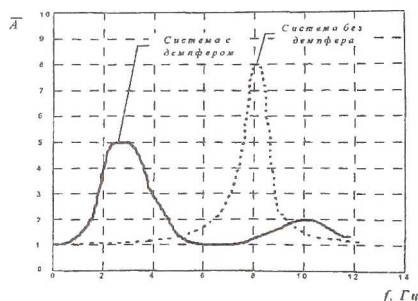


Рисунок 7 - Расчетная амплитудно-частотная характеристика расходной системы горючего.

Другим способом коррекции динамических характеристик ЖРД является изменение параметров регулятора тяги — степени демпфирования дифференциального клапана. Степень демпфирования дифференциального клапана определяется диаметром жиклера. Это приводит к изменению постоянной времени регулятора T_{1p} в математической модели САР. Приведенные на рис. 8 динамические характеристики ЖРД при различных значениях быстродействия регулятора позволяют сделать вывод о достаточной степени эффективности данного способа коррекции.

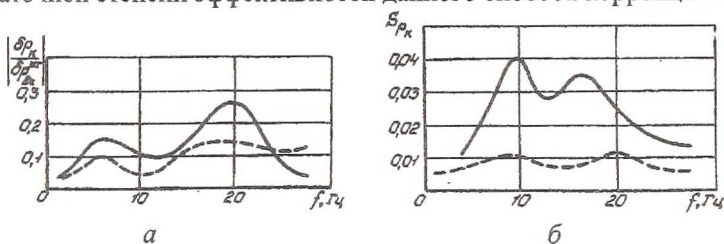


Рисунок 8 - Динамические характеристики ЖРД в зависимости от быстродействия регулятора: *а* - по каналу продольных колебаний; *б* - спектральная плотность колебаний тяги; — инерционный регулятор; быстродействующий регулятор.

Список литературы

1. Особенности систем топливопитания и регулирования авиационных газотурбинных двигателей на криогенном топливе / Шорин В. П., Игначков С. М, Шахматов Е. В. и др.. — Самара: Изд-во СГАУ, 1998. — 148 с.
2. Моделирование динамических процессов в двигателе НК-37 на этапе его проектирования: Технический отчет № 001.12636 / ОАО СНТК им. Н. Д. Кузнецова — Самара, 1997.
3. Добрянский Г. В., Мартыанова Т. С. Динамика авиационных ГТД — М.: Машиностроение, 1989, — 240 с.
4. Колесников К. С. Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем — М.: Машиностроение, 1971, — 260 с.
5. Методы обеспечения функциональной надежности пневмогидравлических и топливных систем блока ракетно-космического комплекса / Под ред. акад. РАН Шорина В. П. и Петренко С. А. — Самара: Изд-во НПО "Импульс", 1994 — 256 с.
6. Моделирование динамических процессов в двигательных установках с ЖРД: Учеб. пособие / Жуковский А. Е., Малеев А. Ф.; Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992 — 66с.