

# РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ТУРБИНЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

## К 30-ЛЕТИЮ ПОЛЁТА ОРБИТАЛЬНОГО КОРАБЛЯ "БУРАН"

Анатолий Иванович Гулиенко, к.т.н., ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова"

*Изложены результаты исследования характеристик релейно-импульсной системы регулирования частоты вращения турбины вспомогательной энергетической установки орбитального корабля "Буран". Система данного типа позволяет уменьшить массу топлива в баке для функционирования установки.*

*The results of the study of the characteristics of the relay-impulse control system of the turbine speed control of the auxiliary power unit of the Buran Orbiter are presented. The system of this type allows to reduce the mass of fuel in the tank for the operation of the unit.*

**Ключевые слова:** Буран, Энергия, система автоматического регулирования, **Keywords:** Buran, Energy, automatic control system

15 ноября 1988 года состоялся космический полёт орбитального корабля (ОК) "Буран". Ракета-носитель "Энергия" вывела корабль на околоземную орбиту. Полёт длился 205 минут, за это время корабль совершил два витка вокруг Земли, после чего в автоматическом режиме произвёл посадку на аэродроме "Юбилейный" космодрома Байконур. При планирующем спуске с орбиты и посадке в качестве источника энергии для силовых приводов в системе управления аэродинамическими поверхностями ОК использовалась вспомогательная энергетическая установка (ВЭУ), которая создавала необходимое для управления ОК рабочее давление жидкости [1]. Она успешно прошла экспериментальную отработку и безотказно работала в полете. В качестве топлива использовался гидразин с разложением его в каталитическом реакторе.

Основные характеристики ВЭУ: развиваемая мощность - до 105 кВт при градиенте до 670 кВт/с, диапазон изменения мощности - более 20, высокая надёжность и пожаро-, взрывобезопасность [1]. Установка состоит из ракетно-турбовального двигателя (РТВД), вытеснительной системы подачи топлива из баков к РТВД, блока автоматики (регулятора) и других агрегатов. Основными узлами конструктивной схема РТВД (рис. 1) являются газогенератор (ГГ), регулятор, турбина и редуктор. Система регулирования РТВД должна обеспечить поддержание частоты вращения турбины.

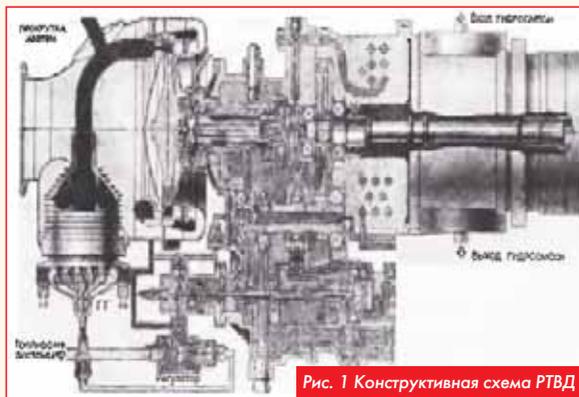


Рис. 1 Конструктивная схема РТВД

Проведенные в ЦИАМ расчётные исследования показали, что в установках подобного типа с широким диапазоном изменения выходной мощности

для управления частотой вращения турбины целесообразно применить релейно-импульсную систему управления подачей топлива, которая в заданных условиях эксплуатации обеспечит меньший потребный запас топлива на борту ОК.

Во вспомогательных силовых установках для поддержания заданного значения частоты вращения турбины обычно применяются системы автоматического регулирования (САР), которые управляют расходом топлива путем изменения проходного сечения дросселя на входе в газогенератор. При этом на режимах работы ниже максимальной мощности турбина РТВД работает на нерасчетном режиме при более низком коэффициенте полезного действия, что требует повышенного расхода топлива для обеспечения потребной мощности установки.

Релейно-импульсная САР, реализующая импульсную подачу топлива в газогенератор путём закрытия / открытия отсечного кла-

пана на входе в газогенератор, обеспечивает работу турбины РТВД на режимах, близких к расчетным во всем диапазоне изменения мощности. Следует также отметить, что применение такой САР обеспечивает её виброзащищённость, так как исполнительные механические элементы системы в потоке рабочей среды "взвешены" только кратковременно на переходных режимах, а остальное время они прижаты к упорам. Это практически исключает воздействие виброперегрузок на их массу и, следовательно, влияние на регулируемые параметры.

Принципиальная схема РТВД с релейно-импульсной САР приведена на рис. 2. РТВД содержит турбину 5 и однокомпонентный газогенератор 4, топливо в который подается из баков 1 с высоким давлением. Нагрузкой для турбины является насос 7 гидросистемы. Система регулирования турбопривода состоит из датчика частоты вращения 8, устройства 9 преобразования сигнала с датчика на сигнал на включение (отключение) отсечного клапана 3 на линии подачи топлива в газогенератор. Отсечной клапан 3 с электромагнитным управлением двухпозиционный типа "да-нет". Напряжение питания  $U$  подается на электромагнит клапана 3 с запаздыванием  $\Delta t_{\text{рег}}$ , вызванным наличием в усилителе-преобразователе 9 времени преобразования сигнала с датчика 8. Важным функциональным элементом преобразователя 9 является петля гистерезиса для сиг-

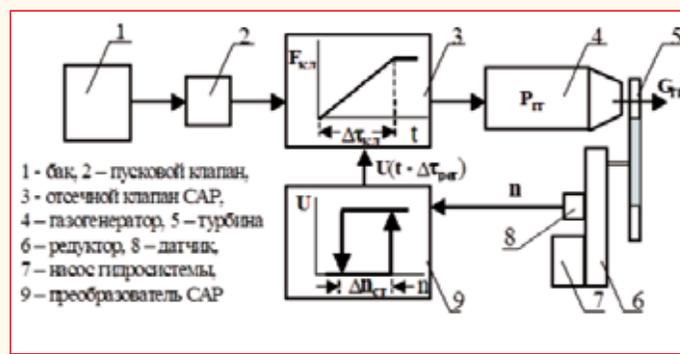


Рис. 2 Принципиальная схема турбопривода с релейно-импульсной САР

нала с датчика частоты вращения, которая обеспечивает помехозащищённость системы. Пусковой клапан 2 обеспечивает включение / отключение РТВД.

Принцип работы этой системы регулирования иллюстрируют приведенные на рис. 3 переходные процессы параметров РТВД при минимальной  $N_{\text{мин}}$  и максимальной  $N_{\text{макс}}$  мощности нагрузки. При превышении заданного максимального значения частоты вращения турбины  $n_{\text{тах}}$  отсечной клапан регулятора перекрывает проходное сечение  $F_{\text{кл}}$  трубопровода и топливо прекращает поступать в газогенератор. Мощность турбины уменьшается и частота вращения начинает снижаться до минимально допустимого значения  $n_{\text{мин}}$ , когда подаётся команда на открытие отсечного клапана. Топливо с некоторой задержкой поступает в газогенератор, где оно разлагается с выделением тепла. Давление в газогенераторе ( $P_{\text{гг}}$ ) возрастает до макси-

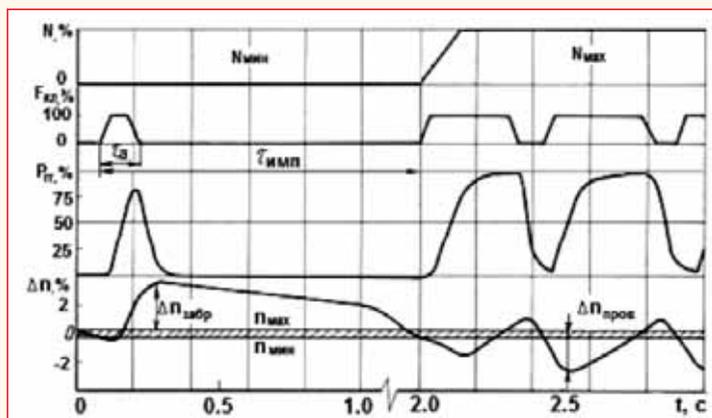


Рис. 3 Переходные процессы в РТВД с релейно-импульсной САР

мального значения, продукты разложения топлива в газовой фазе поступают на турбину, её мощность увеличивается, и частота вращения возрастает до верхнего допустимого значения.

Из-за конечной скорости движения исполнительного органа отсечного клапана и наличия топлива в трубопроводах за ним, при закрытии клапана давление газа в газогенераторе  $P_{гг}$  и мощность турбины РТВД уменьшаются с запаздыванием, что приводит к забросу частоты вращения ротора  $\Delta n_{зобр}$  над максимальным значением  $n_{max}$ . При открытии отсечного клапана с запаздыванием начинается рост давления в газогенераторе и возникает провал частоты вращения  $\Delta n_{пров}$ .

Расчетные исследования по выбору параметров релейно-импульсной САР РТВД проведены по математической модели, которая разработана с использованием конечно-элементной схематизации подсистем с распределенными параметрами и суммарного осредненного представления физико-химических процессов преобразования жидкого топлива в газ с помощью транспортного запаздывания. Казалось бы, что из-за сильного "разноса" величины постоянной времени вращающихся механических масс и постоянных времени гидравлических и газовых элементов (один - два порядка) можно пренебречь динамическими процессами в системе подачи топлива и в газовых емкостях. Однако, учитывая, что режим работы по частоте вращения турбины находится в узком диапазоне (нескольких процентов), а изменение параметров системы подачи топлива и газогенератора происходит периодически в диапазоне от нуля до 100%, то пренебрежение быстропротекающими процессами в этих системах может привести к качественно неправильным результатам.

Для проведения расчётов газовая и гидравлическая сети РТВД разбиты на отдельные участки течения рабочей среды (трубопроводы и т.п.), связь между участками осуществляется сосредоточенными объемами, распределенные потери давления на трение в пределах участка сосредотачиваются на границе участка и суммируются с потерями на других сопротивлениях этого участка, механические подвижные элементы автоматики располагаются на участках и образуют переменное сосредоточенное сопротивление.

В пределах сосредоточенного участка давление и температура рабочей среды, а также её теплофизические характеристики в виде зависимостей плотности и вязкости рабочей среды от температуры, постоянны по длине и изменяются только во времени. В емкостях происходит слияние потоков рабочей среды и изменение её теплофизических и термодинамических характеристик. При этом по всему объему параметры состояния (давление, температура и др.) одинаковы и изменяются только во времени.

Основными характеристиками РТВД как объекта управления в релейном режиме работы приняты величины "выбегов" частоты вращения турбины от заданного ее значения при подаче топлива (процесс приемистости) и при его отсечке (процесс последствия). При подаче топлива (открытие отсечного клапана) сначала происходит падение частоты вращения турбины, а затем её восстановление (рис. 4а). При отсечке топлива (закрытие клапана) сначала происходит кратковременное увеличение частоты вращения турбины,

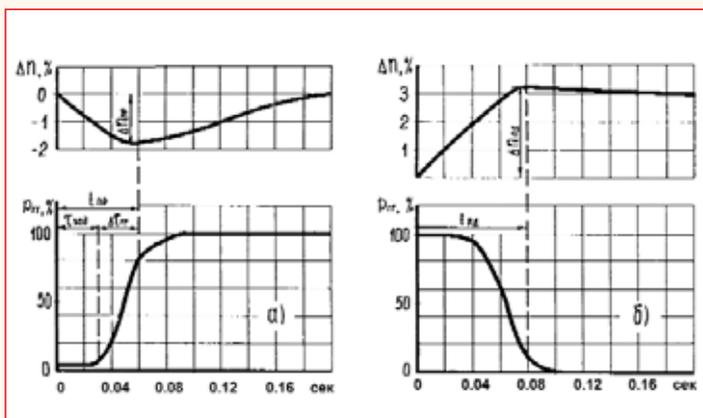


Рис. 4 Переходные процессы приёмистости (а) и последствия (б) в РТВД

а затем медленное её восстановление из-за инерционности вращающихся масс (рис. 4б).

Падение (заброс) частоты вращения прекращается в момент времени  $t_{пр}$  ( $t_{нд}$ ), когда мощность турбины становится равной мощности нагрузки. Это время складывается из времени задержки преобразования жидкого топлива в газ  $\tau_{зод}$  и времени  $\Delta t_{гг}$  выхода параметров газогенератора (расхода и давления) на значения, обеспечивающие требуемую мощность. Чем больше величина мощности нагрузки, тем больше время приемистости и больше провал частоты вращения  $\Delta n_{пр}$ . Максимальный ее заброс  $\Delta n_{нд}$  реализуется на режиме минимальной мощности нагрузки.

В качестве основных показателей переходных процессов РТВД с релейно-импульсной САР частоты вращения турбины приняты:

- длительность импульса  $\tau_{имп}$ , определяемая как время между двумя последовательными включениями отсечного клапана;
- время активной работы газогенератора  $\tau_{гг}$ , определяемое как время от начала открытия до полного закрытия отсечного клапана;
- величина заброса и провала частоты вращения турбины от номинального значения  $\Delta n_{зб}$  и  $\Delta n_{пр}$ ;
- эквивалентный расход топлива за импульс работы  $G_{гг}$ , равный отношению массы топлива, израсходованной за время активной работы, к длительности импульса.

Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные значения (индексы \*) этих показателей приведены на рис. 5. Расчеты проведены при следующих характеристиках элементов системы регулирования:

- настройка датчика частоты вращения турбины  $\Delta n_{ст} \pm 0,3\%$ ,
- время задержки преобразования сигнала с датчика  $\Delta t_{рег} 0,01$  с,
- время задержки преобразования жидкого топлива в газ  $\tau_{зод} 0,01$  с,
- время открытия проходного сечения отсечного клапана  $\Delta t_{кл} 0,04$  с.

Несмотря на высокую точность настройки релейного датчика частоты вращения (0,3%), точность поддержания частоты вращения турбины в полном диапазоне изменения мощности невелика и составляет 3,5%. Такая точность обусловлена "выбегам" (провалами и забросами) частоты вращения турбины после открытия и закрытия отсечного клапана. Величины "выбегов" оказывают влияние и на длительность импульса работы газогенератора, т.к. провал

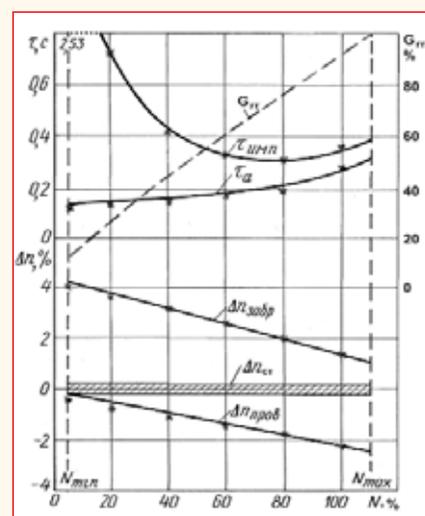


Рис. 5 Расчётные и экспериментальные характеристики релейно-импульсной САР

или заброс частоты вращения вызывают увеличение времени работы для их парирования. Максимальные величины провала и заброса частоты вращения имеют место на режимах постоянной мощности нагрузки. На переходных режимах их величина ниже.

Из-за конечной величины времени срабатывания отсечного клапана и других динамических параметров, определяющих величины "выбегов" частоты вращения, затруднительно обеспечить высокую (менее 1%) точность поддержания частоты вращения турбины при применении релейно-импульсной САР.

Исследования показали, что для уменьшения величин "забросов" и "провалов" частоты вращения необходимо уменьшать:

- время срабатывания отсечного клапана,
- объём газовой полости газогенератора,
- задержку преобразования топлива в газ,
- задержку формирования сигнала с датчика частоты вращения на отсечной клапан.

Необходимо также повышать инерционность вращающихся масс РТВД, например, увеличением момента инерции или увеличением частоты вращения турбины.

На начальном этапе отработки ВЭУ использовалась гидромеханическая релейно-импульсная САР (РЧВ-14), состоящая из узла центробежного датчика частоты вращения и узла подачи топлива, в который входит отсечной клапан 1 и клапан 2 постоянного перепада давлений (рис. 6). Датчик частоты вращения за счет изменения усилий в рычажном механизме изменял положение заслонки относительно сопла, что обеспечивало переключку отсечного клапана в одно из двух крайних положений - "открыт" или "закрыт" и удержи-

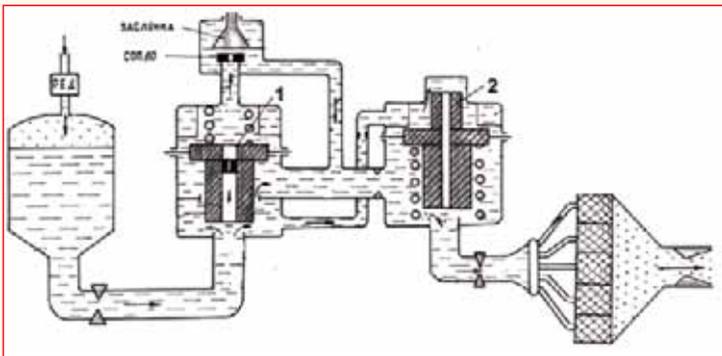


Рис. 6 Схема гидромеханического варианта релейно-импульсной САР

вать его в этом положении.

Нормальным режимом работы САР является автоколебательный импульсный режим, при котором на каждом цикле колебаний происходит полное выключение подачи топлива и давление на входе в газогенератор снижается от максимума до минимума. При открытии клапана 1 в магистрали за ним создаются условия для бурного выделения из топлива газа, поглощенного им при высоком давлении в баке. Расширение выделяющегося газа может приводить к дополнительному вытеснению топлива в газогенератор после срабатывания регулятора на закрытие. Эти процессы сопровождаются накоплением и вымыванием газовых объемов в застойных зонах (полостях) регулятора и магистрали, которые носят случайный характер и трудно воспроизводимы в лабораторных условиях.

При неблагоприятном сочетании конструктивных параметров, а также при повышенном газонасыщении топлива, отсечной клапан гидромеханического регулятора иногда срабатывал медленно, что приводило к превышению заданной величины частоты вращения турбины.

В связи с имевшими место забросами частоты вращения турбины и пропуске команд управления при использовании гидромеханической релейно-импульсной САР, по рекомендации ЦИАМ разработан и принят к реализации в штатной конструкции РТВД электронный вариант релейно-импульсного регулятора частоты вращения с электромагнитным отсечным клапаном. Правильность принятия этого технического решения подтверждена результатами безотказной работы с требуемыми по ТЗ характеристиками всех трёх энергетических установок в первом полете ОК "Буран".

Несмотря на относительно низкую точность релейно-импульсной САР поддержания частоты вращения турбины, когда топливо подается в газогенератор кратковременно импульсами, за счет работы турбины на расчетном значении к.п.д., система имеет преимущество по массе расходуемого топлива за цикл работы установки перед САР с непрерывной подачей рабочего тела, когда требуемая величина расхода топлива обеспечивается путем дросселирования линии его подачи и турбина работает с уменьшенным значением к.п.д. В таблице 1 приведены расчетные и экспериментальные значения отношения величин расхода топлива релейной ( $G_{гг}$ ) и непрерывной САР ( $G_{непр}$ ) для различных режимов работы.

	Величина мощности нагрузки, %					
	100	80	60	40	20	5
Отношение $G_{гг} / G_{непр}$	100	80	60	40	20	5
Расчет	0.978	0.96	0.91	0.86	0.62	0.27
Эксперимент	0.98	0.96	0.89	0.83	0.53	0.33

Табл. 1

Экспериментальная отработка РТВД с релейно-импульсной САР подтвердила ее работоспособность и наличие эффекта экономии топлива. Наибольший выигрыш имеет место при минимальной величине мощности нагрузки и достигает 70% (см. табл.1). Интегральный выигрыш в полном диапазоне изменения мощности составляет около 30%. В полёте орбитального корабля "Буран" расход топлива был меньше расчетного, что объясняется тем, что в расчетах были приняты предельные значения характеристик РТВД и агрегатов системы [1].

Отработка релейно-импульсной системы регулирования проводилась с участием сотрудников ЦИАМ В.М.Калнина, Ю.М.Кузина, Н.Б.Шагиновой и др., а также сотрудников предприятий-разработчиков РТВД и гидромеханического регулятора.

#### Заключение

Расчетный анализ и экспериментальные исследования показали, что при точности поддержания частоты вращения турбины (1...3)% с диапазоном изменения её мощности в 20 и более раз, целесообразно использовать релейно-импульсное управление подачей топлива, осуществляемое регулятором частоты вращения, состоящим из датчика частоты вращения и двухпозиционного отсечного клапана. При этом турбина работает около расчётного режима по коэффициенту полезного действия, что обеспечивает снижение потребного запаса топлива в баке.

Для энергетических установок, где обеспечение минимума массы конструкции и запаса топлива являются определяющими критериями, можно пойти на некоторое уменьшение точности регулирования и применять релейные САР, достигая при этом выигрыша по массе топлива в баках и, следовательно, по массе полезной нагрузки.

#### Литература

1. Саенко В.И. Вспомогательная силовая установка орбитального корабля // "Авиационно-космические системы" под ред. Г.Е. Лозино-Лозинского и А.Г. Братухина. -М.: МАИ, 1997. С. 225-230.
2. Гулиенко А.И., Шталенков В.М. Системы регулирования установок орбитального корабля "Буран" // "Научный вклад в создание авиационных двигателей". Кн.1. -М.: Машиностроение, 2000. С. 453-454.

