

# УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА В СОВРЕМЕННЫХ ЖИДКОСТНЫХ РН

**В.К. Завадский**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [vladguc@ipu.ru](mailto:vladguc@ipu.ru)

**Н.Н. Стаменкович**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [vladguc@ipu.ru](mailto:vladguc@ipu.ru)

**Ключевые слова:** режимы работы по тяге, устойчивость работы ЖРД, ограничения регулирования ЖРД

**Аннотация:** Изложены назначение и принципы действия СУРТ. Формулируется проблема повышения энергетических характеристик ракет-носителей средствами управления расходом топлива. Рассмотрены вопросы обеспечения устойчивой работы маршевых ЖРД большой мощности в условиях регулирования тяги и соотношения расходов компонентов топлива в широком диапазоне.

## 1. Введение

Одна из задач, которая традиционно ставится перед разработчиками каждой жидкостной ракеты-носителя (РН), заключается в совершенствовании её энергетических характеристик. Решение этой проблемы позволяет при заданной стартовой массе РН максимально увеличить массу выводимого груза или высоту орбиты выведения.

В решении сформулированной проблемы, помимо выбора наиболее эффективного топлива, совершенствования двигателя, оптимизации траектории выведения, важное место занимает повышение эффективности использования располагаемых запасов топлива.

На процессы расходования компонентов топлива двигательной установкой воздействуют случайные возмущающие факторы типа погрешностей заправки, отклонений суммарного расхода топлива, параметра  $K_m$  (коэффициента соотношения расходов компонентов), траекторных возмущений (отклонений аэродинамических параметров, влекущих изменение удельной тяги). В результате такого воздействия компоненты топлива вырабатываются из баков не одновременно. Это создает неопределенность в количестве топлива, которое может быть выработано при решении задачи выведения.

В этих условиях заправляемый запас компонентов топлива в баках ступени ракеты должен гарантированно обеспечивать решение заданной задачи выведения и безаварийного выключения двигательной установки при воздействии всех возмущающих факторов.

Возникает понятие гарантийного запаса топлива. В каждом из баков ракеты дополнительно к рабочему запасу топлива, полностью расходуемому в расчетных условиях выведения, резервируется некоторый запас, предназначенный для компенсации случайных возмущений.

Выделение гарантийных запасов топлива из общего заправляемого в баки ракеты количества возможно за счет соответствующего сокращения выводимого груза при неизменных параметрах целевой орбиты, что приводит к снижению номинальной «грузоподъемности» ракеты.

Величины гарантийных запасов топлива могут быть существенно снижены до уровня, не превышающего 0,5 % от массы рабочих запасов топлива, за счет использования на РН специальных систем, получивших общее название систем управления расходом топлива (СУРТ). Отметим, что без применения СУРТ гарантийные запасы могут достигать до 5 % и более от массы рабочих запасов топлива.

## **2. Совершенствование способов управления выработкой топлива из ступени жидкостной ракеты**

На начальном этапе стратегия управления выведением жидкостных ракет-носителей строилась таким образом, что момент останова двигательной установки каждой ступени назначался из условия выполнения заданных краевых условий на параметры траектории движения центра масс и не был связан с моментом окончания компонентов топлива в баках.

Отметим основные положения, которые характеризуют изложенный традиционный способ выключения двигателей ступеней ракеты-носителя:

- 1) управление движением центра масс производится независимо от управления расходом топлива;
- 2) выбор гарантийных запасов топлива производится независимо, автономно для каждой ступени.

Величина гарантийных запасов топлива на ракетном блоке определяется по характеристикам случайной составляющей конечных остатков компонентов топлива в момент выключения ЖРД блока. Перечислим основные факторы, влияющие на конечные остатки:

- случайные траекторные возмущения (аэродинамические, по удельной тяге и проч.), которые обуславливают величину суммарной (окислителя и горючего) случайной составляющей конечного остатка топлива;
- действующие на процесс расходования топлива случайные возмущения (температурные, по давлению наддува баков, ошибки настройки ЖРД на номинальное значение  $K_{т.ном}$  соотношения массовых расходов компонентов топлива и др.), которые обуславливают случайное перераспределение конечных остатков топлива по бакам (слабо влияя на суммарную составляющую конечного остатка).

Целью регулирования расходования топлива из бака является компенсация возмущений, вызывающих случайное перераспределение по бакам конечного остатка топлива. (Это означает, в частности, что должна обеспечиваться синхронизация опорожнения баков окислителя и горючего.)

Достижение этой цели приводит к широко используемому в РКТ способу управления режимом расходования топлива – синхронизации моментов израсходования окислителя и горючего. При относительно высокой точности регулирования опорожнения баков (когда составляющая случайного остатка топлива, обусловленная погрешностью синхронизации опорожнения, значительно меньше суммарной случайной составляющей конечного остатка) синхронизация расходования топлива обеспечивает величину суммарных остатков топлива на ступени, близкую к минимальной.

Регулирование опорожнения баков двухкомпонентного жидкостного ракетного блока осуществляется посредством изменения в полёте соотношения текущих расходов компонентов топлива из баков и предназначено, главным образом, для снижения гарантийных запасов топлива; другое назначение этого регулирования связано с обеспечением надёжности функционирования ЖРД и состоит в удержании соотношения текущих расходов компонентов топлива в заданном диапазоне.

В современных ракетах-носителях, в том числе на РН «Протон», «Зенит» и «Ангара», используется более совершенная в плане энергетики стратегия управления выведением [1].

Отметим основные положения этой стратегии:

- 1) Двигатели нижних ступеней выключаются с использованием информации о моменте полной выработки топлива. Этому моменту соответствуют минимально-потребные неиспользуемые остатки компонентов топлива (гарантийные запасы на погрешность работы СУРТ, остатки незабора, заливка двигателя), определяемые условием безаварийного выключения двигателей. На последней ступени выключение двигателя производится традиционным способом в момент решения траекторной задачи.
- 2) Управление движением центра масс и расходованием топлива нижних ступеней производится таким образом, чтобы обеспечить решение заданной задачи к моменту полной выработки топлива, формируемому системой СУРТ. Момент полной выработки топлива, в свою очередь, формируется на основе использования информации датчиков уровней о текущих запасах топлива.
- 3) Гарантийные запасы топлива на нижних ступенях определяются погрешностью определения момента полной выработки топлива.
- 4) Гарантийные запасы последней ступени определяются суммарным воздействием на траекторные параметры ракеты возмущений всех ступеней. Возмущения суммируются как случайные величины.

Данная стратегия управления выключением двигателей ступеней по сравнению с традиционной позволяет уменьшить суммарные по всем ступеням гарантийные запасы топлива.

Эффект повышения энергетических характеристик здесь определяется тем обстоятельством, что в большей своей части резервирование гарантийных запасов на ракете производится из условия компенсации суммарного по ступеням воздействия случайных возмущений на конечные значения траекторных координат ракеты, тогда как при управлении выработкой топлива по функционалу приходится посредством гарантийных запасов парциальным образом парировать влияние случайных от ступени к ступени траекторных возмущений.

При полной выработке топлива возрастают трудности выполнения ограничений на размеры районов падения отработанных ступеней: в случае, когда управление движением центра масс ракеты производится без учета текущей информации о расходовании топлива, дополнительный разброс скорости ракеты в момент разделения ступеней, возникающий из-за полной выработки топлива, в реальных условиях полета

(при случайных отклонениях удельной тяги и др.) приводит к значительному увеличению разброса координат точки падения отработанной ступени. Поэтому при управлении расходом топлива приходится решать дополнительную задачу о прогнозировании конечного состояния траекторных координат в момент полной выработки топлива на ступени с тем, чтобы система управления ракетой могла обеспечить приведение точки падения отработанной ступени в заданный район – посредством корректирования (по результатам прогноза) процесса управления ориентацией вектора скорости.

В данном случае в системе СУРТ помимо управления коэффициентом соотношения расходов окислителя и горючего через ЖРД, обеспечивающего одновременность выработки окислителя и горючего, производится определение моментов окончания компонент топлива.

### **3. Анализ наиболее критичных режимов работы ЖРД в контуре систем управления тягой и расходом топлива**

При управлении тягой и расходом топлива в современных РН актуальным является анализ наиболее критичных режимов работы ЖРД. На основании такого анализа формулируются требования к этим системам, выполнение которых позволяет исключить критические режимы, и задача управления, обеспечивающая выполнение требований безаварийного функционирования ЖРД.

Исследования, проведенные КБ «Энергомаш» для двигателя РД 191, показали значительное влияние входных давлений компонентов на соотношение компонентов топлива на режимах глубоко дросселирования (<30% по тяге). Изменение давления окислителя на входе в двигатель на  $+1 \text{ кгс/см}^2$  соответствует изменению тяги на 0.2% и соотношения компонентов на 1.82%, а изменение давления горючего на входе в двигатель на  $+1 \text{ кгс/см}^2$  соответствует изменению тяги на  $-0.06 \%$  и соотношения компонентов на 1.54% от нормальных величин [2].

Сочетание высоких входных давлений окислителя и горючего на низких режимах работы двигателя (27%) приводят к существенному росту значения соотношения расходов компонента по сравнению с номинальной величиной.

Подобное явление возникает на РН блочной компоновки (Ангара А5) для двигателя центрального блока, в циклограмме работы которого предусмотрен эффективный в плане энергетики режим глубокого дросселирования (30%) и с последующим возвращением на основной режим 100%-ой тяги.

Для парирования существенного роста  $K_m$  на режиме глубоко дросселирования в алгоритм управления двигателем вводится поправка на изменение  $K_m$  с учетом изменения входных давлений компонентов топлива. Величина изменения определяется косвенно: по информации об измеряемом давлении наддува в подушках баков, продольной перегрузке, уровню столба жидкости в баках и плотности компонентов топлива [3]. Непрерывная информация о текущем уровне жидкости в баке может быть сформирована в алгоритме системы СУРТ с использованием дискретных датчиков измерения.

Еще одним возможным средством своевременного парирования роста  $K_m$  является способ регулирования  $K_m$  на основе измерения расходов компонентов топлива датчиками расходов, установленными в магистралях двигателя. Такой способ широко используется в системах управления расходом топлива семейства ракет-носителей «Союз».

По результатам моделирования и огневых испытаний РД191 на некоторых образцах этого двигателя была выявлена склонность к возбуждению низкочастотных колебаний по тяге, возникающих под действием команд на уменьшение  $K_m$ . Тенденция к возбуждению таких колебаний и их амплитуда увеличиваются с уменьшением расхода окислителя, то есть с уменьшением суммарного расхода и уменьшением коэффициента  $K_m$  соотношения расхода компонентов топлива.

Для снижения вероятности возбуждения низкочастотных колебаний целесообразно использовать ряд алгоритмических мер ограничительного характера, не допускающих чрезмерного снижения расхода окислителя двигателем на этом участке.

В режиме глубокого дросселирования ЖРД по тяге возникает задача выбора алгоритма управления коэффициентом соотношения расходов из условия обеспечения устойчивой работы ЖРД. Суть этой задачи заключается в определении программы управления  $K_m$ , обеспечивающей одновременность выработки компонентов топлива к моменту выключения двигателя при ограничении изменения  $K_m$  на участке регулирования, критичном для устойчивой работы ЖРД.

Система управления расходом топлива синхронизирует выработку окислителя и горючего путем изменения коэффициента соотношения компонентов. В системе СУРТ используется принцип терминального управления. В соответствии с этим принципом система управления не стремится к мгновенной компенсации текущего отклонения регулируемой координаты – отклонения соотношения текущих запасов компонентов топлива в баках от заданного значения.

Стратегия управления выбирается таким образом, чтобы величина отклонения линейно уменьшалась до нуля к терминальному моменту (моменту выключения двигательной установки ступени ракеты).

Терминальный принцип управления позволяет существенно сократить диапазон регулирующих воздействий, в данном случае отклонений коэффициента соотношения расходов компонентов топлива через двигатель. Это позволяет снизить отклонения удельной тяги двигателя и связанные с ними потери энергетических характеристик изделия. Кроме того, коэффициент соотношения расходов компонентов топлива (параметр  $K_m$ ) является важнейшей характеристикой двигателя. Удержание соотношения текущих расходов компонентов топлива в заданном диапазоне является условием обеспечения надежного и безаварийного функционирования ЖРД.

## Список литературы

1. В.П. Иванов, В.К. Завадский, А.Д. Гуськов, В.Д. Дишель, И.В. Васягина, В.Д. Кислик. Терминальное управление наведением ракеты-носителя и расходом топлива в режиме его полной выработки // Международная научно-техническая конференция «Системы и комплексы автоматического управления летательными аппаратами», посвященная 100-летию со дня рождения академика РАН Николая Алексеевича Пилюгина. Ч.П. Материалы пленарного заседания (доклады и сообщения)/МИРЭА, 23 апреля 2008г.-М.: ООО «Научно-издательский центр \*Инженер\*». 2008. С. 56-65.
2. Колбасенков А.И., Лёвочкин П.С., Пушкарев Д.С. и др. Настройка современных ЖРД для обеспечения высокой точности при управлении и регулировании // Полет. 2013. № 10. С. 57-60
3. Колбасенков А.И., Пушкарев Д.С., Семенов В.И. и др. Влияние входных давлений компонентов при работе двигателя на режиме дросселирования // Полет. 2013. № 11. С. 34-36.