

УДК 681.533.38

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДАМИ ТОПЛИВА КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОГО РАЗГОННОГО БЛОКА

©2011 В. П. Иванов¹, И. С. Партола²¹Институт проблем управления Российской академии наук им. В.А. Трапезникова, г. Москва²Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева, г. Москва

Рассматривается принципиально новая система управления расходом топлива для криогенного разгонного блока. Задачей системы является минимизация остатков топлива в баках. Решение задачи обеспечивается путём изменения соотношения секундных расходов компонентов топлива. Использование информации с дискретных датчиков уровня топлива в баках обеспечивает парирование погрешностей заправки, измерения секундных расходов компонентов топлива и исполнительных органов двигателя. Математическое моделирование подтвердило эффективность системы.

Управление расходом топлива, двигательная установка, математическое моделирование, измерительный тракт.

Кислородно-водородный разгонный блок тяжёлого класса

В 2009 году в соответствии с Федеральной космической программой в КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева начата разработка **кислородно-водородного разгонного блока тяжёлого класса (КВТК)** [1]. Разгонный блок КВТК позволит существенно повысить энергетические характеристики ракеты космического назначения (РКН) тяжёлого класса «Ангара-А5» и расширить её возможности по осуществлению запусков космических объектов на высокоэнергетические орбиты и траектории.

Разгонный блок КВТК представляет собой одноступенчатый ускоритель, предназначенный для одиночных, групповых и попутных запусков космических аппаратов. В состав РБ КВТК входят несущий бак горючего (водород), подвесной бак окислителя (кислород), межбаковый и приборный отсеки, двигательная установка с двигателем безгенераторной схемы РД-146Д, бортовая система управления, осуществляющая, в частности, функции управления ДУ и расходом топлива.

Масса полезной нагрузки КВТК на геостационарной орбите - 4600 кг, на геопереходной орбите ($v_{хар} = 1500$ м/с) - 7500 кг. Заправляемая масса топлива КВТК - 19,6 тонны. Двигательная установка РБ КВТК разработана с использованием опыта разработки и эксплуатации кислородно-водородного разгонного блока 12КРБ. Тяга двигателя - 73,5 кН (7500 кгс). Существенными отличиями программы полета КВТК от прототипа 12КРБ являются длительный период выведе-

дения полезной нагрузки (до 9 часов против 6 минут) и многократный (до 5 раз) запуск маршевого двигателя в полёте. Усложнение программы полёта определяет конструктивные особенности двигательной установки разгонного блока КВТК по сравнению с прототипом [1].

К новым системам и техническим решениям, применённым в двигательной установке разгонного блока КВТК, относится, в частности, комбинированная система контроля уровня и расхода топлива (СКУРТ), обеспечивающая одновременное опорожнение топливных баков. Заданный алгоритмом СКУРТ коэффициент соотношения секундных расходов компонентов топлива в паузах между срабатываниями датчиков прохождения уровня в баках поддерживается с использованием результатов измерения секундных расходов кислорода и водорода и температуры окислителя [2].

Задачи управления расходом топлива разгонного блока

Система контроля уровня и управления расходом топлива (СКУРТ) разгонного блока предназначена для дистанционного контроля уровней топлива в баках и формирования управляющих команд на средства регулирования секундного расхода компонентов топлива в процессе полета разгонного блока. Кроме того, её целью является определение положения уровня топлива в баках в процессе стоянки заправленного изделия при подготовке на стартовом комплексе.

Существует 2 варианта дистанционного контроля СКУРТ уровней топлива в баках [3]:

1. Измерение секундного объемного расхода окислителя и горючего через двигатель (как правило, непрерывное).

2. Измерение уровня топлива в баке (как правило, дискретное).

В первом варианте целью является обеспечение номинального массового соотношения секундных расходов компонентов топлива. Таким образом, обеспечиваются требуемые характеристики двигателя, а также повышение его надежности.

Во втором варианте основными задачами управления расходом топлива являются синхронизация опорожнения баков окислителя и горючего и вычисление (прогноз) момента опорожнения топливных баков.

Целью управления в обоих случаях является обеспечение минимальных остатков топлива, то есть конечной массы изделия. Вычисление управляющих команд на органы регулирования двигателя производится системой управления разгонного блока по специальному алгоритму. Алгоритм, кроме решения основной задачи СКУРТ, обеспечивает диагностику нештатных ситуаций в системе и их парирование внутренними средствами системы.

Первый вариант СКУРТ характерен для разгонных блоков с многократным запуском маршевого двигателя в полёте. Для регулирования соотношения массовых секундных расходов компонентов топлива K_m в системе РСК используются датчики объёмных секундных расходов компонентов топлива, установленные в магистралях подачи. Особенностью кислородно-водородных двигателей ([1], [4]) является существенное взаимовлияние процессов изменения тяги (суммарного расхода топлива через двигатель) и коэффициента соотношения массовых расходов компонентов топлива (параметра K_m). Динамическая модель водородного двигателя характеризуется существенной нелинейностью зависимостей изменений расходов компонентов через двигатель от управляющих воздействий по тяге и параметру K_m и внешних факторов. Определение фактических значений коэффициентов этих зависимостей (уравнений влияния) для конкретного экземпляра двигателя по результатам его испытаний является достаточно сложной задачей. Значения таких коэффициентов существенно отличаются для различных экземпляров двигателя и претерпевают существенное изме-

нение при изменении режимов работы двигателей. Указанные особенности подтверждаются опытом эксплуатации прототипа КВТК - разгонного блока 12КРБ [1]. Поскольку датчики расходов определяют объёмные расходы компонентов, то для оценки параметра K_m должна производиться температурная коррекция показаний таких датчиков. Проведение такой коррекции связано с введением в алгоритм управления расходом топлива ряда констант, при определении которых возникают дополнительные погрешности регулирования. Для уменьшения таких погрешностей приходится учитывать зависимость плотности компонентов не только от температуры, но и от давления.

В системах управления расходом топлива, оснащённых датчиками уровня топлива в баках, используется прямая информация о запасе топлива в баках. Достаточно хорошо зарекомендовали себя датчики уровней с чувствительными элементами индуктивного и ёмкостного типов. Имеется достаточно большой опыт эксплуатации датчиков уровней ёмкостного типа для измерения уровней в баках жидкого кислорода. Измерения в жидком водороде ёмкостными датчиками уровней производились на центральном блоке ракеты-носителя «Энергия» [1]. Проведенные летные испытания подтвердили нормальное функционирование указанных датчиков. К недостаткам СКУРТ с непосредственным измерением уровня топлива в баках можно отнести наличие нерегулируемого интервала, который может составлять от 10 до 20% полного времени работы системы, и невозможность контроля мгновенных значений параметра K_m . В подобных СКУРТ определяется дискретная производная запаса топлива по времени по измерениям двух смежных пар измерительных точек датчиков уровней. Оценка производной производится с погрешностью тем большей, чем выше уровень погрешностей датчиков уровней. Наличие слоя паровых включений у поверхности криогенной жидкости, особенно водорода, приводит к повышенным погрешностям измерения и регулирования.

Решение задач управления расходом топлива на криогенном разгонном блоке должно выполняться с учётом особенностей его функционирования. В частности, особенностью кислородно-водородных двигателей является существенная зависимость

удельного импульса от соотношения массовых секундных расходов компонентов топлива - параметра K_m . В этом случае изменение параметра K_m в процессе регулирования опорожнения баков, потребное для обеспечения одновременной выработки окислителя и горючего, может вызывать заметное снижение удельного импульса двигательной установки, что, в свою очередь, приведет к потерям в энергетических характеристиках изделия. В связи с указанной особенностью возникает задача выбора оптимальной программы изменения параметра K_m при управлении выработкой компонентов топлива, исходя из максимизации критерия, характеризующего энергетические характеристики изделия (например, конечного значения продольной составляющей кажущейся скорости) [2].

Объединение непрерывного и дискретного принципов измерения секундного расхода компонентов топлива в единой комбинированной системе позволяет соединить преимущества рассмотренных выше типов систем и избавиться от их недостатков. Данный подход наиболее актуален при управлении расходом топлива в кислородно-водородной двигательной установке. В этом случае при оценке производной запаса компонентов топлива по времени можно значительно снизить влияние на результат регулирования погрешностей измерения датчиками уровней текущих запасов водорода, а также погрешностей расчётных зависимостей плотности водорода от температуры и давления. Положительный эффект достигается за счет комбинирования в алгоритме управления информации от двух независимых источников – датчиков уровня топлива и расходомера.

Наличие датчиков уровня топлива позволяет также исключить из гарантийного запаса топлива составляющую, предназначенную для компенсации погрешности заправки рабочего запаса топлива в баки.

Результатом использования комбинированной системы управления расходом топлива является снижение гарантийных запасов топлива, входящих в конечную массу разгонного блока.

Состав комбинированной системы управления расходом топлива КВТК

Система контроля уровня и управления расходом компонентов топлива (СКУРТ) разгонного блока КВТК включает в себя систему регулирования соотношения расходов компонентов топлива (РСК) непрерывного типа и дискретный канал измерения уровней топлива в баках [2]. Система состоит из следующих функциональных блоков (рис. 1):

1. Непрерывный измерительный тракт:

1.1. датчики секундных расходов компонентов топлива (ДРО и ДРГ), установленные в магистралях подачи;

1.2. усилительно-преобразовательное устройство (УПДР) сигналов с ДРО и ДРГ, преобразующее сигналы с датчиков в цифровой код N_o и N_g , соответствующий измеренной величине объемных расходов компонентов топлива;

1.3. датчик температуры окислителя ДТО с усилителем-преобразователем сигнала – УПДТО, формирующий температурную поправку к показаниям датчика расхода жидкого кислорода ΔR_o .

2. Дискретный измерительный тракт:

2.1. дискретные датчики уровней компонентов топлива (ДДУ-О и ДДУ-Г), установленные в баках изделия;

2.2. усилительно-преобразовательное устройство (УПДД) сигналов с дискретных датчиков, формирующее на своих выходах сигнал логической «1» в момент фиксации прохождения уровнем жидкости чувствительного элемента соответствующего датчика.

3. Вычислительное устройство (бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ)), реализующее алгоритмы контроля уровня и управления расходом топлива и формирующее управляющий сигнал U на исполнительный орган СКУРТ.

4. Устройство (блок) управления приводом регулятора соотношения секундных расходов окислителя и горючего.

5. Исполнительный орган системы - регулятор соотношения секундных расходов окислителя и горючего.

Датчики секундных расходов компонентов топлива ДРО и ДРГ представляют собой турбинные расходомеры. Частота вращения турбины расходомера пропорциональна объёмному секунднему расходу жидкости.

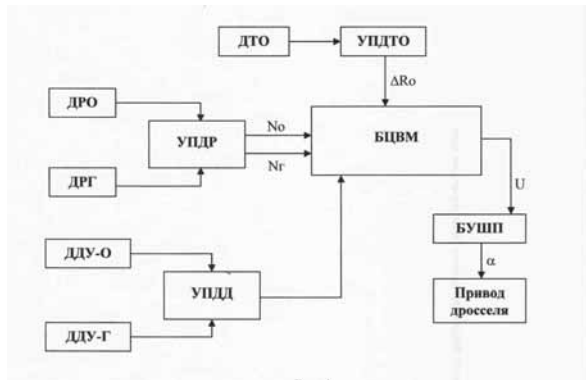


Рис. 1. Блок-схема СКУРТ КВТК

Геометрическая расстановка датчиков уровня дискретного измерительного тракта выбирается исходя из требований точности управления расходом топлива с учетом ограничений, накладываемых конструкцией топливных баков изделия. Для определения уровня в каждой измерительной точке используются три независимых датчика контроля уровня.

Датчики уровня и секундных расходов компонентов топлива соединяются с соответствующими усилительно-преобразовательными устройствами (УПДР и УПДД) с помощью троированных линий связи. Передача сигналов от УПДР и УПДД к БЦВМ осуществляется по интерфейсу RS 485 и по цепи типа «сухой контакт».

Конструкция чувствительного элемента датчика уровня защищена патентом РФ № 2342640 (приоритет от 18.05.2007г.) [5]. Чувствительный элемент представляет собой печатную плату с четырьмя терморезисторами, расположенными с двух сторон чувствительного элемента. Действие датчика основано на существенной разнице теплоёмкости жидкого топлива и парогазовой смеси в баке. Переход чувствительного элемента из жидкости в газовую полость сопровождается изменением его температуры и электрического сопротивления. Количество, расположение и схема соединения терморезисторов обеспечивают повышение быстродействия и точности определения уровня жидкости.

Использование инновационных технологий обеспечило погрешность измерения уровня в контрольных точках в процессе заправки и выработки топлива из баков не хуже $\pm 0,5$ мм при инерционности измерения уровня не хуже 0,5 с.

Алгоритм управления комбинированной системы управления расходом топлива

В комбинированной системе СКУРТ, использующей расходомерную и уровнемерную информации, имеются два контура управления [2]. Малый контур управления обеспечивает поддержание заданного соотношения секундных расходов компонентов топлива из баков на основе расходомерной информации. Требуемое соотношение расходов компонентов формируется в другом, внешнем контуре управления, на основе информации о запасах компонентов топлива, поступающей от дискретных датчиков уровней.

Чувствительные элементы датчиков уровней устанавливаются в баках на заранее выбранных уровнях по высоте бака. В моменты прохождения жидкостью в баках окислителя и горючего заданных уровней происходит срабатывание чувствительных элементов датчиков и в усилителе преобразователя формируется соответствующий сигнал. Текущий запас компонента топлива в баке в момент срабатывания чувствительного элемента датчика уровня (измерительной точки) определяется расстановкой чувствительных элементов датчиков уровней (измерительных точек) по высоте баков.

В алгоритме управления расходом топлива [2] используются значения запасов топлива, отнесенные к принятой начальной величине рабочего запаса компонентов топлива:

$$G_{jM} = \frac{m_{jM}^o}{m_o^o} = \frac{m_{jM}^c}{m_o^c}, \quad \frac{m_o^o}{m_o^c} = K_{m\text{ ном}}$$

где G_{jM} – относительный запас топлива под j -й измерительной точкой дискретного измерительного тракта при номинальных условиях работы двигательной установки;

m_{jM}^o, m_{jM}^c – запас окислителя и горючего соответственно под j -й измерительной точкой дискретного измерительного тракта при номинальных условиях работы двигательной установки;

m_o^o, m_o^c – управляемый запас окислителя и горючего соответственно;

$K_{m\text{ ном}}$ – номинальное соотношение секундных расходов окислителя и горючего.

В момент срабатывания измерительной точки в баке окислителя или горючего фиксируется значение $G_j^{o(z)}$ оценки текущего запаса топлива и формируется рассогласование фактического и номинального запасов топлива, обусловленное наличием случайных возмущений и нештатных ситуаций в работе СКУРТ:

$$\Delta G_j^{o(z)} = G_j^{o(z)} - G_{jm}$$

Разность рассогласований

$$\Delta G_j = \Delta G_j^o - \Delta G_j^z$$

свидетельствует о несинхронности выработки компонентов топлива. Для синхронизации выработки компонентов топлива из баков необходимо изменить коэффициент соотношения расходов компонентов топлива через двигатель (параметр K_m) с помощью малого контура управления, задав ему новое требуемое значение параметра $K_m^{треб}$.

Формирование величины параметра $K_m^{треб}$ должно производиться путем комплексного использования измерительной информации с датчиков уровня и расходомеров с учётом систематической ошибки измерения расходомеров ($\delta K_{ош}$) и ее последующей компенсации.

Относительные отклонения требуемого коэффициента соотношения расходов компонентов вычисляются в соответствии со следующим выражением:

$$\delta K_{треб j} = \frac{\Delta \hat{G}_j}{G_{jm}} - \delta \hat{K}_{ош}$$

$$K_{mj}^{треб} = K_{mnom} (1 + \delta K_{треб j})$$

Так как измерения датчиков уровней могут иметь значительные погрешности случайного характера, то для обеспечения помехозащищенности системы и повышения точности ее работы в алгоритмах формирования параметра $K_m^{треб}$ должны быть предусмотрены возможности фильтрации случайных погрешностей измерения.

Преимущество комбинированной системы управления расходом топлива (СКУРТ) над традиционной для разгонных блоков системой регулирования соотношения секундных расходов компонентов топлива (РСК) показано на рис. 2, 3. На рис.2 показаны результаты математического моделирования процесса управления в системе

РСК – начальное рассогласование запасов компонентов топлива, обусловленное погрешностью заправки топливных баков, увеличивается из-за погрешности работы датчиков расхода системы и исполнительных органов двигателя. Величины параметров δK_m (относительное отклонение параметра K_m от номинала) и $\delta K_{дросс}$ (отклонение положения регулятора соотношения расходов компонентов топлива от номинала) определяются только ошибками расходомеров и неточностью введения температурной коррекции, в результате параметр K_m мало отличается от номинального значения.

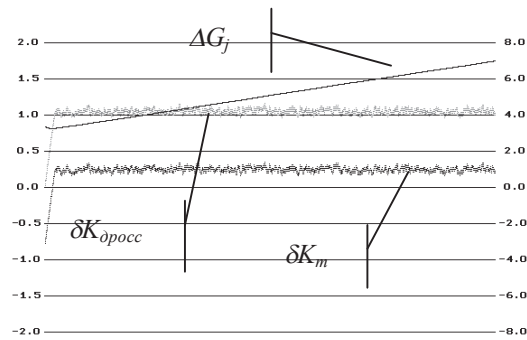


Рис. 2. Изменение параметров регулирования расходом топлива системой РСК

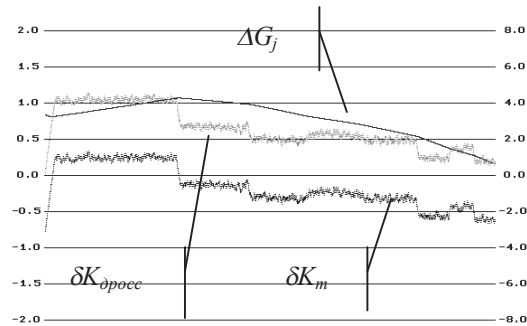


Рис. 3. Изменение параметров регулирования расходом топлива системой СКУРТ

В комбинированной системе (рис. 3) после прохождения нескольких верхних точек начинается формирование управления приводом регулятора соотношения секундных расходов компонентов топлива с использованием показаний уровнемеров. В результате обеспечивается практически полное устранение начального рассогласования запасов компонентов топлива и компенсация

погрешности работы исполнительных органов двигателя.

Недостатком комбинированной системы является увеличение отклонения параметра K_m от номинала, то есть дополнительный диапазон регулирования секундных расходов компонентов топлива. Как указано выше, это может оказать отрицательное влияние на удельные параметры двигателя.

Низкочастотные колебания параметров δK_m и $\delta K_{дросс}$ объясняются погрешностями оценки регулируемой величины относительного запаса топлива из-за случайных ошибок измерения датчиков уровней.

Предварительные результаты статистического моделирования показывают, что при переходе от автономной системы РСК к комбинированной системе СКУРТ показатели точности по конечному рассогласованию (разности) относительных остатков компонентов могут быть улучшены с величины 1,8% до $0,2 \div 0,3\%$ от номинальных рабочих запасов топлива.

Проблемные вопросы разработки СКУРТ для криогенных разгонных блоков

Комбинированная система контроля и управления расходом топлива имеет ряд несомненных преимуществ по сравнению с традиционными системами РСК и СУРТ. Однако создание СКУРТ требует решения ряда новых проектно-конструкторских задач. К ним следует отнести:

1. Компенсация дополнительной погрешности измерения уровня кипящего криогенного компонента топлива, связанной с наличием паровых включений.

2. Восстановление уровня топлива в датчике уровня после длительного периода пассивного полёта разгонного блока.

3. Исключение кипения криогенного топлива в датчике уровня.

4. Существенная зависимость удельного импульса кислородно-водородного двигателя от соотношения массовых секундных расходов компонентов топлива.

5. Выбор материалов чувствительных элементов датчиков уровня, работоспособных в среде жидкого водорода.

Выводы

1. Наилучшие характеристики управления расходом топлива криогенного разгонного блока достигаются в рамках комбинированной системы управления расходом топлива, сочетающей управление по показаниям расходомеров с коррекцией параметров процесса управления по измерениям датчиков уровней, установленных в баках.

2. Применение комбинированной системы управления расходом топлива существенно снижает уровень гарантийных запасов компонентов топлива, обусловленных погрешностями дискретного и непрерывного каналов измерения.

3. Использование комбинированной СКУРТ увеличивает рабочие запасы топлива и повышает энергетические характеристики разгонного блока.

4. Применение комбинированной СКУРТ для криогенного разгонного блока требует решения ряда принципиально новых научно-исследовательских и конструкторских задач.

Библиографический список

1. Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева [Электронный ресурс]: Официальный сайт / ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. – 2005. – Электрон. дан. on-line. – Загл. с титул. экрана. URL: <http://www.khrunichev.ru> (Дата обращения 05.02.2011).

2. Вакушин, В.А. Особенности работы системы контроля и управления расходом топлива разгонного блока с водородной двигательной установкой [Текст] / В.А. Вакушин, В.К. Завадский, В.П. Иванов [и др.] // международ. науч. журн. Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – №3(59). – С. 103 – 107.

3. Пневмогидравлические системы двигателей установок с ЖРД [Текст] / Д.А. Полухин, Н.Н. Миркин, В.М. Орещенко [и др.] – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

4. Андриенко, А.Я. Системы управления расходом топлива жидкостных ракет. История создания и пути развития [Текст] / А.Я. Андриенко, В.П. Иванов, Ю.П. Портнов-Соколов // Космонавтика и ракетостроение Королёв: ЦНИИМаш, 1999. – №15. – С. 133-137.

5. Пат. 2342640 Российская Федерация, обладатель ОАО «Авангард». - № МПК G01F 23/00. Датчик контроля уровня жидкости [Текст] / Вакушин В.А., Гончар И.И., Зубов И.Е.[и др.]; заявитель и патенто- 2007118588/28; заявл. 18.05.2007; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36. – 6 с.: ил.: 3.

THE COMBINED FUEL DRAINING CONTROL SYSTEM FOR LIQUID OXYGEN AND LIQUID HYDROGEN UPPER STAGE

©2011 V. P. Ivanov¹, I. S. Partola²

¹The Russian Academy of Sciences Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov

²The Khrunichev State Research and Production Space Centre Design Bureau “Salut”

A totally new fuel draining control system for cryogenic upper stage is discussed at the article. The system function is tank fuel remains minimization. The task solution is provided by fuel components drain levels ratio changing. A using of information about fuel level in tanks from discrete sensors provides the parry infelicities of tank filling, fuel components consumption velocity measurement and the engine control devices. A mathematic simulation confirmed the system efficiency.

Fuel draining control, engine power plant, mathematic simulation, measurement canal.

Информация об авторах

Иванов Владимир Петрович, доктор технических наук, заведующий сектором ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 117997, ГСП-7, В-342, Москва, ул. Профсоюзная, 65. Тел.: (495) 334-8760, факс. (495) 334-8760. E-mail: snv@ipu.ru. Область научных интересов – терминальные системы управления.

Партола Игорь Станиславович, кандидат технических наук, начальник отделения КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева; 121087, Москва, ул. Новозаводская, 18. Тел.: (499) 749-9682, факс: (499) 749-9598. E-mail: salut@khrunichev.com. Область научных интересов – методология проектирования двигательных установок ракет.

Ivanov Vladimir Petrovich, doctor of technical sciences, the Russian Academy of Sciences Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov laboratory chief, 117997, GSP-7, B-342, 65, Profsoyuznaya str., Moscow, Russian Federation. Phone: (495) 334-87-60, (495) 334-87-60. E-mail: snv@ipu.ru. Area of research: terminal control systems.

Partola Igor Stanislavovich, candidate of technical sciences, the Khrunichev State Research and Production Space Centre Design Bureau “Salut” department chief; 121087, 18, Novozavodskaya str., Moscow. Phone: (499) 749-96-82, fax: (499) 749-95-98. E-mail: salut@khrunichev.com. Area of research: launch vehicles engine systems development methods.