

# ВАРИАНТЫ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СУРТ РБ КВТК

## **В.К. Завадский**

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

## **В.П. Иванов**

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

## **Е.Б. Каблова**

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

## **Л.Г. Кленовая**

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

## **А.И. Чадаев**

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

**Ключевые слова:** бортовой алгоритм управления, настраиваемая модель запаса топлива, комплексирование расходомерной и уровнемерной информации, рекуррентный МНК фильтр.

**Аннотация:** Предложены перспективные варианты структуры и алгоритмов системы управления расходом топлива кислородно-водородного разгонного блока тяжелого класса, использующей непрерывную уровнемерную и расходомерную измерительную информацию об изменении запасов компонентов топлива.

## **1. Введение**

Тема доклада относится к бортовым системам управления, а именно к системам управления расходом топлива (СУРТ) жидкостных разгонных блоков (РБ), использующих в качестве датчиков в топливной системе одновременно непрерывные датчики уровня и датчики расходов компонентов топлива («вертушки»). Инновационную комбинацию непрерывных датчиков уровня с расходомерами впервые в отечественной практике построения систем СУРТ ракетных средств выведения предполагается использовать на разрабатываемом в КБ «Салют» кислородно-водородном разгонном блоке тяжелого класса – РБ КВТК.

Задачами СУРТ являются обеспечение одновременности окончания компонентов топлива (окислителя и горючего) и своевременная выдача сигнала об их окончании. Точность, с которой решаются указанные задачи, существенно влияет на энергетические возможности РБ и безопасность их эксплуатации. Поэтому к точностным и надежностным характеристикам датчиков СУРТ предъявляются чрезвычайно высокие требования [1].

Эффективным средством повышения точности работы бортовых систем является фильтрация, основанная на осреднении избыточной измерительной информации [2]. Источниками избыточности информации служат традиционно применяемое в ракетной технике троирование датчиков (структурная избыточность) и наличие функциональной связи между измерениями, поступающими в систему в различные моменты времени (функциональная избыточность, частным случаем которой является структурная избыточность). Предлагаемые в докладе варианты повышения точности и надежности работы СУРТ также основаны на возможности взаимного оценивания (осреднения) погрешностей при комплексировании избыточной измерительной информации [3].

Аппаратный состав проектируемой системы представлен на рис. 1.

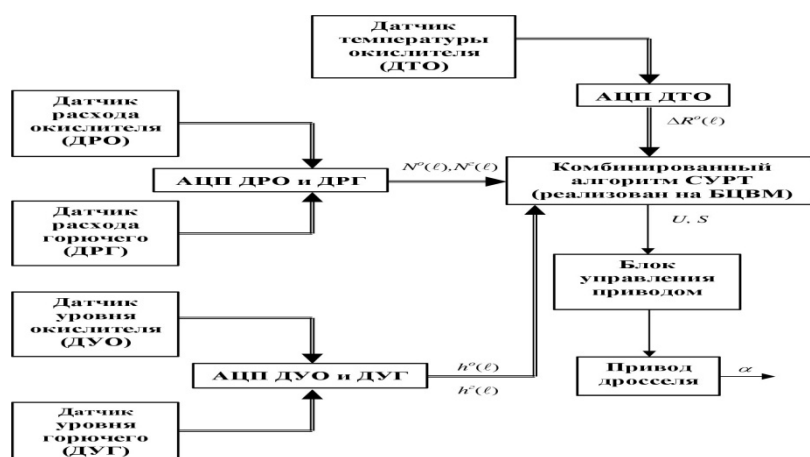


Рис. 1. Блок-схема измерительного и исполнительного трактов СУРТ РБ КВТК.

Главной особенностью рассматриваемого проекта системы является использование в ней непрерывных датчиков уровня. Во всех отечественных системах СУРТ до настоящего времени для измерения запасов топлива использовались релейные сигнализаторы прохождения заданных уровней («измерительные точки»), построенные на различных физических принципах фиксации моментов перехода чувствительных элементов датчиков из жидкого компонента топлива в газ наддува бака [1, 3]. Особенным также является само использование на разгонном блоке датчиков уровня. На РБ, как правило, используются системы РСК регулирования соотношения  $k_m$  массовых расходов компонентов топлива. Поддержание номинального значения коэффициента  $k_m$  в таких системах основывается на измерениях датчиков расходов («вертушек»), установленных в магистралях подачи топлива. Дополнительно отметим, что потенциальная точность измерения запасов компонентов топлива по уровнемерной информации на РБ КВТК существенно снижается в связи с размерами и сплюснутой чечевицеобразной формой бака окислителя (имеющего диаметр 4 м. при высоте в 2 м.) и отсутствием гидродинамических успокоителей колебаний уровня жидкости в обоих баках, традиционно используемых совместно с дискретными уровнемерами.

## 2. Комбинированный алгоритм управления с одной настраиваемой моделью суммарного запаса топлива

Большинство современных отечественных алгоритмов управления СУРТ с дискретными уровнемерами содержат в своей структуре настраиваемую модель суммарного запаса топлива. В моменты срабатывания -х «измерительных точек» в баках окислителя и горючего фиксируются значения  $G_j^{o(r)} = G_k$  формируемой в каждом  $k$ -м элементарном цикле работы БЦВМ (длительностью  $t_m \approx 0,033$  с.) оценки текущего относительного (в долях нормирующего запаса  $G_{ном}$ ) запаса суммарного (окислитель плюс горючее) топлива [1, 3]:

$$(1) \quad G_k = G_{k-1} - R \cdot dG_{ном} \cdot (1 + \lambda_{j-1}).$$

Здесь  $R \cong \dot{m}/\dot{m}_{ном}$  – бортовая оценка по инерциальной информации [1, 3] текущего относительного режима расходования двигателем суммарного топлива,  $dG_{ном}$  – номинальный относительный запас топлива, вырабатываемый в элементарном цикле работы БЦВМ,  $\lambda_j$  – параметр модели текущего суммарного запаса топлива (1), влияющий на темп списывания модельного запаса. Параметр  $\lambda_j$  настраивается из условия совпадения модельного и фактического запаса в терминальный момент окончания топлива по расогласованиям

$$(2) \quad \Delta G_j^{o(r)} = G_j^{o(r)} - G_{ном j}$$

между модельными  $G_j^{o(r)}$  и номинальными  $G_{ном j}$  значениями относительного запаса в моменты срабатывания уровнемеров в соответствии со следующим итеративным алгоритмом [1, 3]:

$$(3) \quad \lambda_j = \lambda_{j-1} + \Delta \lambda_j, \Delta \lambda_j = K^o \cdot \Delta \lambda_j^o + K^r \cdot \Delta \lambda_j^r, \Delta \lambda_j^{o(r)} = A_j \cdot (B_j \cdot \Delta G_j^{o(r)} - \Delta G_{j-1}^{o(r)}).$$

Поправки  $\Delta \lambda_j^{o(r)}$  к оценкам относительных отклонений расходов компонентов дополнительно используются для вычисления управляющих воздействий на изменение  $\Delta \delta k_j$  относительного отклонения от номинала  $\delta k_j$  коэффициента соотношения расходов компонентов топлива, задающих требуемые значения коэффициента  $k_m = k_{m ном} \cdot (1 + \delta k_j)$  для системы РСК и направленных на синхронизацию выработки компонентов:

$$(4) \quad \delta k_j = \delta k_{j-1} + \Delta \delta k_j, \Delta \delta k_j = K_y \cdot (\Delta \lambda_j^r - \Delta \lambda_j^o).$$

Здесь  $K^{o(r)}$ ,  $K_y$ ,  $A_j, B_j$  – константы алгоритма.

Для рассматриваемой задачи синтеза алгоритма управления характерна высокая степень неопределенности априорной информации о статистических характеристиках ошибок оценивания запасов компонентов топлива непрерывными уровнемерами, усугубляемая отсутствием гидродинамических успокоителей колебаний уровней жидких компонентов топлива, неизбежно возникающих на активных участках полета РБ. После преобразования с учетом формы бака уровнемерной информации в информацию о текущем запасе компонента топлива  $G_i^{o(r)}$ , полезная составляющая зашумленного колебаниями уровня преобразованного сигнала  $G_i^{o(r)}$  будет изменяться линейно в силу работы системы РСК. Таким образом данная ситуация вполне соответствует условиям эффективного применения МНК фильтра [2] (в форме фильтра Калмана), формирующего оценки текущего запаса  $\hat{G}_i^{o(r)}$  компонента топлива и его дискретной производной  $d\hat{G}_i^{o(r)}$  (приращения за такт измерения в  $\approx 0,25$  с.), оптимальные по критерию метода наименьших квадратов (МНК оценки):

$$(5) \quad \hat{G}_i^{o(r)} = \hat{G}_{i-1}^{o(r)} + d\hat{G}_{i-1}^{o(r)} + \alpha_i \cdot (G_i^{o(r)} - (\hat{G}_{i-1}^{o(r)} + d\hat{G}_{i-1}^{o(r)})),$$

$$(6) \quad d\hat{G}_i^{o(r)} = d\hat{G}_{i-1}^{o(r)} + \beta_i \cdot (G_i^{o(r)} - (\hat{G}_{i-1}^{o(r)} + d\hat{G}_{i-1}^{o(r)})),$$

Оптимальные значения коэффициентов  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  явным образом выражаются через порядковые номера  $i$  измерений уровней компонентов на интервале фильтрации [2].

Для эффективного подавления низкочастотных гармонических помех фильтром (5), (6) требуется увеличивать длительность интервалов фильтрации до величин, составляющих несколько десятков максимальных периодов возмущений. С учетом этого и из соображений сохранения преимущества в использовании отработанных и хорошо зарекомендовавших себя алгоритмических решений предлагается следующий способ обработки и использования непрерывной уровневой информации. Диапазон изменения относительного суммарного запаса топлива с помощью задания массива констант  $G_{ном j}$ , являющегося аналогом массива  $G_{ном j}^{o(r)}$ , задающего расстановку «измерительных точек» в баках компонентов, делится на интервалы фильтрации, реализуемой с помощью фильтра (5), (6). В малых тактах работы БЦВМ, в которых модельный запас (1)  $G_k$  достигает пороговых значений  $G_{ном j}$ :  $G_k \leq G_{ном j}$  по аналогии с (2) фиксируются рассогласования между модельным запасом (1) и отфильтрованной уровневой оценкой (5) текущего запаса компонента топлива

$$(7) \quad \Delta G_j^{o(r)} = G_k - \hat{G}_i^{o(r)},$$

которые в дальнейшем используются для настройки модели и формирования управляющих команд в соответствии с соотношениями (3), (4).

Укрупненная блок-схема описанного алгоритма представлена на рис.2.

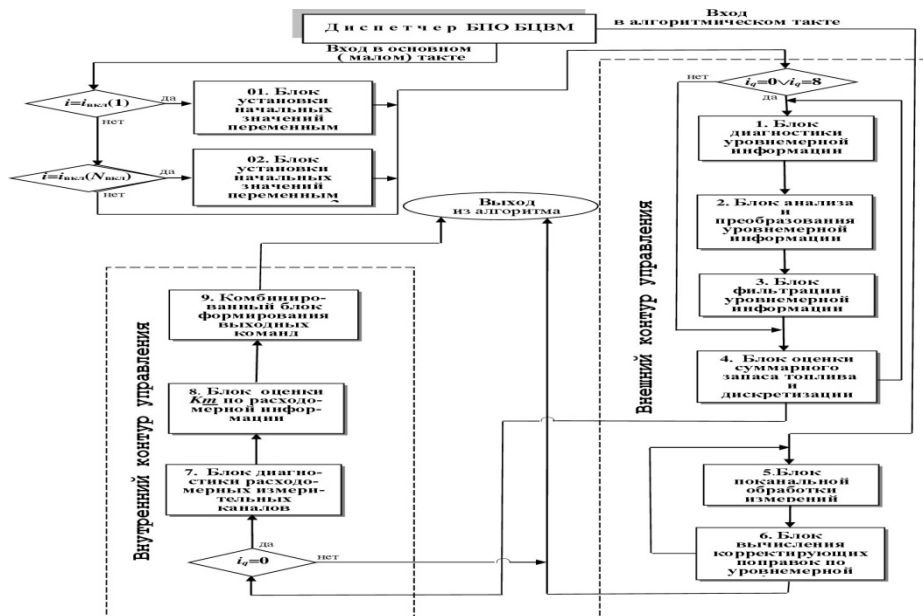


Рис. 2. Общая блок-схема алгоритма СУРТ РБ КВТК

Значительная часть приведенного на блок-схеме варианта бортового алгоритма связана с диагностикой аппаратуры и реконфигурацией алгоритма в нештатных ситуациях. В частности, в алгоритме предусмотрена возможность использования бортовой оценки по инерциальной информации текущего режима расходования двигателем суммарного топлива для компенсации отказа одной из «вертушек». При полном отказе расходомерного тракта производится переход на управление по

уровнемерной информации и, наоборот, при отказе уровнемеров система РСК используется в автономном режиме.

### 3. Комбинированный алгоритм управления с двумя настраиваемыми моделями запасов окислителя и горючего

В приведенном выше варианте алгоритма управления расходомерная информация используется только во внутреннем контуре управления для стабилизации заданных значений коэффициента  $k_m$ , сформированных во внешнем контуре терминального управления по уровнемерной информации. Ниже представлен более совершенный перспективный вариант структуры терминального алгоритма управления с двумя настраиваемыми моделями запасов для каждого из компонентов топлива (8):

$$(8) \quad G_k^{o(r)} = G_{k-1}^{o(r)} - R^{o(r)} \cdot t_m \cdot (1 + \lambda_{j-1}^{o(r)}), \quad G_k^c = K^o \cdot G_k^o + K^r \cdot G_k^r,$$

$$(9) \quad \Delta G_j^{o(r)} = G_k^{o(r)} - \hat{G}_i^{o(r)},$$

$$(10) \quad \lambda_j^{o(r)} = \lambda_{j-1}^{o(r)} + \Delta \lambda_j^{o(r)}, \quad \Delta \lambda_j^{o(r)} = A_j^{o(r)} \cdot (B_j \cdot \Delta G_j^{o(r)} - \Delta G_{j-1}^{o(r)}),$$

$$(11) \quad \delta k_j = \delta k_{j-1} + \Delta \delta k_j, \quad \Delta \delta k_j = G_k^o / G_k^r - (1 + \delta k_{j-1}).$$

В этом алгоритме управляющие команды (11), направленные на синхронизацию выработки компонентов топлива, формируются на основе совместного использования (комплексирования [4]) расходомерной  $R^{o(r)}$  и уровнемерной  $\hat{G}_i^{o(r)}$  информации, уточняемой фильтром (5),(6). Суммарный запас топлива  $G_k^c$  в (8) используется вместо  $G_k$  для дискретизации фильтрации и терминального управления во внешнем контуре.

### Список литературы

1. Вакушин В.А., Жуков В.А., Завадский В.К., Иванов В.П., Кленовая Л.Г., Каблова Е.Б., Партола И.С. Системы управления расходом топлива перспективных ракет-носителей (принципы построения, отказоустойчивые алгоритмы, технологии обработки бортового обеспечения) // В сб. «Научно-технические разработки ОКБ-23 – КБ «Салют». М.: Воздушный транспорт, 2006. С. 579-592.
2. Завадский В.К., Иванов В.П., Портнов-Соколов Ю.П., Учайкин Н.Н. Бортовая система измерения давления повышенной точности // Датчики и системы. 2002. № 12. С. 3-9.
3. Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Системы управления расходом топлива (назначение, принципы построения, алгоритмы управления) // Материалы 5-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения, Самара 11-15 сентября 2017 г.). Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2017. Т. 1. С. 243-253.
4. Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Комплексирование расходомерной и уровнемерной информации в системах управления расходом топлива // Проблемы управления. 2018. № 4. С. 71-77.