

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ РАСХОДОМЕРНОЙ И УРОВНЕМЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА

В.К. Завадский, В.П. Иванов, Е.Б. Каблова, Л.Г. Кленовая

Предложены способ комплексирования уровнемерной и расходомерной информации и новые алгоритмы управления, позволяющие повысить точность работы системы управления расходом топлива в штатных условиях и при отказах бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: комплексирование информации, фильтрация, точность управления, нештатная ситуация.

ВВЕДЕНИЕ

Тема статьи связана с бортовыми системами управления расходом топлива (СУРТ) жидкостных ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ), где в качестве датчиков в топливной системе одновременно применяются дискретные датчики уровня («измерительные точки») и датчики расхода компонентов топлива (типа «вертушка»). В качестве примеров можно привести топливные системы боковых и центрального блоков активно эксплуатируемой РН «Союз», применяемой, в том числе, и в пилотируемом варианте разрабатываемого в КБ «Салют» кислородно-водородном разгонном блоке тяжелого класса и др.

Задачи СУРТ состоят в обеспечении одновременного окончания рабочих запасов компонентов топлива — окислителя и горючего и своевременной выдачи сигнала об их окончании. Точность, с которой решаются указанные задачи, существенно влияет на потенциальную грузоподъемность РН (РБ) и безопасность их эксплуатации. Поэтому к точностным и надежностным характеристикам датчиков СУРТ предъявляются чрезвычайно высокие требования [1, 2].

Эффективное средство повышения качества работы бортовых систем заключается в применении фильтрации [3], основанной на осреднении избыточной измерительной информации. 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 вре-

мени (функциональная избыточность, частным случаем которой является структурная избыточность). Предлагаемый способ повышения точности совместно применяемых датчиков также основан на возможности взаимного оценивания и осреднения погрешностей при комплексной обработке измерительной информации.

В настоящее время в существующих системах СУРТ такая возможность не используется или используется не полностью, что, по-видимому, связано с существенной разнородностью высокочастотных расходомерных и широкобазных измерений уровня, затрудняющей их комплексирование. Датчики расхода компонентов топлива обычно применяются в системе регулирования соотношения компонентов (РСК), поддерживающей требуемое значение коэффициента соотношения расходов компонентов и образующей внутренний контур СУРТ. Требуемое значение коэффициента соотношения формируется из условия обеспечения синхронизации моментов опорожнения баков во внешнем контуре управления по дискретной широкобазной уровнемерной информации об оставшихся объемах компонентов.

1. СПОСОБ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ УРОВНЕМЕРНОЙ И РАСХОДОМЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Поясним физическую сущность предлагаемого способа комплексирования (совместной обработки) уровнемерной и расходомерной информации на примере топливного бака, содержащего жидкий компонент топлива, подаваемый через питающий трубопровод в двигатель. Вдоль оси бака на задан-

ных уровнях установлены дискретные датчики — «измерительные точки», формирующие сигналы срабатывания в моменты прохождения зеркалом жидкости заданных уровней, соответствующих известным объемным запасам компонента. В питающей магистрали на входе в двигатель установлен датчик расхода компонента — «вертушка», формирующий высокочастотный импульсный сигнал с частотой, пропорциональной объемному расходу компонента.

В дальнейшем условно предполагается, что в полете вместо фиксации в моменты срабатывания «измерительных точек» бортового времени (как это делается на РН «Союз») или значений специальным образом формируемой оценки текущего запаса топлива (производимой на РН «Протон», «Зенит», «Ангара» и др.) в СУРТ фиксируется *суммарное число импульсов*, сформированных «вертушкой» от начала работы системы до момента срабатывания чувствительного элемента.

Суммарное число импульсов (интеграл от расхода) пропорционально объему жидкого компонента, израсходованного через двигатель. Поэтому номинальный начальный (на момент включения системы) объем рабочего запаса компонента и объемы под j -ми «измерительными точками» удобно выражать через расчетно-номинальное число импульсов N_j , сформированных «вертушкой» в интервале времени от момента начала работы системы ($j = 0$) или срабатывания j -й «измерительной точки», $j = 1, \dots, J$, до момента окончания рабочего запаса. Выраженные числом импульсов расходомера рабочие объемы под измерительными точками можно определять непосредственно при холодных стендовых испытаниях или во время специальным образом организованной тарировки баков с суммированием сумм импульсов расходомера и фиксацией указанных сумм в моменты срабатывания «измерительных точек» и в момент окончания рабочего запаса компонента. Для исключения ряда методических погрешностей указанные мероприятия целесообразно проводить с помощью штатной бортовой измерительной аппаратуры (датчиков уровня и расходомеров). Поскольку условия стендовых испытаний отличаются от полетных условий, полученные при испытаниях значения N_j должны быть скорректированы с учетом различия типов (вязкости, плотности) и расходов компонентов, используемых при испытаниях и в полете, расчетных изменений объема из-за изменения среднебаковой температуры компонента в полете и его испарения, расчетной деформации баков под действием наддува и перегрузок и др.

Расчетно-номинальное число импульсов «вертушки» от момента начала работы системы до момента срабатывания j -й «измерительной точки», характеризующее израсходованный объем компо-

нента, представляется выражением $T_j = N_0 - N_j$, $j = 1, 2, \dots, J$.

Обозначим через n_j измеренное (фактическое) число импульсов, зафиксированное в полете от момента начала работы системы до момента срабатывания j -й «измерительной точки», а через $\Delta n_{\text{изм}j}$ — рассогласование между измеренным и расчетно-номинальным числом импульсов, сформированных «вертушкой» в этом интервале времени: $\Delta n_{\text{изм}j} = n_j - T_j$, $j = 1, 2, \dots, J$.

Основными причинами возникновения измеренных рассогласований в полете является ряд случайных факторов (возмущений), ухудшающих точность работы системы:

— отклонение от номинала начального значения объема компонента (связанное с ошибкой заправки компонента, изменением его температуры во время стоянки, разбросом расходов компонента до момента включения системы и др.);

— ошибки измерения объемов под «измерительными точками» (связанные с колебаниями уровня жидкого компонента в полете, ошибками измерения объемов N_j при тарировке, ошибками экстраполяции этих объемов на полетные условия и др.);

— отклонение значения коэффициента связи между измеряемым объемным расходом и частотой следования импульсов с датчика расхода (обусловленное различием характеристик экземпляров расходомеров, применяемых при тарировке и в полете, динамическими погрешностями измерения расхода компонента при его изменении и др.).

Связь между указанными факторами и измеренными рассогласованиями можно определить соотношением, образующим искомую функциональную зависимость между расходомерными и уровнемерными измерениями:

$$\Delta n_{\text{изм}j} = \Delta n_0 + bT_j + \Delta n_{\text{ош}j}, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (1)$$

где Δn_0 — выраженное числом импульсов бортового расходомера начальное отклонение объема компонента от расчетного значения, b — относительное отклонение от расчетного значения частоты следования импульсов бортового экземпляра датчика расхода при известном объемном расходе (ошибка настройки расходомера), $\Delta n_{\text{ош}j}$ — ошибка измерения израсходованного объема компонента, связанная с отклонением объема рабочего запаса компонента под j -й «измерительной точкой» в момент ее срабатывания (с ошибкой измерения уровня).

Ошибки измерения дискретных уровнемеров и ошибки расходомеров — главные факторы, определяющие точность работы СУРТ. Причем основная составляющая ошибки измерения на «измерительных точках», связанная с колебаниями уровня компонента в полете, *одинаково* (с точностью до



знака) действует на объем как *израсходованной*, так и *оставшейся* доли компонента.

Применяя к избыточной системе уравнений (1) (в предположении $\Delta n_{\text{ош } j} = 0$) метод наименьших квадратов (МНК), по совокупности измеренных рассогласований $\Delta n_{\text{изм } j}$ можно сформировать оценки возмущающих факторов $\Delta \hat{n}_{0j}$ и \hat{b}_j :

$$x_j = (A_j^T A_j)^{-1} A_j^T y_j,$$

где $x_j = [\Delta \hat{n}_{0j} \ \hat{b}_j]^T$ — вектор оценок возмущений размерности 2×1 , $y_j = [\Delta n_{\text{изм } 1} \ \Delta n_{\text{изм } 2} \ \dots \ \Delta n_{\text{изм } j}]^T$ —

вектор измерений размерности $j \times 1$, $A_j = \begin{bmatrix} 1 & T_1 \\ \dots & \dots \\ 1 & T_j \end{bmatrix}$ —

матрица размерности $j \times 2$.

Для уменьшения вычислительных затрат МНК-оценки возмущений $\Delta \hat{n}_{0j}$ и \hat{b}_j удобно формировать рекуррентно [3] в форме фильтра Калмана [4], уточняя их по мере накопления измерительной информации о рассогласованиях $\Delta n_{\text{изм } j}$:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{n}_{j/j-1} &= \Delta \hat{n}_{0j-1} + \hat{b}_{j-1} T_j, \\ \Delta \hat{n}_{0j} &= \Delta \hat{n}_{0j-1} + \alpha_j (\Delta n_{\text{изм } j} - \Delta \hat{n}_{j/j-1}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\hat{b}_j = \hat{b}_{j-1} + \beta_j (\Delta n_{\text{изм } j} - \Delta \hat{n}_{j/j-1}), \quad j = 1, 2, \dots, J,$$

где оптимальные по критерию наименьших квадратов значения коэффициентов фильтра Калмана α_j и β_j связаны с параметрами T_j соотношениями:

$$\begin{aligned} \beta_j &= W_j(2, j) = \\ &= \left(j T_j - \sum_{i=1}^j T_i \right) / \left(j \sum_{i=1}^j T_i^2 - \left(\sum_{i=1}^j T_i \right)^2 \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\alpha_j = W_j(1, j) = 1/j - \beta_j \left(\sum_{i=1}^j T_i \right) / j, \quad (4)$$

а начальные условия — нулевые: $\Delta \hat{n}_{00} = 0$, $\hat{b}_0 = 0$.

Здесь $\Delta \hat{n}_{j/j-1}$ — прогноз j -го измерения по $j-1$ измерениям, $\Delta \hat{n}_{0j}$ и \hat{b}_j — оценки возмущений Δn_{0j} и b по j измерениям, а $W_j = (A_j^T A_j)^{-1} A_j^T$.

Отметим, что МНК-оценки возмущений $\Delta \hat{n}_{0j}$, \hat{b}_j сформированы без учета априорной информации о математических ожиданиях (как правило, равных нулю) и дисперсиях этих возмущений и могут быть уточнены с использованием этой информации: $\Delta \hat{n}_{0j} = C_j \Delta \hat{n}_{0j}$, $\hat{b}_j = B_j \hat{b}_j$.

Оптимальные значения коэффициентов C_j и B_j зависят от соотношения дисперсии ошибки априорной оценки D_0 и дисперсий D_j ошибок МНК-оценок возмущения и определяются отношением $D_0 / (D_0 + D_j)$.

При условии некоррелированности ошибок измерения дискретных уровней $\Delta n_{\text{ош } j}$ и постоянства их дисперсии $D_{\Delta n_{\text{ош } j}} = D_\varepsilon$ можно получить [4] явные выражения для ковариационной матрицы ошибок МНК-оценок вектора возмущений x : $K_j = (A_j^T A_j)^{-1} D_\varepsilon$ и, в частности,

$$\begin{aligned} D_{\hat{b}_j} &\rightarrow \infty \text{ для } j = 1; \\ D_{\hat{b}_j} &= j D_\varepsilon / \left(j \sum_{i=1}^j T_i^2 - \left(\sum_{i=1}^j T_i \right)^2 \right) \text{ для } j = 2, \dots, J. \end{aligned} \quad (5)$$

Как и МНК-оценки (2), оценки $\Delta \hat{n}_{0j}$ и \hat{b}_j , уточненные с учетом априорной информации, можно получать рекуррентно [4] по соотношениям, аналогичным соотношениям (2):

$$\begin{aligned} \Delta \hat{n}_{j/j-1} &= \Delta \hat{n}_{0j-1} + \hat{b}_{j-1} T_j, \\ \Delta \hat{n}_{0j} &= \Delta \hat{n}_{0j-1} + \tilde{\alpha}_j (\Delta n_{\text{изм } j} - \Delta \hat{n}_{j/j-1}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\hat{b}_j = \hat{b}_{j-1} + \tilde{\beta}_j (\Delta n_{\text{изм } j} - \Delta \hat{n}_{j/j-1}), \quad j = 1, 2, \dots, J,$$

где $\tilde{\alpha}_j = \tilde{W}_j(1, j)$, $\tilde{\beta}_j = \tilde{W}_j(2, j)$, $\tilde{W}_j = (P^{-1} D_\varepsilon + A_j^T A_j)^{-1} A_j^T$, а P — ковариационная матрица априорных оценок вектора $x_0 = [\Delta \hat{n}_{00} \ \hat{b}_0]^T$ возмущающих факторов: $P = M[x_0 \ x_0^T]$. Здесь и в дальнейшем $M[\cdot]$ — оператор математического ожидания.

С помощью улучшенных оценок возмущений $\Delta \hat{n}_{0j}$ и \hat{b}_j и с учетом зависимости (1) можно сформировать оценки $\Delta \hat{n}_{\text{ош } j}$ фильтруемых (некоррелированных) составляющих ошибок измерения на «измерительных точках»:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{n}_{\text{ош } j} &= \Delta n_{\text{изм } j} - \Delta \hat{n}_{0j} - \hat{b}_j T_j = \\ &= n_j - \Delta \hat{n}_{0j} - T_j (1 + \hat{b}_j). \end{aligned}$$

В итоге улучшенные оценки измеряемых координат объекта управления могут быть представлены соотношениями:

$$\begin{aligned} \hat{N}_j &= N_j (1 + \hat{b}_j) - \Delta \hat{n}_{\text{ош } j} = N_0 (1 + \hat{b}_j) + \Delta \hat{n}_{0j} - n_j, \\ \hat{V}_j &= \dot{V}_{\text{изм } j} / (1 + \hat{b}_j). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь \hat{N}_j — выраженная числом импульсов бортовой «вертушки» улучшенная оценка объема компонента под j -й «измерительной точкой» в момент ее срабатывания, $\dot{V}_{измj}$ — измеренное значение объемного расхода компонента топлива в интервале между $(j-1)$ -й и j -й измерительными точками, \hat{V}_j — улучшенная оценка измерительного сигнала расходомера $\dot{V}_{измj}$.

В соотношении (7) учтено, что оценка ошибки уровнемера по расходомерной информации используется для оценки ошибки оставшегося запаса с противоположным знаком.

2. ВАРИАНТЫ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

Сформированная по комбинированной информации улучшенная оценка (7) объема компонента под j -й «измерительной точкой» \hat{N}_j может использоваться как для повышения точности определения момента окончания компонента, так и для улучшения синхронизации моментов опорожнения баков.

Действительно, признак $\Pi = 1$ окончания компонента естественно формировать в момент t выполнения условия: $\Pi = 1$, если $n(t) - n_j \geq \hat{N}_j$, где $n(t)$ — текущее значение суммы сформированных «вертушкой» импульсов, j — номер последней сработавшей «измерительной точки».

Аналогично, требуемое значение коэффициента $K_{РСКj}$ соотношения объемных расходов для системы РСК естественно формировать из условия равенства требуемого соотношения *объемных расходов* соотношению *объемных запасов* компонентов в момент их измерения, поскольку при выполнении такого условия обеспечивается одновременность окончания компонентов топлива

$$K_{РСКj} = (\hat{N}_j^0 - \Delta n_j^0) / (\hat{N}_j^r - \Delta n_j^r). \quad (8)$$

Здесь \hat{N}_j^0 и \hat{N}_j^r — улучшенные с учетом априорной информации оценки (7) объемов окислителя и горючего под j -ми «измерительными точками» в момент их срабатывания; Δn_j^0 и Δn_j^r — поправки, учитывающие несинхронность срабатывания «измерительных точек» и равные числу импульсов, зафиксированных «вертушкой» в опережающем компоненте между моментом срабатывания j -й точки в этом компоненте и j -й точки в отстающем компоненте (для которого следует положить $\Delta n_j^{0(r)} = 0$).

Как следует из соотношений (7), в интервале времени между моментами срабатывания j -й и $(j+1)$ -й «измерительными точками», а, следовательно, и на всем участке работы СУРТ переменная величина

$$\begin{aligned} \hat{N}(t) &= \hat{N}_j - (n(t) - n_j) = \\ &= N_0(1 + \hat{b}_j) + \Delta \hat{n}_{0j} - n(t) \end{aligned} \quad (9)$$

является оценкой текущего объемного запаса компонента, выраженного числом импульсов бортовой «вертушки». В выражении (9) следует положить $\hat{b}_0 = \Delta \hat{n}_{00} = 0$. Соотношение (9) представляет собой *самонастраивающуюся* модель текущего объемного запаса компонента топлива с двумя переменными параметрами \hat{b}_j и $\Delta \hat{n}_{0j}$, настраиваемыми по комбинированной информации (2), (6) в моменты срабатывания дискретных уровнемеров.

С учетом соотношения (9) алгоритм управления (8) может быть представлен в более общем виде:

$$K_{РСК(t)} = \hat{N}^0(t) / \hat{N}^r(t). \quad (10)$$

В отличие от алгоритма (2), (7) с явным оцениванием ошибки заправки $\Delta \hat{n}_{0j}$, рекуррентный алгоритм оценивания запаса (9) компонента может быть представлен в иной, эквивалентной форме с непосредственным формированием оценки $\hat{N}(t)$ текущего объемного запаса компонента топлива, выраженной числом импульсов расчетно-номинальной «вертушки» и настраиваемой по невязкам между фактическим и номинальным значениями этой оценки в моменты t_j срабатывания дискретных уровнемеров:

$$\begin{aligned} \hat{N}(t) &= \hat{N}_{j-1} - (n(t) - n_{j-1}) \hat{c}_{j-1}, \\ \hat{N}_j &= \hat{N}(t_j) + \alpha_{mj} (\hat{N}(t_j) - N_j), \\ \hat{c}_j &= \hat{c}_{j-1} + \beta_{mj} (\hat{N}(t_j) - N_j), \end{aligned} \quad (11)$$

с начальными условиями $\hat{N}_0 = N_0$, $n_0 = 0$, $\hat{c}_0 = 1$. Здесь $c = (1 + b)^{-1} = f_{расч} / f$ — величина, обратная относительной частоте выходного сигнала бортовой «вертушки» и не равная единице из-за действия ошибки настройки b расходомера.

Можно показать, что оптимальные по модифицированному МНК-критерию (сформированному с учетом дополнительной информации о ковариационной матрице P априорных оценок возмущений) значения весовых коэффициентов α_{mj} и β_{mj} фильтра (11) могут быть вычислены с помощью



соотношений, аналогичных поясняющим соотношениям к формуле (6):

$$\alpha_{mj} = W_{mj}(1, j), \quad \beta_{mj} = W_{mj}(2, j),$$

$$W_{mj} = (P_j^{-1} D_\varepsilon + A_{mj}^T A_{mj})^{-1} A_{mj}^T,$$

$$A_{mj} = \begin{bmatrix} 1 & N_j - N_1 \\ & \dots \\ 1 & N_j - N_{j-1} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Здесь P_j — пересчитанная на момент j ковариационная матрица P вектора априорных начальных значений оцениваемых координат: $P_j = G_j P G_j^T$,

$$G_j = \begin{bmatrix} 1 & N_0 - N_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

При наличии более детальной достоверной статистической информации об ошибках измерения дискретных уровнемеров значения коэффициентов α_{mj} и β_{mj} фильтра (11) могут быть вычислены по приведенным выше соотношениям, но с использованием вместо W_{mj} более сложной матрицы [4], дополнительно включающей ковариационную матрицу R_j ошибок измерения: $R_j = M[(\Delta n_{\text{ош}1}, \Delta n_{\text{ош}2}, \dots, \Delta n_{\text{ош}j})^T (\Delta n_{\text{ош}1}, \Delta n_{\text{ош}2}, \dots, \Delta n_{\text{ош}j})]$.

Можно показать, что при условии диагональности матриц R_j рекуррентные оценки (11) оптимальны по критерию МНК с весами [4] и достаточно близки к оптимальным при наличии корреляции между ошибками измерения.

Как нетрудно заметить, матрицы \tilde{W}_{mj} упрощаются до вида матриц W_{mj} в предположении некоррелированности и постоянства ошибок измерения дискретных уровнемеров

$$R_j = E_j D_\varepsilon, \quad (12)$$

где E_j — единичная матрица размера $j \times j$.

Отметим, что во многих практических случаях *целенаправленный* учет загроуляющего условия (12), соответствующий переходу от критерия МНК с весами [4] к упрощенному МНК-критерию, оказывается целесообразным, так как позволяет обеспечить *инвариантность* оптимальных оценок к, как правило, достоверно не известным корреляционным свойствам ошибок измерения ценой незначительного ухудшения точности оценок.

3. ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Из соображений уменьшения вычислительных погрешностей при бортовой программной реализации алгоритмов целесообразно вместо текущей

суммы импульсов $n(t)$, достигающей чрезмерно больших значений, воспользоваться ее относительной формой $n(t)/N_{\text{норм}}$, где $N_{\text{норм}} \geq N_0$ — нормирующее число импульсов. При этом формула (1) после почленного деления на $N_{\text{норм}}$ представляется в безразмерной относительной форме и, соответственно, изменятся значения параметров алгоритма T_j , N_j и β_j , а константы T_j и N_j и переменные $n(t)$ и $\hat{N}(t)$ могут интерпретироваться как относительные объемы компонента.

Предшествующие рассуждения для удобства проводились в неявном предположении о наличии в аппаратуре системы РСК счетчика импульсов $n(t)$, который в настоящее время отсутствует. В существующей системе [5] на вход БЦВМ передается сигнал f , пропорциональный текущему расходу. Поскольку число импульсов в момент срабатывания дискретного уровнемера потенциально может фиксироваться не с точностью до такта $\tau_{\text{ц}}$ работы БЦВМ ($\sim 0,03$ с), а существенно более высокой точностью, определяемой частотой сигнала на выходе расходомера (~ 800 Гц и более), то практическая реализация нового алгоритма могла бы сопровождаться доработкой аппаратной части системы РСК. Такая доработка потребовала бы применения специализированного высокочастотного процессора (в пределе — счетчика импульсов), осуществляющего интегрирование выходного сигнала расходомера (текущей частоты f) и фиксацию текущих значений интеграла в моменты срабатывания уровнемеров. Однако из соображений надежности на данном этапе можно ограничиться приближенным интегрированием с фиксацией интегрального сигнала расходомера в БЦВМ

$$n(t) \cong \sum_k f_k \tau_{\text{ц}} / N_{\text{норм}} = \sum_k R_v dV_{\text{норм}},$$

где f_k — выходной сигнал расходомера в k -м такте БЦВМ, $R_v = f_k / f_{\text{норм}}$ — текущий относительный объемный режим выработки компонента; $dV_{\text{норм}} = f_{\text{норм}} \tau_{\text{ц}} / N_{\text{норм}}$ — номинальный относительный объем компонента, вырабатываемый в элементарном цикле работы БЦВМ в номинальных условиях при $R_v = 1$. Откуда, с учетом дискретности работы БЦВМ, соотношение (9) представляется в виде

$$\hat{N}_k = \hat{N}_{k-1} - R_v dV_{\text{норм}},$$

а первое соотношение в (11) — в виде:

$$\hat{N}_k = \hat{N}_{k-1} - R_v dV_{\text{норм}} \hat{c}_{j-1}. \quad (13)$$

Предполагается, что указанные вычислительные операции реализуются в каждом такте, а в так-

тах срабатывания уровнемеров оценки \hat{N}_k дополнительно корректируются в соответствии с алгоритмами (6) или (11).

Примечательная потенциальная особенность приведенных алгоритмов работы системы заключается в ослабленной, благодаря допущению (12), зависимости оптимальных значений параметров алгоритмов от априорной информации об ошибках дискретных уровнемеров, являющейся весьма неопределенной, особенно на начальных этапах создания системы (до проведения натурных испытаний). Действительно, значения коэффициентов α_j и β_j полностью определяются информацией о расстановке «измерительных точек» по объему бака (3), (4). Как показало моделирование, в связи с малостью дисперсии D_ε ошибок уровнемеров коэффициенты C_j , используемые для учета априорной информации по ошибке заправки, могут быть приняты равными единице без заметного ущерба для характеристик качества работы СУРТ. Это же относится к последним значениям (начиная с 5–7-го номера измерения) коэффициентов B_j . Начальные же значения этих коэффициентов, влияющие лишь на уровень первых управляющих команд для системы РСК, могут быть вычислены по формуле (5) или (6), исходя из соотношения между дисперсиями ошибок оценивания погрешности b настройки расходомера по уровнемерной информации и априорным значением дисперсии этого параметра.

По результатам статистического моделирования рациональное использование расходомерной информации во внешнем контуре системы позволяет заметно (на 1–2 % $K_{m \text{ ном}}$) уменьшить диапазон управления по коэффициенту соотношения расходов, потребный для решения задачи синхронизации моментов выработки компонентов топлива, и на 10–20 % уменьшить погрешность решения этой задачи и задачи определения момента окончания запасов топлива.

Однако преимущества нового алгоритма особенно заметно должны проявиться в нештатных ситуациях, связанных с отказами элементов в исполнительном и измерительном трактах системы и, как правило, сопровождающихся заметным изменением статистических характеристик возмущений и помех. Действительно, использование расходомерной информации во внешнем контуре позволяет решить задачу высокоточного определения момента окончания опережающего компонента и формирования команды на своевременное выключение двигателя в нештатных ситуациях, связанных с отказом исполнительного органа СУРТ (привода дросселя, изменяющего соотношение расходов компонентов), а также выходом

этого дросселя на упор вследствие утечек компонентов из-за повреждений в топливной системе и др.

Еще одно важное преимущество представленного алгоритма состоит в возможности «пересчета» измерительной информации о запасе компонента топлива в момент срабатывания в нем «измерительной точки» на произвольный момент времени t , соответствующий срабатыванию уровнемера в другом компоненте благодаря измерению и фиксации суммарного числа импульсов $n(t)$. Это позволяет формировать управляющие воздействия (10) и признаки окончания компонентов в случаях разнообразных сочетаний отказов дискретных уровнемеров и сохранить работоспособность системы в таких нештатных ситуациях с минимальными потерями точности. В частности, управляющие воздействия (10) могут формироваться при каждом срабатывании «измерительной точки» в любом компоненте, а не пары синхронно установленных точек (срабатывающих одновременно в номинальных условиях), как это делается обычно. Это же свойство позволяет снизить требования к точности геометрической расстановки «измерительных точек» по высоте баков и, в частности, делает возможным применение неодинакового числа дискретных уровнемеров в баках компонентов топлива.

Отказ одного из двух расходомеров также может быть скомпенсирован с минимальными потерями качества управления, благодаря реконфигурации алгоритма, построенной на основе учета поддержания постоянства (заданного циклограммного значения) тяги, и, следовательно, суммарного массового расхода топлива на ступени.

В заключение важно отметить что, как было указано выше, в алгоритмах СУРТ, реализованных на РН «Протон», «Зенит», «Ангара» и других, в моменты срабатывания j -х «измерительных точек» в баках окислителя и горючего фиксируются значения $G_j^{0(r)}$ формируемой в каждом элементарном цикле оценки текущего относительного запаса (выраженного в долях нормирующего запаса $G_{\text{норм}}$) суммарного топлива (окислитель плюс горючее) [2]:

$$G_k = G_{k-1} - RdG_{\text{норм}}(1 + \lambda_{j-1}), \quad (14)$$

где $R \cong \dot{m} / \dot{m}_{\text{норм}}$ — бортовая оценка текущего относительного режима расходования двигателем суммарного топлива, $dG_{\text{норм}}$ — номинальный относительный запас топлива, вырабатываемый в элементарном цикле работы БЦВМ, λ_j — переменный параметр модели (14) текущего запаса топлива, влияющий на темп списывания модельного запаса и настраиваемый по рассогласовани-



ям $\Delta G_j^{0(r)} = G_j^{0(r)} - G_{\text{ном}j}^{0(r)}$ между модельными $G_j^{0(r)}$ и номинальными $G_{\text{ном}j}^{0(r)}$ значениями относительного запаса в моменты срабатывания уровнемеров в соответствии с итеративным алгоритмом [1, 2]:

$$\begin{aligned}\lambda_j &= \lambda_{j-1} + \Delta\lambda_j, \\ \Delta\lambda_j &= K^0 \Delta\lambda_j^0 + K^r \Delta\lambda_j^r, \\ \Delta\lambda_j^{0(r)} &= A_j (B_j \Delta G_j^{0(r)} - \Delta G_{j-1}^{0(r)}).\end{aligned}\quad (15)$$

Поправки $\Delta\lambda_j^{0(r)}$ к оценкам относительных отклонений расходов компонентов дополнительно используются для вычисления управляющих воздействий синхронизации опорожнения баков на изменение относительного отклонения от номинала $\Delta\delta k_j$ коэффициента соотношения расходов компонентов топлива: $\Delta\delta k_j = K(\Delta\lambda_j^r - \Delta\lambda_j^0)$, где $K^{0(r)}$, K , A_j и B_j — константы алгоритма.

В отличие от соотношения (13) модель запаса (14) настраивается с помощью одной координаты λ_{j-1} из условия совпадения модельного и фактического запасов компонента в терминальный момент окончания процесса управления.

Из соображений сохранения преемственности в использовании отработанных и хорошо зарекомендовавших себя алгоритмических решений [1, 2] и с учетом очевидной связи между настраиваемыми моделями (13) и (14) можно предложить еще один перспективный вариант построения алгоритма работы СУРТ, где вместо модели (14) — две настраиваемых по расходомерной информации модели для каждого из компонентов топлива:

$$G_k^{0(r)} = G_{k-1}^{0(r)} - R_v^{0(r)} dV_{\text{ном}}(1 + \lambda_{j-1}^{0(r)}). \quad (16)$$

Для настройки этих моделей можно воспользоваться аналогичными алгоритму (15) итеративными соотношениями:

$$\begin{aligned}\lambda_j^{0(r)} &= \lambda_{j-1}^{0(r)} + \Delta\lambda_j^{0(r)}, \\ \Delta\lambda_j^{0(r)} &= A_j (B_j \Delta G_j^{0(r)} - \Delta G_{j-1}^{0(r)}), \\ \Delta\delta k_j &= K(\Delta\lambda_j^r - \Delta\lambda_j^0).\end{aligned}$$

Таким образом, в данном случае учет расходомерной информации в контуре синхронизации опорожнения баков свелся к формированию режима R_v расходования модельного запаса (16) каждого из компонентов по этой информации. Примечательно, что это полностью совпадает с известным вариантом [2] построения алгоритма работы СУРТ с дополнительным использованием инер-

циальной информации, в котором режим R в формуле (14) также формируется по инерциальной информации о наборе кажущейся скорости РН или РБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для систем управления расходом топлива с расходомерами предложены новый способ комплексирования урвнмерной и расходомерной информации и новые алгоритмы управления, позволяющие заметно улучшить точностные и надежные показатели качества управления бортовых систем ракет-носителей и разгонных блоков.

Предложенные алгоритмы наиболее удобны для применения на разгонных блоках, для которых характерны применение расходомеров и наличие существенных ограничений на допустимый диапазон управления по коэффициенту соотношения расходов компонентов топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вакушин В.А., Жуков В.А., Завадский В.К. и др. Системы управления расходом топлива перспективных ракет-носителей (принципы построения, отказоустойчивые алгоритмы, технологии обработки бортового обеспечения) // Научно-технические разработки ОКБ-23 — КБ «Салют». — М.: Воздушный транспорт, 2006. — С. 579—592.
2. Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Системы управления расходом топлива (назначение, принципы построения, алгоритмы управления) // Там же. — С. 243—253.
3. Жуков В.А., Завадский В.К., Иванов В.П. и др. Повышение точности и надежности работы систем управления расходом топлива на основе комплексирования расходомерной и урвнмерной измерительной информации // Материалы 5-й всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения, Самара 11—15 сент. 2017 г.). — Т. 1. — С. 262—269.
4. Брайсон А., Ю-Ши Хо. Прикладная теория оптимального управления. — М.: Мир, 1972.
5. Чадаев А.И., Тропова Е.И. Корректировка алгоритмов действия системы опорожнения баков боковых блоков ракеты-носителя «Союз-2» // Датчики и системы. — 2017. — № 2. — С. 25—28.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Завадский Владимир Константинович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ✉ vladizav@yandex.ru,

Иванов Владимир Петрович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ✉ vladguc@ipu.ru,

Каблова Елена Борисовна — науч. сотрудник, ✉ vladguc@ipu.ru,

Кленовая Людмила Григорьевна — науч. сотрудник, ✉ vladguc@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.