



ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ «СОЮЗ-2» И «СОЮЗ-СТ»

А.Я. Андриенко, Л.Н. Бельский, М.И. Заплатин, Г.П. Лосев,
Е.Н. Маханек, А.И. Чадаев

Изложены принципы создания цифровой системы управления расходом топлива ракет-носителей «Союз-2» и «Союз-СТ», обеспечивающей повышение их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: цифровая система, терминальное управление, алгоритмическая защита, летные испытания.

ВВЕДЕНИЕ

С 1950-х гг. было создано несколько поколений систем терминального управления расходом топлива (СУРТ) для отечественных межконтинентальных баллистических ракет (МБР) и ракет-носителей (РН) космического назначения [1, 2].

Системы первого поколения реализованы в виде автономных *аналоговых* приборов — для стендового ракетного изделия 8К51-РД и для первой в мире межконтинентальной ракеты 8К71, а также всех ее последующих модификаций (включая РН «Спутник», «Восток» и др.) — вплоть до РН «Союз».

Системы СУРТ второго поколения были построены на дискретном принципе в виде специализированных (автономных) вычислительных устройств — для МБР 8К68, 8К75, 8К84, 8К99 и др.

И, наконец, широкие возможности, доставляемые современными бортовыми вычислительными комплексами (БЦВК) в части воспроизведения сложных алгоритмов управления, предопределили возникновение третьего — цифрового — поколения СУРТ применительно к РН «Союз-2» и «Союз-СТ».

Переход на цифровые принципы действия СУРТ доставляет дополнительные возможности совершенствования алгоритмов терминального управления расходом топлива в обеспечение:

- улучшения точностных характеристик СУРТ;
- расширения функций, выполняемых системой, — в части формирования признака полной

выработки топлива ракетного блока для повышения:

- либо надежности выведения при рутинной эксплуатации РН;
- либо грузоподъемности в «рискованных» запусках РН (с массой полезного груза, превышающей штатно допустимую).
- совершенствования средств алгоритмической защиты (от сбоев смежных бортовых систем).

1. ЗАДАЧА ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА

Уравнение объекта СУРТ (двигательной установки и топливных баков многоблочной ступени РН) имеет вид [3]:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_{i-1}, \mathbf{u}_{i-1}, \mathbf{v}, W_i), \quad i = 1, 2, \dots, I + 1. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{x}_i — вектор координат объекта (тяги каждого из двигателей ступени, соотношения расходов компонентов топлива в каждом из ракетных блоков и массы компонентов топлива в каждом баке) в дискретный момент i , определяемый, в частности, как момент времени t_i достижения кажущейся скоростью W ракеты порогового значения W_p ; \mathbf{u}_i — значение вектора управления в тот же момент времени (управляющие уставки для регуляторов давления в камерах сгорания и приводов дросселей в магистралях компонентов топлива); \mathbf{v} — случайный и неизменный во времени i вектор возмущений.

Вектор измеряемых координат СУРТ

$$\mathbf{y}_i = \chi_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{h}_i), \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (2)$$

где \mathbf{h}_i — случайный вектор ошибок измерений.

Требуется определить: функцию управления $\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i(\mathbf{y}_{1i}, \mathbf{u}_{0(i-1)})$, $i = 1, 2, \dots, I$, из некоторого допустимого множества \mathbf{U} и последовательность $\bar{W}_{1I} = (W_1, W_2, \dots, W_I)$, обеспечивающую наименьшее значение риска

$$R = M[\Psi(\mathbf{x}_{I+1})], \quad (3)$$

задаваемого как математическое ожидание M функции потерь Ψ от конечного состояния объекта управления в терминальный момент $I + 1$:

Процедура решения задачи (1)–(3) терминального управления в цифровой СУРТ состоит в следующем:

— на основе принятой модели объекта анализируется поведение системы до текущего момента i (так называемый анализ предыстории процесса управления) и с помощью методов фильтрации находятся статистические оценки действующих в системе возмущений \mathbf{v} ;

— находится реакция объекта на воздействия, соответствующие найденным оценкам возмущений, в предположении, что после момента i значение управления не изменяется;

— определяется отклонение реакции объекта \mathbf{x}_{I+1} в терминальный момент от заданного значения $\mathbf{x}_{\text{зад}}$;

— полученное отклонение используется как входная команда регулятора, исполнение которой и реализует компенсацию возмущающих воздействий \mathbf{v} , естественно, в рамках возможностей, предоставляемых множеством \mathbf{U} допустимых управлений.

2. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ СУРТ

Реализованная для РН «Союз-2» и «Союз-СТ» цифровая СУРТ обладает следующими особенностями.

• В области первичной обработки уровнемерной информации:

— для преобразования уровнемерной информации применена гибридная схема, в которой преобразование высокочастотных выходных сигналов мостовой цепи в непрерывные сигналы постоянного тока осуществляется в аналоговом виде, а выполнение остального ряда задач первичной обработки уровнемерной информации реализуется в БЦВК;

— аналого-цифровые преобразователи информации установлены в максимальной близости от измерительных датчиков уровнемеров СУРТ; минимизированы протяженности цепей для передачи аналоговых сигналов и применены кодовые линии связи для передачи информации;

— в БЦВК реализованы более сложные и совершенные алгоритмы обработки уровнемерной информации, позволившие существенно повысить надежность определения моментов времени прохождения уровней компонентов топлива через чувствительные элементы датчиков уровней [4, 5].

• В области подавления автоколебаний в системе регулирования соотношения компонентов (РСК):

— значительно расширена зона нечувствительности по ошибке регулирования;

— введено нелинейное интегрирующее звено с ограничением входного и выходного сигналов для обеспечения заданной точности отработки управляющего сигнала СУРТ при увеличенной зоне нечувствительности;

— улучшена схема построения контура системы РСК, в которой по числу импульсов с датчика расхода в нерегулируемой магистрали и уставочному значению коэффициента объемного соотношения расходов определяется требуемое (программное) число импульсов с датчика расхода, которое должно быть в регулируемой магистрали.

• В области совершенствования алгоритмов терминального управления применительно к штатным и нештатным условиям эксплуатации СУРТ:

— коренным образом обновлены алгоритмы действия СУРТ: (управление формируется с учетом всей полетной предыстории РН);

— от пуска к пуску обновляется параметрическое обеспечение бортовой системы управления путем коррекции массива параметров СУРТ с последующим переводом их из оперативной в долговременную память БЦВК — по мере накопления результатов анализа проведенных пусков.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУРТ В СОСТАВЕ РН «СОЮЗ-2» И «СОЮЗ-СТ»

К настоящему времени практически завершены летно-конструкторские испытания РН «Союз-2», в ходе проведения которых с 2004 г. осуществлено 16 пусков, и выполнены два пуска РН «Союз-СТ». Пуски РН «Союз-2» проводились со стартовых площадок космодромов Плесецка и Байконура, пуски РН «Союз-СТ» выполнены с французского космодрома «Куру».



В каждом из проведенных пусков РН наряду с решением задач летно-конструкторских испытаний выполнялись задачи (за исключением первого пуска) по выведению космических аппаратов на различные орбитальные траектории с заданными параметрами. По результатам пусков, благодаря наличию в составе системы управления цифровой системы телеметрических измерений, позволившей существенно увеличить объем и качество передаваемой телеметрической информации, автоматизировать процесс обработки полученной информации, была получена уникальная информация, анализ которой показал эффективное и надежное функционирование всех систем РН «Союз-2», в том числе СУРТ.

В части достигнутых результатов функционирования СУРТ можно отметить, что обеспечено выполнение всех заданных в ТЗ на разработку системы управления технических требований, предъявляемых к СУРТ. В частности, точность внутриблочного регулирования опорожнения баков по бортовой информации на момент срабатывания последних чувствительных элементов датчиков уровней составила для:

- центрального блока не хуже $\pm 0,12$ с;
- боковых блоков не хуже $\pm 0,3$ с;
- блока 3 ступени не хуже $\pm 0,4$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совмещение средств решения задач управления РН и управления расходом топлива в едином БЦВК позволило значительно сократить массу аппаратуры СУРТ, повысить надежность системы, а также расширить функциональные возможности СУРТ — осуществить, в частности, прогнозирование на борту РН момента окончания топлива, а также реализовать новые способы алгоритмической защиты, обеспечивающие поддержание высокой эффективности действия системы при отдельных отказах в ее аппаратуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко А.Я., Иванов В.П., Портнов-Соколов Ю.П. Система управления расходом топлива жидкостных ракет. История создания и пути развития // Космонавтика и ракетостроение. — 1999. — Вып. 15. — С. 133—137.
2. Андриенко А.Я., Иванов В.П. Совершенствование энергетических характеристик жидкостных ракет средствами автоматического управления // Проблемы управления. — 2009. — № 1. — С. 66—71; № 2. — С. 59—65.
3. Бортовые терминальные системы управления / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. — М.: Машиностроение, 1983.
4. Патент РФ 2397454 от 20.08.2010 г. Устройство для измерения уровня диэлектрического вещества / С.Н. Менделев, М.И. Заплатин, Г.П. Лосев, В.В. Нечаев.
5. Патент РФ 2397455 от 20.08.2010 г. Способ измерения уровня диэлектрического вещества / С.Н. Менделев, М.И. Заплатин, Г.П. Лосев и др.

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

Андриенко Анатолий Яковлевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-88-71, ✉ vladguc@ipu.rssi.ru,

Бельский Лев Николаевич — канд. техн. наук, зам. ген. директора по ракетно-космической тематике, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение автоматики им. академика Н.А. Семихатова» (ФГУП НПОА им. академика Н.А. Семихатова), г. Екатеринбург, ☎ (343) 350-55-41,

Заплатин Михаил Иванович — гл. специалист, ФГУП НПОА им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург, ☎ (343) 355-95-85, ✉ avt@npoa.ru,

Лосев Герман Петрович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ФГУП НПОА им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург, ☎ (343) 350-90-48, ✉ Losevt@npoa.ru,

Маханек Елена Николаевна — вед. инж.-конструктор, ФГУП НПОА им. академика Н.А. Семихатова, г. Екатеринбург, ☎ (343) 350-90-48,

Чадаев Александр Иванович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-88-71, ✉ vladguc@ipu.rssi.ru.

Не забудьте подписаться!

Подписку на журнал «Проблемы управления» можно оформить в любом почтовом отделении (подписной индекс 81708 в каталоге Роспечати или 38006 в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.