

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИБАКОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ С ТЕРМИНАЛЬНЫМИ АЛГОРИТМАМИ¹

Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г.
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65
vladguc@ipu.ru

Аннотация: Применительно к ракете-носителю сверхтяжелого класса РН СТК представлены принципы построения терминальной системы управления расходом топлива (СУРТ), динамические, точностные характеристики которой определяют грузоподъемность РН. Приведены приближенные соотношения, предназначенные для оценки эффективности СУРТ на этапе проектирования изделия.

Ключевые слова: синхронизация выработки компонентов топлива, терминальное управление, гарантийный запас, эффективность СУРТ, полная выработка.

Введение

Начиная с замысла создания системы управления динамическим объектом, возникает вопрос о целесообразности использования такой системы на объекте, и оценке ее полезности в части совершенствования характеристик объекта. Эффективность управления определяется выбором принципов построения, применением адекватных методов синтеза алгоритма управления. Для оценки эффективности существенное значение имеет исследование динамических и точностных характеристик системы управления для реальных условий функционирования объекта. В работе эти вопросы рассматриваются применительно к классу задач управления расходом топлива многоступенчатой ракеты-носителя с ЖРД.

Одна из задач, которая традиционно ставится перед разработчиками жидкостной ракеты-носителя (РН), заключается в повышении ее энергетических характеристик. Решение этой проблемы позволяет при заданной стартовой массе РН максимально повысить массу выводимого груза или высоту орбиты выведения. Среди известных путей повышения энергетических характеристик РН, таких, как выбор наиболее эффективного топлива, совершенствование ЖРД, оптимизация траектории выведения важное место занимают способы повышения эффективности использования располагаемых запасов топлива [1].

1 Назначение, принципы построения системы управления расходом топлива РН СТК

1.1 Задачи, решаемые системами СУРТ РН СТК

Рассмотрим задачу управления расходом топлива на участках циклограммы работы РН СТК. В режиме I-ой ступени одновременно работают двигатели связки из шести однотипных боковых блоков и одного центрального блока, включающих баки окислителя и горючего с питаемыми из них двигателями.

Поскольку в конце участка работы I-ой ступени четыре из шести боковых блока отделяются от РН одновременно, расходование топлива этих блоков подлежит обязательной синхронизации во избежание потерь в энергетике ракеты. Так как оставшиеся два боковых и центральный блоки продолжают работать и после отделения четырех боковых блоков, синхронизация расходования топлива между не отделяемыми и отделяемыми блоками в условиях использования схемы «гибкого» выведения необязательна. В связи с этим задачу управления расходом топлива четырех боковых блоков можно рассматривать независимо от оставшихся двух боковых и центрального блоков.

Для решения этой задачи применительно к ступеням РН многоблочной компоновки в составе СУРТ выделяются каналы внутриблочного и межблочного регулирования расхода топлива [2]. Регулирование производится на основе измерений запасов компонентов топлива дискретными датчиками уровней, установленными в баках окислителя и горючего всех блоков РН.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00073).

Внутриблочное регулирование осуществляется посредством изменения при помощи дросселя соотношения текущих расходов компонентов топлива и предназначено, главным образом, для синхронизации выработки окислителя и горючего в каждом из блоков. Другое назначение этого регулирования связано с обеспечением надежности работы ЖРД и состоит в удержании соотношения текущих расходов компонентов топлива в заданном диапазоне.

Межблочное регулирование обеспечивает синхронизацию выработки запасов топлива четырех боковых блоков к моменту их выключения и отделения. Регулирующие воздействия отрабатываются приводами регуляторов тяги, изменяющих соотношение расходов компонентов топлива, подаваемых в газогенератор, в результате чего изменяются суммарные расходы топлива через двигатели боковых блоков.

Кроме того, перед системой СУРТ РН СТК поставлена задача оценки текущих запасов топлива связки четырех боковых блоков и определения момента его окончания. Это необходимо для реализации на РН так называемой полной выработки топлива [3]. В этом случае выключение двигательных установок синхронно отделяемых блоков производится при наиболее полном израсходовании располагаемых запасов компонентов топлива, а неиспользуемые остатки топлива сводятся к минимально потребным величинам, определяемым условиями безаварийности выключения двигателя.

Падение отработанных блоков в заданные районы обеспечивается системой управления движением ракеты посредством корректирования ориентации вектора скорости к моменту выключения ЖРД.

В современных отечественных системах СУРТ для обеспечения возможности корректного измерения массового рассогласования запасов компонентов топлива в условиях глубокого изменения режима работы ДУ и для реализации полной выработки топлива из баков единичного блока в алгоритме на основе дискретных измерений, поступающих от датчиков уровней, и данных о текущем расходе обычно формируется явная оценка (настраиваемая модель) располагаемого запаса топлива в баках блока, общая для запасов окислителя и горючего, выработка которых синхронизируется переключением дросселя СОБ [4].

Применительно к первой ступени для всех баков связки четырех боковых блоков также следует сформировать одну оценку запаса топлива, общую для всех баков связки, поскольку измеренные датчиками уровней рассогласования запасов топлива парируются регулирующими воздействиями по каналам внутриблочной и межблочной синхронизации. В результате такого регулирования к моменту окончания ступени обеспечивается сходимость фактических запасов компонентов топлива в баках связки к их модельной оценке. При формировании модельной оценки предполагается использовать расчетные данные о текущем расходе топлива через двигатели боковых блоков, поступающие в алгоритм управления СУРТ из системы управления. Обнуление модельной оценки является признаком полной выработки топлива связки четырех боковых блоков.

Аналогично первой ступени, к концу участка работы второй ступени необходимо обеспечить внутриблочную и межблочную синхронизацию выработки топлива из двух одновременно отделяемых боковых блоков, задачу управления расходом топлива, из которых также можно рассматривать независимо от управления опорожнением продолжающего работать центрального блока. Для управления внутриблочной и межблочной синхронизацией связки двух боковых блоков также целесообразно использовать одну общую модель текущего запаса топлива, настраиваемую по информации всех датчиков этой связки.

Для обеспечения внутриблочной синхронизации опорожнения баков окислителя и горючего центрального блока в условиях существенной вариации режима работы ДУ и, возможно, для его полной выработки также целесообразно использовать отдельную специальную настраиваемую модель текущего запаса топлива ЦБ. На безатмосферном участке полета ЦБ для настройки этой модели целесообразно использовать оценку текущего режима работы ДУ, сформированную в СУ носителя по инерциальной информации об изменении продольной составляющей кажущегося ускорения.

Таким образом, общую систему СУРТ РН СТК целесообразно представить в виде совокупности следующих совместно работающих систем СУРТ, соответствующих управлению расходом топлива в последовательно выключаемых и отделяемых частях РН:

- СУРТ связки четырех боковых блоков;
- СУРТ связки двух боковых блоков;
- СУРТ центрального блока.

В режиме полной выработки топлива нормальное функционирование системы СУРТ становится одним из условий безопасного выведения РН и обеспечения заданных районов падения отработанных

блоков. Из этого факта следует, что при проектировании системы СУРТ значительное внимание должно быть уделено обеспечению аппаратной надежности элементов системы и отказоустойчивости алгоритмов управления СУРТ на основе использования в алгоритмах методов обнаружения и защиты от возможных аномалий в работе измерительного тракта и других возмущающих факторов.

На основе анализа требований ТЗ и исходных данных (ИД) на разработку СУРТ РН СТК определены задачи, которые должна решать системы, а также требования по обеспечению необходимого качества и надежности управления.

Системы СУРТ должны обеспечивать:

1. Синхронизацию с заданной точностью расходования топлива из баков окислителя и горючего каждого блока РН путем изменения в допустимых пределах коэффициентов соотношения массовых расходов компонентов топлива через маршевый двигатель с целью обеспечения одновременности опорожнения баков блока с заданной точностью.

2. Синхронизацию с заданной точностью выработки топлива из различных боковых блоков, объединенных в связки 4-х и 2-х боковых блоков, путем изменения в допустимых пределах суммарных расходов топлива маршевых двигателей, питаемых из баков боковых блоков соответствующих связок.

3. Определение моментов окончания рабочих запасов компонентов топлива связки 4-х боковых блоков, связки 2-х боковых блоков и центрального блока для формирования команд на выключение соответствующих двигательных установок по полной выработке.

4. Выдачу в СУ информации о суммарном текущем запасе компонентов топлива связок 4-х боковых блоков, 2-х боковых блоков и центрального блока для использования в системе управления изделием.

5. Нормальное функционирование (с согласованными потерями точности) при единичных отказах в измерительных трактах всех блоков РН (несрабатывание отдельных точек).

6. Возможность введения корректирующих поправок к моментам срабатывания измерительных точек, компенсирующих проектные погрешности в определении фактического запаса компонента под измерительной точкой, и поправок для компенсации программных возмущений по K_m для каждого из блоков РН.

7. Возможность перехода на безатмосферном участке полета РН от программного задания режима в модели текущего запаса топлива на более точное оценивание текущего режима работы ДУ центрального блока по инерциальной информации.

1.2 Принципы построения СУРТ

В результате анализа возможных путей решения стоящих перед СУРТ задач и с учетом опыта построения и эксплуатации систем подобного класса для других изделий при формировании структуры системы были выбраны следующие принципы построения системы управления расходованием топлива.

В основу построения СУРТ положены принципы высокоточного порогово-дискретного измерения запасов компонентов топлива в баках и терминального управления расходованием этих запасов. Для повышения помехозащищенности и отказоустойчивости в системе используются принципы фильтрации, прогнозирования и алгоритмической отказоустойчивости [2].

В системе СУРТ для измерения запасов топлива в баках обычно используются апробированные при эксплуатации ряда РН дискретные датчики уровней. Датчик включает в себя определенное количество чувствительных элементов, установленных в баках на заданных уровнях по всей высоте бака и фиксирующих моменты прохождения жидкостью этих уровней.

Рассогласование моментов срабатывания одноименных чувствительных элементов в баках окислителя и горючего свидетельствует о несинхронности расходования компонентов топлива.

Для синхронизации опорожнения баков окислителя и горючего данного блока по информации датчиков уровней в полете изменяется коэффициент соотношения расходов компонентов топлива K_m через регулируемый двигатель таким образом, чтобы обеспечить одновременную выработку управляемых СУРТ запасов окислителя и горючего к моменту окончания суммарного рабочего запаса топлива [3].

Отличия моментов срабатывания одноименных чувствительных элементов датчиков уровней в различных блоках свидетельствуют о несинхронности выработки топлива из этих блоков. На основе такой информации могут быть сформированы регулирующие воздействия на изменение суммарных расходов топлива через двигатели боковых блоков, обеспечивающие межблочную синхронизацию и одновременность выработки топлива различных боковых блоков.

Для организации полной выработки топлива в алгоритмах СУРТ производится оценивание текущего суммарного рабочего запаса топлива во всех баках связок боковых блоков.

С этой целью в алгоритме СУРТ строится модель расходования топлива с использованием информации о текущем режиме расходования топлива, которая формируется, исходя из расчетной циклограммы работы двигательной установки и текущей равномерной информации.

Программная информация о режиме расходования топлива, поступающая из СУ, корректируется в алгоритме СУРТ с учетом результатов измерений, полученных от датчиков уровней. В моменты срабатывания чувствительных элементов (измерительных точек) датчиков уровней в баках окислителя и горючего каждого блока фиксируются модельные значения текущих запасов топлива. На основе отклонений этих значений от номинальных запасов топлива под данными измерительными точками вычисляются поканальные управляющие воздействия отдельно для баков окислителя и горючего каждого блока связки.

По разности поканальных управляющих воздействий для каждого блока формируется управляющая команда на изменение с помощью дросселя коэффициента соотношения расходов компонентов для обеспечения внутривальной синхронизации расходов компонентов топлива. Для каждого блока вычисляется также средневзвешенная сумма поканальных управляющих воздействий. Их среднеарифметическое значение по четырем блокам (или двум – для связки двух блоков) используется для коррекции программного режима расходования топлива при формировании модельной оценки запасов топлива. По разнице между управляющими воздействиями, сформированными для каждого блока, и их среднеарифметическим значением формируются управляющие команды на изменение с помощью регуляторов тяги (суммарных расходов топлива) через различные двигатели связки боковых блоков, в результате чего обеспечивается межвальной синхронизация расходования топлива.

Для повышения помехозащищенности в алгоритме СУРТ производится идентификация номера сработавшего чувствительного элемента в каждом из баков, соответствующего поступившему сигналу и фильтрация случайных погрешностей измерения.

Каждый датчик уровней содержит достаточное число (16) дискретных чувствительных элементов, что позволяет осуществлять фильтрацию случайных погрешностей измерения за счет использования предыстории измерений при оценке текущих запасов топлива, оценивать расход компонентов и прогнозировать протекание процесса опорожнения в будущем. Это позволяет существенно повысить точность управления расходованием топлива и прогнозирования моментов окончания компонентов топлива в баках и тем самым повысить эффективность реализации принципа полной выработки топлива.

Описанный принцип раздельной для окислителя и горючего обработки входной информации и формирования поканальных управляющих воздействий служит средством повышения структурной надежности алгоритма СУРТ и позволяет легко реализовать в алгоритме СУРТ различные способы повышения помехозащищенности и отказоустойчивости, которые приведены ниже.

1.3 Точностные, динамические и эксплуатационные характеристики системы СУРТ

Эффективность применения СУРТ на борту РН зависит от ее точностных, динамических, эксплуатационных и надежностных характеристик [3].

Точность функционирования СУРТ характеризуется возможным (проектным) разбросом остатков рабочих запасов компонентов топлива в момент формирования системой признака полной выработки топлива. Разброс остатков непосредственно учитывается при назначении гарантийных запасов компонентов из условия безаварийного выключения двигателя. Повышение точностных характеристик СУРТ позволяет уменьшить систематический уровень и разброс неиспользуемых остатков топлива и тем самым повысить энергетические возможности РН. Поскольку система СУРТ подвержена воздействию случайных погрешностей и возмущений, точность ее работы характеризуется вероятностными показателями. Оценка показателей точности СУРТ производится на основе статистического моделирования работы системы. По результатам моделирования вычисляются математические ожидания и среднеквадратические отклонения остатков компонентов топлива.

Динамика процесса управления расходованием топлива по каналу СОБ характеризуется отклонением параметра двигателя K_m , связанным с таким управлением. Управляющие воздействия СУРТ на изменение параметра K_m вводятся в дискретные моменты времени прохождения уровнем жидкости в баках окислителя и горючего чувствительных элементов одного номера для обоих датчиков уровней и сохраняются неизменными на интервале времени между моментами срабатывания смежных пар измерительных точек. Отклонения параметра K_m на указанных интервалах являются показателями, характеризующими динамику процессов управления расходованием топлива. Значения отклонений K_m , требуемые для управления расходованием компонентов топлива, ограничиваются заданным диапазоном изменения положения исполнительного органа (дросселя) СУРТ, а

статистически-предельные значения полных отклонений параметра K_m , включая начальную ошибку настройки двигателя, не должны превышать значений допустимых для нормальной работы двигателя.

Использование принципа терминального управления при синхронизации выработки компонентов топлива, наряду с фильтрацией погрешностей измерения запасов компонентов, позволяет минимизировать отклонения параметра K_m двигателя, потребные для управления расходом топлива.

Динамика процессов управления расходом топлива по каналу МБС характеризуется отклонениями суммарных расходов топлива через двигатели, потребными для синхронизации выработки топлива из различных блоков. Управляющие воздействия СУРТ на изменение суммарного расхода, также, как и на изменение параметра K_m , вводятся в дискретные моменты времени после прохождения уровнем жидкости во всех баках окислителя и горючего одноименных измерительных точек датчиков уровней и сохраняются неизменными на интервале времени между моментами срабатывания смежных номеров измерительных точек. Таким образом, управляющее воздействие по каналу МБС формируется после приема сигналов срабатывания измерительных точек датчиков уровней со всех блоков, входящих в связку [4].

Отклонения суммарного расхода на указанных интервалах являются показателями, характеризующими динамику процессов управления расходом топлива по каналу МБС. Значения отклонений суммарных расходов, потребные для управления межблочной синхронизацией, ограничиваются заданным диапазоном изменения положения исполнительного органа регулятора расхода (в случае выделения такого диапазона, как в сторону дросселирования, так и в сторону форсирования). Статистически-предельные значения полных отклонений суммарного расхода, включая начальную ошибку настройки двигателя, не должны превышать значений, допустимых для нормальной работы двигателя. Выделение специального диапазона на форсирование двигателей для целей межблочной синхронизации приводит к систематическому снижению тяги двигательной установки связки боковых блоков относительно максимально допустимого значения. В случае, когда такой диапазон заранее не выделяется, регулирование по каналу МБС осуществляется за счет дросселирования отдельных двигателей связки, предварительно форсированных до максимально допустимого уровня. Возникающее в результате такого регулирования математическое ожидание отклонений суммарного расхода связки в сторону дросселирования также приводит к систематическому снижению тяги двигательной установки связки. Потери тяги (или снижение суммарного расхода связки) в каждом из описанных способов межблочной синхронизации должны быть оценены в результате проведения статистического моделирования. По результатам оценки должен быть произведен выбор рационального способа формирования управляющих воздействий по каналу МБС.

Эксплуатационные характеристики системы могут характеризоваться потребностью ее адаптации (или индивидуальной поднастройкой) к условиям конкретного пуска РН. Для системы СУРТ в условиях реализации полной выработки топлива потребность адаптации возникает в связи с изменениями доз заправки и температур компонентов топлива, уровня гарантийных и неиспользуемых остатков. Кроме того, для каждого конкретного пуска могут быть учтены данные тарировки баков и выявленные по результатам анализа предшествующих пусков погрешности расстановки чувствительных элементов датчиков уровней. Адаптация СУРТ к указанным выше факторам производится путем поднастройки алгоритма управления и не требует вмешательства в аппаратуру системы, в частности, в датчики уровней (геометрическую расстановку измерительных точек в баках). С этой целью в БПО СУРТ вводятся соответствующие поправки в составе данных на пуск. Суть поднастройки алгоритма управления состоит во введении начальной установки дросселя СУРТ на требуемое значение параметра K_m , программных переключков дросселя и задании корректирующих поправок к априорным значениям весов компонентов топлива в баках под измерительными точками датчиков уровней. Задаются также уставки для более точного формирования момента достижения полной выработки топлива. Такого рода адаптация СУРТ к условиям конкретного пуска позволяет снизить уровень возмущений и погрешностей измерений, действующих на систему, и в результате повысить точность ее работы [2].

Исследования динамики и терминальной точности управления системы производится методом математического моделирования работы СУРТ. Для расчета проектных показателей динамики и точности работы систем связки четырех боковых блоков, связки двух боковых блоков и центрального блока РН СТК используются моделирующие программные комплексы (МПК), реализованные на персональном компьютере (ПК). Каждый из комплексов состоит из нескольких аналогичных программных модулей.

Модуль имитации алгоритма соответствующей системы воспроизводит функционирование бортового программного обеспечения в части реализации алгоритмов работы системы СУРТ с учетом тактности (дискретности) проведения вычислений в БЦВМ. На этапах исследований, когда алгоритмы СУРТ полностью разработаны, эти модули воспроизводят всю структуру алгоритмов и полностью соответствуют их математическому описанию, что позволяет адекватно моделировать работу системы в условиях воздействия различных внешних возмущающих факторов и при вариации (выборе) параметров алгоритма. На начальном этапе работ в качестве модулей имитации алгоритмов используются предварительные базовые программные аналоги, использующие опыт предшествующих разработок.

Модули имитации работы объектов управления систем воспроизводят работу соответствующих частей двигательной установки РН, расходование компонентов топлива из питающих двигателя баков, работу дискретных измерительных датчиков систем СУРТ, исполнительных органов (дресселей и регуляторов тяги) систем, а также условия работы соответствующей системы СУРТ и все учитываемые внешние и внутренние возмущающие воздействия, заданные в ИД на разработку системы. В связи с существенной неполнотой состава и отсутствием на данном этапе работ окончательных значений некоторых характеристик ИД, данный блок также соответствует текущим представлениям об условиях работы СУРТ и в дальнейшем подлежит уточнению.

Эти два основных программных модуля позволяют проводить как расчет единичных (в том числе номинальных) пусков систем, так и статистическое моделирование работы систем в условиях воздействия случайных возмущений.

2 Анализ эффективности системы СУРТ РН СТК

Анализ эффективности установки на носителе выбранного варианта системы управления расходом топлива проведен по уклонению характеристической (кажущейся) скорости от значений этих характеристик для идеальной системы СУРТ. Под идеальной системой подразумевается система, которая полностью использует запасы компонентов топлива (до уровней «заливки двигателя»), то есть идеально точно решает задачу СУРТ и не требует гарантийных запасов топлива на полную выработку. Предполагается также, что масса элементов конструкции такой системы совпадает с массой реальной системы.

Для оценки приращения характеристической скорости РН, получаемого при работе ступеней с идеальной СУРТ, будем использовать формулу Циолковского [5]:

$$\Delta W_{ид}(L) = U(L) \cdot \ln\left(\frac{M_n(L)}{M_k(L)}\right), L = 1,2,3,$$

где $U(L)$ - характеристическая скорость истечения газов из сопел ДУ на L -й ступени (м/с);

$M_n(L)$, $M_k(L)$ - масса РН в начале и конце работы L -й ступени с идеальной СУРТ (кг).

Для простоты в качестве $M_n(L)$, $M_k(L)$ принимаются проектные значения соответствующих масс РН, приведенные в ИД.

Эффект от применения СУРТ на РН может быть оценен сравнением потерь характеристической скорости, соответствующих варианту 1 наличия и варианту 2 отсутствия системы СУРТ на ступенях.

По сравнению с идеальной системой потери характеристической скорости для варианта 1 наличия на ступени реальной СУРТ, работающей в режиме полной выработки, можно определить следующим соотношением:

$$\Delta W_1(L) = U(L) \ln\left(\frac{M_n(L)}{M_k(L) + G_{1гз}(L)}\right) - \Delta W_{ид}(L), L = 1,2,3.$$

Здесь $G_k(L)$ - масса конструкции системы СУРТ на L -й ступени (кг);

$G_{1гз}(L)$ - суммарные гарантийные запасы СУРТ на полную выработку (кг).

Величины $G_k(L)$, $G_{1гз}(L)$ вычисляются следующим образом:

$$G_k(L) = 80 \cdot N_{бл}(L),$$

$$G_{1гз}(L) = 0,01 \cdot (dG_{о_окт}(L) \cdot G_o^{пз}(L) + dG_{г_окт}(L) \cdot G_r^{пз}(L)) \cdot N_{бл}(L),$$

где $N_{бл}(L)$ - количество блоков на L -ой ступени; 80 – принятая масса (кг) конструкции СУРТ для единичного блока; $G_o^{пз}(L)$ - номинальный рабочий запас компонента в одном блоке L -ой ступени (кг); $dG_{о(г)_окт}(L)$ - оценки статистически предельных значений остатков компонентов на L -ой ступени (%).

Потери характеристической скорости для варианта 2 отсутствия на ступени СУРТ, можно определить следующим соотношением:

$$\Delta W_2(L) = U(L) \cdot \ln\left(\frac{M_H(L) - G_K(L)}{M_K(L) + G_{2ГЗ}(L) - G_K(L)}\right) - \Delta W_{ИД}(L), L = 1, 2, 3.$$

Здесь $G_K(L)$ - масса конструкции системы СУРТ на L -й ступени (кг).

Величина $G_K(L)$ вычисляется следующим образом:

$$G_K(L) = G_{кон} \cdot N_{бл}(L),$$

где $G_{кон}$ – принятая масса (кг) конструкции СУРТ для единичного блока;

$G_{2ГЗ}(L)$ - гарантий запас топлива (кг), предназначенный для компенсации повышенных значений относительного конечного рассогласования компонентов топлива $d\tilde{G}_{соб_окт}(L)$ и относительного суммарного остатка окислителя и горючего $d\tilde{G}_{бл_окт}(L)$, возникающих в единичном блоке при выработке суммарного рабочего запаса топлива связки в условиях отсутствия внутривзвешивочной и межвзвешивочной синхронизации моментов окончания компонентов топлива на L -ой ступени. Значения (%) характеристик $d\tilde{G}_{соб_окт}(L)$ и $d\tilde{G}_{бл_окт}(L)$ определяются по результатам статистического моделирования процессов опорожнения баков единичного блока L -ой ступени при неработающей системе СУРТ на момент обнуления суммарных рабочих запасов компонентов топлива на ступени.

Можно показать, что при отсутствии СУРТ на L -ой ступени для предотвращения преждевременного окончания одного из компонентов следует зарезервировать следующий гарантийный запас топлива:

$$G_{2ГЗ}(L) = 0,01 \sqrt{\left(d\tilde{G}_{соб_окт}(L) \frac{2G_o^{пз}(L) \cdot N_{бл}(L)}{K_m + 1}\right)^2 + \left((G_o^{пз}(L) + G_r^{пз}(L)) \cdot d\tilde{G}_{бл_окт}(L) \cdot N_{бл}(L)\right)^2}$$

где K_m - номинальное значение коэффициента соотношения расходов компонентов топлива через двигатели РН ($K_m=2,72$).

Окончательно выраженный приращением характеристической скорости РН результирующий эффект от использования СУРТ на L -ой ступени определяется следующим выражением

$$\Delta W_{эф}(L) = \Delta W_1(L) - \Delta W_2(L).$$

Относительное приращение характеристической скорости носителя (%), связанное с установкой СУРТ на L -й ступени, определяется соотношением:

$$\delta W_{эф}(L) = 100 \cdot \frac{\Delta W_{эф}(L)}{(\Delta W_{ИД}(L) + \Delta W_2(L))}.$$

Результирующий эффект от использования СУРТ на L -й ступени, выраженный приращением массы полезной нагрузки носителя $\Delta M_{пн}(L)$, можно приближенно оценить по известной величине приращения характеристической скорости $\Delta W_{эф}(L)$, воспользовавшись решением следующего уравнения

$$\Delta W_{ИД}(3) - \Delta W_{эф}(L) = U(3) \cdot \ln\left(\frac{M_H(3)}{M_K(3) + \Delta M_{пн}(L)}\right), L = 1, 2, 3.$$

Относительный выигрыш в полезной нагрузке (%) для L -й ступени определяется по формуле:

$$\delta M_{пн}(L) = 100 \cdot \Delta M_{пн}(L) / M_K(3).$$

Приведенная здесь методика содержит следующие упрощающие допущения:

- в формулу Циолковского должны входить полные гарантийные запасы, однако в условиях полной выработки или отсутствия СУРТ используемые здесь составляющие гарантийных запасов существенно превосходят неучтенные составляющие;
- в методике пренебрегается потерями удельной тяги, связанными с отклонением от номинала коэффициента соотношения расходов компонентов топлива при управлении.
- Анализ эффективности системы проводился с использованием ИД на разработку системы.

В результате статистического моделирования получены следующие значения характеристик разброса остатков компонентов топлива при наличии и отсутствии системы СУРТ:

Таблица 1. Характеристики разброса остатков компонентов топлива

Параметр	I ступень	II ступень	III ступень
$dG_{о_окт}(L)$	0,219	0,356	0,198
$dG_{г_окт}(L)$	0,330	0,427	0,310
$d\tilde{G}_{соб_окт}(L)$	5,965	6,484	6,054

Параметр	I ступень	II ступень	III ступень
$d\tilde{G}_{\text{дл окт}}(L)$	2,021	1,742	0,0

Результирующий эффект от использования СУРТ на L -й ступени, выраженный приращением характеристической скорости РН, а также гарантийные запасы топлива для вариантов ступеней РН с управлением расходом топлива и без такого управления представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результирующий эффект от использования СУРТ

Параметр	I ступень	II ступень	III ступень
$\Delta W_{\text{эф}}(L)$	143,86	113,27	210,49
$\delta W_{\text{эф}}(L)$	3,93	12,34	5,65
$\delta M_{\text{РН}}(L)$	4,38	3,45	6,41
$G_{123}(L)$	2037,19	1937,91	1186,15
$G_{223}(L)$	48984,88	24426,64	12375,55

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценка значений суммарного приращения характеристической скорости в результате установки на носителе системы СУРТ с характеристиками, представленными в работе, подтверждает целесообразность установки системы СУРТ на данном носителе.
2. Исключение СУРТ из состава носителя влечет существенный проигрыш в энергетике РН.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы целесообразности и эффективности использования системы СУРТ, возникающие на этапах разработки терминальных алгоритмов управления расходом топлива и предварительной оценки динамических и точностных характеристик системы. Представлена приближенная методика оценки эффективности СУРТ, и проведена упрощенная оценка эффективности системы СУРТ РН СТК, выраженная приращениями характеристической скорости РН и ее полезной нагрузки вследствие использования СУРТ на отдельных ступенях носителя.

Литература

1. Андриенко А.Я., Иванов В.П. Вопросы теории и практики создания бортовых терминальных систем жидкостных ракет-носителей // Автоматика и телемеханика. 2013, № 3. – С 103-119.
2. 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 управления, технология отработки бортового обеспечения). Юбилейный сборник трудов, посвященный 90-летию ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и 55-летию ОКБ-23-КБ Салют». – М.: Воздушный транспорт. 2006. – С. 579-592.
3. Иванов В.П., Завадский В.К., Гуськов А.Д., Дишель В.Д., Васягина И.В., Кислик В.Д. 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. II. Материалы пленарного заседания (доклады и сообщения) / МИРЭА, 23 апреля 2008г. – М.: ООО «Научно-издательский центр «Инженер», 2008. – С.56-65.
4. Жуков В.А., Иванов В.П., Завадский В.К., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Вопросы проектирования систем управления внутрибаковыми процессами ракетных средств выведения (часть 2) / Материалы 35-й Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий, посвященная 70-летию Победы "Наука и технологии" (Миасс. 2015). – М.: Наука и Технологии Материалы XXXV Всероссийской конференции. 2015. Т. 4. – С.16-29.
5. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. – М.: Бином. Лаборатория знаний. 2011. – 407с.