

Теоретические аспекты создания уровнемера для системы управления расходом топлива жидкостной ракетной двигательной установки с использованием волоконно-оптических линий связи

© С.С. Курдов, М.П. Ананьев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предложен новый уровнемер для системы управления расходом топлива в жидкостном ракетном двигателе, созданный на основе распределенного датчика контроля жидкости в топливном баке ракеты. Разработан концептуальный блок системы управления расходом топлива, позволяющий увеличить качественные показатели энергетических характеристик жидкостной ракетной двигательной установки. Рассмотрены существующие линейные системы слежения и контроля синхронизации расхода топлива. Применен особый физический подход к решению технической задачи, заключающийся в использовании физических свойств оптического волокна и локальной деформации кабеля. Обоснован выбор оптоволоконного кабеля для уровнемера. Представлена блок-схема аппаратного обеспечения уровнемера. Проведен сравнительный анализ предложенного физического подхода и гипотетического аналога уровнемера системы управления расходом топлива жидкостной ракетной двигательной установки.

Ключевые слова: ракета-носитель, система управления расходом топлива, волоконно-оптические линии, уровнемер

Введение. Для современной космонавтики наряду с обеспечением надежности выведения полезной нагрузки на заданную орбиту необходимым требованием является минимизация топливно-энергетических затрат. Разработка точного, а главное, линейного уровнемера системы управления расходом топлива обеспечит решение части поставленной задачи. Постоянный контроль и управление расходом компонентов топлива позволят точнее синхронизировать, без потерь на компенсацию, опорожнение баков компонентов топлива, а также полностью избавиться от гарантийных запасов топлива в баках в момент их полной выработки при неизменной стартовой массе самих компонентов топлива, тем самым улучшив энергетические характеристики ракеты-носителя. Последовательное развитие ракет-носителей (РН) на жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) в совокупности с развитием соответствующих элементов подачи, хранения, контроля истечения компонентов топлива в основном и определяет эволюцию современных средств выведения полезного груза на заданную орбиту. Качество контроля и управление истечением компонентов топлива наряду с созданием различных видов

энергоемкого топлива неотъемлемо влияет на конечные значения энергетических параметров РН, в связи с чем разработка оптимальных систем и средств управления жидкостной ракетной двигательной установкой, а именно автоматической системы управления ЖРД, является актуальной задачей.

Получение максимальных энергетических характеристик при работе ЖРД обеспечивается дросселированием тяги, которое происходит за счет изменения массового расхода топлива. Система управления расходом топлива (СУРТ) осуществляет контроль за данным процессом. Чем точнее система, тем меньше потерь от неточности подачи и смешивания компонентов топлива, тем выше энергетические характеристики ЖРД. В конечном счете, с развитием СУРТ отпадает необходимость в гарантийных запасах топлива [1] на борту РН. СУРТ построена на основе распределенных датчиков, т. е. устройств непрерывного (по высоте бака) измерения уровня жидкости в реальном времени, точнее, на основе дискретного принципа контроля уровня жидкости, который заключается в сборе информации по показаниям отдельных точек в баке ракеты.

Ракеты-носители во время полета подвержены разнообразным существенным нагрузкам, создающим на борту специфические условия и ограничения, которые оказывают заметное влияние на бортовую систему контроля компонентов топлива. Для включения в номенклатуру бортовой СУРТ уровнемер должен быть устойчивым к агрессивным и взрывоопасным средам, при криогенных температурах соответствовать массогабаритным параметрам и крайне высоким условиям надежности, а также обеспечивать электромагнитную совместимость компонентов системы, отсутствие кавитационного воздействия жидкости в баке и высокую точность измерений, в частности в условиях колебаний зеркала жидкости, выполнять специальные требования.

Перечисленные подробности натолкнули на мысль о создании новой СУРТ на базе линейного датчика. В настоящее время известно техническое решение, обоснованное физическими свойствами оптического волокна, которые контролируют изменения параметров системы, вносимые микроизгибом волокна в проходящий сигнал. Концептуальный облик новой СУРТ заключается именно в таком техническом решении, определяющем микроизгиб оптического волокна [2].

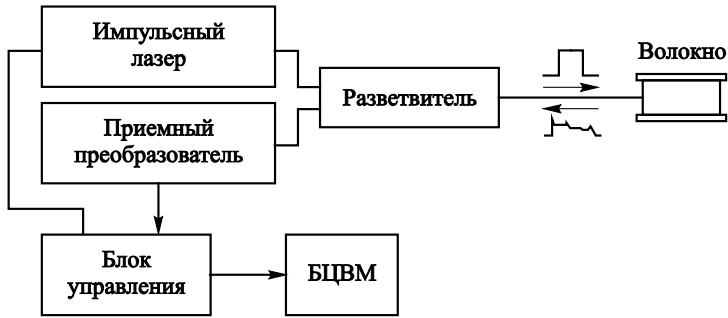
Целью настоящей работы является разработка теоретических аспектов создания новой СУРТ с жидкостной ракетной двигательной установкой на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), задачей — комплексная демонстрация аппаратного обеспечения разрабатываемой СУРТ, выбор конкретных технических элементов системы, анализ гипотетического аналога и уже известных систем подобного типа.

Анализ консервативных линейных уровнемеров. Обзор известных вышедших из эксплуатации, а также современных РН, имеющих системы контроля и управления расходом компонентов топлива, выявляет использование консервативных методов дискретного контроля уровня компонентов топлива наряду с некоторыми линейными методами. В сверхтяжелой РН «Энергия» применялись линейные емкостные датчики уровня топлива емкостью 500–600 пФ, которые обеспечивали измерение в ограниченном диапазоне верхних частей баков ступеней ракеты. Из современных отечественных ракет только на разновидностях РН «Союз» применяются емкостные линейные датчики контроля уровня высотой 500...700 мм заправки на всех нижних ступенях. Из зарубежных ракет можно выделить семейство ракет Atlas и Ariane 5. На ступени Centaur РН Atlas-Centaur для системы регулирования стехиометрии компонентов топлива стоят непрерывные емкостные датчики, как и на РН Ariane 5, а на первых ступенях РН Atlas 3, Atlas 5 и Common Centaur установлены уровнемеры, осуществляющие измерение уровня жидкости в резервуаре дифференциальными датчиками давления по гидростатическому методу. В космонавтике для линейных СУРТ используют только два метода контроля компонентов топлива: емкостный и реже — гидростатический. Очевидны их минусы: современные емкостные датчики дают погрешность 0,5 % [3], дифференциальные датчики давления — еще большую погрешность в силу действия закона Бернулли [4].

Перегрузка до ~10 g в баке ставит под сомнение перспективность использования гидростатического метода в качестве уровнемера для СУРТ современных РН. По сравнению с ВОЛС гидростатические и емкостные датчики являются несовершенными техническими устройствами.

Аппаратное обеспечение уровнемера. В качестве чувствительного элемента предлагаемого уровнемера (на основе ВОЛС) выступает оптическое волокно. Точность контроля напрямую зависит от его свойств и качества исполнения. В настоящее время разработаны оптические кабели, устойчивые к таким агрессивным средам, как амил и гептил [5], а также сенсоры современных хладостойких волоконно-оптических датчиков. Указанные сенсоры способны обеспечить работу уровнемера при температуре $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. Таким образом, данный уровнемер не зависит от температуры окружающей среды, поэтому пользуется приоритетом в ракетно-космической технике.

Рассмотрим аппаратное обеспечение уровнемера (рисунок). Как видно из схемы, в оптическое волокно через ответвитель направляется световой импульс от полупроводникового лазера, сформированный блоком управления. Часть этого излучения вследствие рэлеевского рассеяния излучается обратно через ответвитель на высокочувствительный



Блок-схема аппаратного обеспечения уровнемера

приемник. Приемник передает сигнал на блок управления, который измеряет временную зависимость доли мощности светового сигнала, распространяющегося в обратном направлении. Блок управления формирует сигнал на создание светового импульса, синхронизированного по частоте с электрическими импульсами, посылаемыми на бортовую центральную вычислительную машину (БЦВМ), которая по сформированному закону изменения мощности сигнала по длине оптического волокна (так называемой рефлектограмме) дает управляющий сигнал на электродроссель, тем самым изменяя расходную характеристику ЖРД. Параметры полученной рефлектограммы позволяют с высокой точностью определять локальное механическое воздействие на оптоволокно. Современные оптические рефлектометры способны обеспечить динамический диапазон в 32 дБ на 600 км ВОЛС [7], а удельную разрешающую способность — до долей сантиметра.

Анализ микрорадарной системы как возможного аналога уровнемера на основе ВОЛС. Сегодня абсолютное большинство СУРТ жидкостных ракетных двигательных установок построены на дискретном методе определения уровня компонентов топлива. Наиболее вероятным гипотетическим аналогом, способным стать распределенным датчиком определения уровня компонентов топлива в СУРТ для жидкостных ракетных двигательных установок, является устройство, основанное на принципе микрорадарной локации. В качестве конкретной модели рассмотрим «Микрорадар-216» [8].

Это устройство контролирует уровень жидкости и сыпучих материалов в различных резервуарах с помощью физического принципа радиолокации мониторинга поверхности контролируемой среды СВЧ-сигналом.

Уровеньмер на основе микрорадарной локации имеет разрешительную способность, отличающуюся от соответствующего показателя от уровнемера на основе микроизгиба оптоволокна только в рамках заданной погрешности. Однако вследствие колебаний, возникающих в возмущенной среде ракетного бака, погрешность такого уровнемера значительно выше. Важно учитывать, что материал чув-

ствительного элемента ограничивает диапазон работы данного устройства наличием высококипящих видов компонентов ракетного топлива, в частности азотнокислотных окислителей как крайне агрессивных коррозионных кислот, которые не позволяют установить уровнемер на изделия, пребывающие в длительном хранении в заправленном соответствующими видами топлива состоянии без дополнительного специализированного покрытия, что к тому же вносит погрешность в конечное значение уровня. Частота опроса сигнала также должна быть ограничена требованиями параметров по взрывоопасности вследствие нагрева жидкости.

Технические системы, основанные на применении волоконно-оптических линий связи, характеризуются обеспечением особо высокого уровня безопасности. Отсутствие в зоне контроля мощного электрического воздействия, замененного световой энергией меньше 1,1 мВт, в отличие от микрорадара гарантирует высокую безопасность при тех же точностных характеристиках. Очевидна и возможность его дальнейшей модернизации до элемента комбинированной СУРТ, что, несомненно, является положительным фактором, которого можно достичь с помощью магнитооптических свойств данного волокна.

В любом случае тактность современных БЦВМ на борту РН с жидкостной ракетной двигательной установкой приводит к дискретности измерения и управления в системе. Это определяет невозможность замены только одного уровнемера для всей системы. Для его широкого внедрения потребуется переход от дискретной модели программного алгоритма расчета уровня компонентов топлива к линейной, а это потребует создания нового программного обеспечения для БЦВМ и ее аппаратной составляющей. Таким образом, оптимально создать уровнемер для новой РН, а не заменять БЦВМ на современных версиях РН.

Заключение. Предложенный метод можно использовать не только в ракетно-космической технике для повышения энергетических характеристик РН, но и для технических средств, обеспечивающих контроль за технологическими процессами, связанными с жидкостями, например в нефтеперерабатывающей промышленности. Разработанная СХРТ позволяет увеличивать до 15 % массу полезной нагрузки на заданной орбите за счет ликвидации гарантийных запасов ракетного топлива на борту ракеты. Анализ обоснованного технического решения, которое позволяет устанавливать область локализации микроизгиба, показал возможность создания экспериментальной модели уровнемера. Выявлена также необходимость совершенствования современных БЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гаврелюк О.П., Кирсанов В.Г. Гарантийные запасы топлива для ракет космического назначения. *Космическая техника и технологии*, 2015, № 3 (10), с. 100–106.

- [2] Курдов С.С. Уровнемер для системы управления расходом топлива жидкостных ракет-носителей с использованием волоконно-оптических линий. *Молодежный научно-технический вестник*, 2016, № 11. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/851970.html>
- [3] Долгов Б.К., Балакин С.В. *Способ определения уровня диэлектрического вещества*. Пат. 2456552 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/26, G 01 R 17/10, № 2010151714/28, заявл. 15.12.2010, опубл. 20.07.2012, бюл. № 20, 12 с.
- [4] Жданкин В. Приборы для измерения уровня. *Современные технологии автоматизации*, 2002, № 3, с. 6–19.
- [5] *Полевые оптические кабели ОК-ПН-03(05)-0.7-2*. ТУ 16.К71-298-2001–2013, 3 с.
- [6] Буймистряк Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий. *Control Engineering Россия*, 2013, № 3 (45), с. 34–40.
- [7] *Оптический рефлектометр — измеритель оптической мощности VISA. Руководство по эксплуатации*. Версия 2.12, 2015, 48 с.
- [8] *Уровнемер «Микрорадар-216». РЭ216.000-06. Руководство по эксплуатации*. URL: <http://www.microradartest.com/dopmat/216/216ruporre.pdf> (дата обращения 28.01.2017).

Статья поступила в редакцию 02.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Курдов С.С., Ананьев М.П. Теоретические аспекты создания уровнемера для системы управления расходом топлива жидкостной ракетной двигательной установки с использованием волоконно-оптических линий связи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-4-1607>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.

Курдов Сильвестр Сергеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер КБ «Салют». e-mail: ksylvestr@yandex.ru

Ананьев Михаил Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: amp.tlml@mail.ru

Development ideas of a liquid carrier-rocket propellant level gauge using optical fiber lines

© S.S. Kurdov, M.P. Ananyev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

In modern space engineering, it is necessary to provide minimal fuel and energy consumption while providing high level of reliability for launching a payload to the required orbit. Development of a precise and linear level gauge of the fuel consumption control system can solve a part of the problem. Both the continuous monitoring and guiding the fuel component consumption make it possible to synchronize tanks discharging more precisely and loss-free. It also allows getting rid of the fuel safety stocks in the tanks in case of their full discharge, with the same fuel components launch mass being maintained. Thus, it gives a boost to the carrier-rocket. In this case, a particular physical approach is applied to solving the technical problem, which consists of using both physical properties of optical fiber and the impact of cable local deformations on the backscatter phenomenon. A new level gauge is introduced for LRE fuel consumption management system, which is based on the distributed control fluid sensor located in rocket fuel tank. The concept of this fuel consumption management system is described. It allows for an increase in LRE power characteristics. We examined some existing linear tracking systems as well as fuel consumption synchronization systems of liquid carrier-rockets. We justified the choice of optical fiber cable for a level gauge and provided a level gauge hardware flowchart. Furthermore, we carried out the comparative analysis of the described physical method with a hypothetical analogue of a level gauge for LRE fuel consumption control system.

Keywords: carrier-rocket, fuel consumption control system, optical fiber lines, level gauge

REFERENCES

- [1] Gavrelyuk O.P., Kirsanov V.G. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — The Space Engineering and Technology*, 2015, no. 3 (10), pp. 100–106.
- [2] Kurdov S.S. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik — Youth Scientific and Technical Bulletin*, 2016, no. 11.
Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/851970.html>
- [3] Dolgov B.K., Balakin S.V. *Sposob opredeleniya urovnya dielektricheskogo veshchestva* [The way to measure the level of dielectric substance]. Patent RF 2456552, MPK G 01 F 23/26, G 01 R 17/10, no. 2010151714/28, 2012, bull. no. 20, 12 p.
- [4] Zhdankin V. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii — Contemporary Technologies in Automation*, 2002, no. 3, pp. 6–19.
- [5] *Polevyye opticheskie kabeli* [Field optical cables]. OK-PN-03(05)-0.7-2. TU 16. K71-298-2001–2013, 3 p.
- [6] Buymistryuk G. *Novosti elektroniki i elektrotekhniki Rossii — Control Engineering Russian*, 2013, no. 3 (45), pp. 34–40.
- [7] *Opticheskiy reflektometr izmeritel opticheskoy moschchnosti VISA. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Versiya 2.12* [Optical time domain reflectometer of optical power meter with VISA. The user's manual. Version 2.12]. 2015, 48 p.

- [8] *Urovnemer "Mikroradar-216". RE216.000-06. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [The Sensor "Microradar-216". PE216.000-06. The user's manual]. Available at: <http://www.microradartest.com/dopmat/216/216ruporre.pdf> (accessed January 28, 2017).

Kurdov S.S., student, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, engineer, Design Bureau Salyut.
e-mail: ksylvestr@yandex.ru

Ananyev M.P., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket and Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: amp.tlm1@mail.ru