

На правах рукописи

Гончаров Владислав Борисович

**АППАРАТНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ТОПЛИВА В
БАКАХ РАКЕТОНОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО
МЕТОДА**

Специальность 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена на кафедре «Автоматические системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

Научный руководитель:	Ивченко Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматические системы» ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»
Официальные оппоненты:	Бусурин Владимир Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Подмастерьев Константин Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроения, метрологии и сертификации» ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
Ведущая организация:	Акционерное общество «Конструкторское Бюро Химавтоматики» (АО КБХА), г. Воронеж

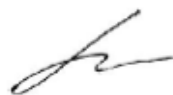
Защита состоится «26» марта 2020 г. в 13-00 ч. на заседании диссертационного совета Д.212.131.03 при «МИРЭА - Российский технологический университет», по адресу: 119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78, ауд. Г-412.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МИРЭА и на сайте www.mirea.ru

Отзывы просим отправлять в 2-х экземплярах, заверенных печатью, по адресу 119454, Москва, проспект Вернадского, д. 78, ученому секретарю совета Д.212.131.03.

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.131.03
кандидат технических наук, доцент



Андрианова Е.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Распределенные емкостные и индуктивные уровнемеры компонентов топлива, используемые в данный момент в большинстве ракетоносителей с самыми распространенными двухкомпонентными жидкостными двигателями, не могут выполнять измерения с высокой точностью. Это не позволяет повысить экономию компонентов топлива и реализовать более точные пропорции во время работы двигателя, увеличить массу полезной нагрузки и снизить вес ракетоносителя. Недостатками емкостных уровнемеров является необходимость применения специальных мер для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности, подверженность влиянию электромагнитных помех. Емкостные уровнемеры не дают информации о положении измеряемой среды между чувствительными элементами. Более того, постоянно возрастающие требования в ракетостроении предъявляют к уровнемеру жесткие критерии: высокую точность определения уровня, небольшие массогабаритные показатели, возможность работы в специфическом температурном диапазоне, помехозащищенность, пожаро- и взрывобезопасность, высокую электроизоляционную прочность, высокую коррозионную стойкость. Уровнемер должен измерять уровень компонентов ракетного топлива как при заправке, так и в полете. В настоящее время для заправки и расхода используются уровнемеры разных типов. Необходимые результаты можно получить, используя волноводный метод. Поэтому тема разработки аппаратно-алгоритмических средств, которые позволяют повысить точность измерения уровня компонентов топлива в современных ракетоносителях, является **актуальной**.

Цель диссертационной работы – разработка прецизионного уровнемера на основе волноводного метода для систем определения уровня топлива в баках ракетоносителей. Применение такого уровнемера позволит достичь экономии компонентов топлива, реализуя более точные пропорции компонентов топлива во время работы двигателя. Уровнемер должен обеспечивать измерение уровня компонентов ракетного топлива как при заправке ракетоносителя, так и в полете.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- обосновать возможность применения волноводного уровнемера для контроля уровня компонентов топлива ракетносителя;
- обосновать целесообразность построения уровнемера топлива ракетносителя на основе СВЧ волноводов с применением линейной частотной модуляции;
- разработать функциональную и принципиальную электрическую схемы СВЧ уровнемера компонентов ракетного топлива;
- обосновать тип волновода, антенны и их параметры;
- разработать математическую модель волноводного уровнемера;
- исследовать возможность повышения точности СВЧ уровнемера компонентов ракетного топлива с помощью цифровой обработки сигналов с применением вейвлет-анализа и конструктивных решений;
- разработать алгоритм обработки сигнала, искаженного шумом от бурлящей поверхности компонентов топлива;
- провести анализ влияния шумовых воздействий на сигнал СВЧ уровнемера компонентов ракетного топлива с цифровой фильтрацией;
- провести анализ погрешностей частотного метода измерения уровня.

Объект исследований – уровнемер компонентов топлива ракетносителей на основе волноводного метода.

Предмет исследований – математическая модель определения уровня компонентов топлива ракетносителей на основе волноводных уровнемеров.

Методы исследования – в работе использован комплексный подход, включающий методы математического моделирования, теорию электромагнитного поля, теорию волновых процессов, теорию цифровой обработки сигналов, теорию диэлектриков и экспериментальные данные.

На защиту выносятся следующие основные научные положения:

1. Функциональная схема уровнемера компонентов ракетного топлива, основанная на демпфировании бурлящей

поверхности, позволяющая получить отраженный сигнал независимо от диэлектрических свойств и колебаний среды, что дает возможность унифицировать, повысить точность, массогабаритные показатели применяемой в настоящее время системы контроля заправки и управления расходом топлива.

2. Алгоритм измерения волноводным уровнемером компонентов ракетного топлива, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании с механизмом подбора вейвлета согласно теореме об ординарности потока отказов, позволяющий получить результаты обработки сигнала с шумом от бурлящей поверхности компонентов топлива, совпадающие с результатами отражения от идеальной поверхности. Возможно применение алгоритма для фильтрации различных частотных сигналов.

3. Математическая модель волноводного уровнемера жидкости, учитывающая диэлектрическую проницаемость измеряемой среды и характеристики волновода, которая позволяет получить обоснование повышенной точности измерения уровня компонентов ракетного топлива по сравнению с применяемыми в данный момент уровнемерами, благодаря чему достигаются заданные пропорции окислителя и горючего на каждом этапе полета ракетоносителя.

4. Методика определения характеристик волновода необходимых для корректного отраженного сигнала от сред с малой диэлектрической проницаемостью, которая позволяет выбрать тип и размер волновода, значение частоты задающего генератора, учитывая габариты баков компонентов топлива.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- предложена функциональная схема волноводного уровнемера компонентов топлива ракетоносителя, позволяющая получить отраженный сигнал независимо от диэлектрических свойств и колебаний среды за счет демпфирования бурлящей поверхности, что дает возможность достичь экономии компонентов топлива, реализуя более точные пропорции во время работы двигателя;

- разработана математическая модель уровнемера, учитывающая диэлектрическую проницаемость измеряемой среды и характеристики волновода, которая позволяет получить

корректный для обработки сигнал отражения от среды с малой диэлектрической проницаемостью, синтезировать параметры уровнемера;

- разработан алгоритм вычисления уровня топлива, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании с механизмом подбора вейвлета, позволяющий снизить влияние помех, за счет чего реализуются более точные пропорции компонентов топлива во время работы двигателя и достигается их экономия.

Практическая ценность проведенных исследований состоит в том, что с помощью предложенной математической модели волноводного уровнемера и алгоритма удастся сократить время изготовления и стоимость стендового оборудования, имитирующего процесс заправки топливных баков окислителя и горючего ракетносителей, повысить точность применяемых в данный момент уровнемеров компонентов топлива ракетносителей. Вследствие этого, с помощью системы управления двигателями поддерживается оптимальное соотношение компонентов топлива и корректная работа двигателей в полете, определяются оптимальные запасы окислителя и горючего, заправляемые на стартовой позиции, необходимые для выполнения задач, достижения максимального быстродействия, снижения веса и увеличения максимальной полезной нагрузки ракетносителя, а также увеличения максимального пройденного расстояния в полете и экономии компонентов топлива ракетносителя.

Достоверность основных научных положений и выводов обосновывается сопоставлением полученных теоретических и экспериментальных результатов, а также результатов других авторов.

Ценность работы для науки и практики определяется тем, что разработанная математическая модель уровнемера позволяет создать принципиально новую систему опорожнения баков, повысить ее точность, надежность, универсальность и улучшить массогабаритные показатели. Результаты работы внедрены в АО «ГосНИИП» (Акт о внедрении от 07.06.18 г.) и «МИРЭА – Российский технологический университет» (Акт внедрения в учебный процесс от 29.10.18 г.).

Личный вклад автора состоит в:

- 1) проведении анализа известных способов измерения уровня жидкости и уровнемеров компонентов топлива современных ракетоносителей;
- 2) разработке математической модели нового волноводного уровнемера;
- 3) разработке алгоритма цифровой обработки информации для повышения точности уровнемера;
- 4) разработке метода, позволяющего измерить уровень бурлящей поверхности;
- 5) проведении моделирования на ЭВМ;
- 6) подготовке основных публикаций.

Публикации и апробация работы. Основные положения диссертации обсуждались на заседаниях кафедры «Автоматические системы» РТУ МИРЭА в 2013-2019 г. г. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 – в изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК. Научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на 62-ой научно-технической конференции РТУ МИРЭА в 2013 г., конференции «Современные технологии в задачах управления и автоматики и обработки информации» г. Алушта в 2013 г., 9-ой научно-технической конференции «Люльевские чтения» г. Екатеринбург в 2014 г., конференции молодых специалистов АО «ГосНИИП» в 2015 г., научно-техническом совете АО «ГосНИИП» в 2019 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников и 13 приложений. Работа изложена на 183 страницах и содержит 71 рисунок и 12 таблиц. Список использованных источников включает 167 ссылок по теме проводимых в диссертационной работе исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная и практическая значимость. Поставлены цель и задачи исследования.

В первой главе рассмотрены узлы аппаратно-алгоритмических средств систем определения уровня топлива в баках ракетоносителей. Аппаратно-алгоритмические средства включают аппаратную часть в виде датчика и программную часть в виде цифровой обработки информации с датчика, соответственно присутствуют погрешности аппаратной части и программной. В современных ракетоносителях в состав аппаратно-алгоритмических средств входит система контроля заправки и управления расходом топлива (функциональная схема изображена на рис. 1), решающая задачу контроля положения компонентов топлива в баках в процессах заправки, полета, стоянки, слива, а также выдачу сигналов в систему управления. Проанализированы составляющие погрешности измерения в системах определения уровня топлива в баках ракетоносителя, большую часть которых вносит датчик.

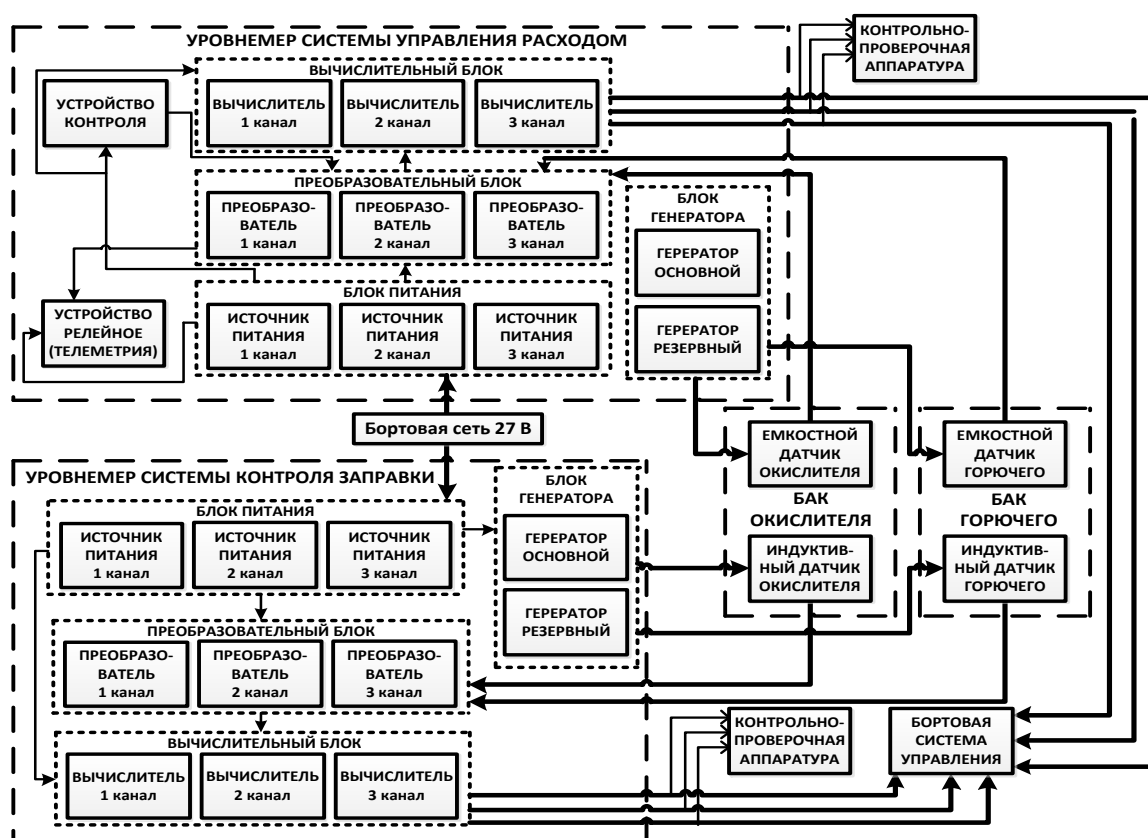


Рис. 1. Функциональная схема системы контроля заправки и управления расходом топлива

Проанализированы все распространенные методы измерения уровней жидкостей, и сделаны выводы о возможности

применения различных способов для поставленной задачи повышения точности.

Обоснована целесообразность применения уровнемера компонентов топлива, работа которого основана на СВЧ. Сформулирована постановка задачи разработки математической модели уровнемера и адаптации ее к условиям измеряемой среды.

Проведен библиографический анализ работ в области волноводных уровнемеров, анализ патентной и научно-технической литературы, а также применяемых в настоящее время новейших моделей волноводных уровнемеров мировых лидеров в производстве уровнемеров.

Проблема использования одного из стандартных волноводных уровнемеров заключается в плохом качестве отраженного сигнала от сред с малым значением диэлектрической проницаемости, как у компонентов топлива. Поэтому отраженный от поверхности среды сигнал является непригодным для его последующей корректной обработки.

Сформирован комплекс идей по повышению точности волноводных уровнемеров, которые решаются в последующих главах.

Во второй главе исследуются уровнемеры радарного типа, в том числе волноводные, которые на сегодняшний день являются самыми универсальными. Они не имеют контакта с контролируемой средой и могут работать в сложных условиях, где невозможно использование других методов. Волноводные уровнемеры обладают высокой точностью (до 1 мм) и менее требовательны к условиям измеряемой среды.

Волноводные уровнемеры используют явление отражения электромагнитных колебаний от поверхности среды. Результирующий линейно-частотно модулированный сигнал несет в себе информацию об уровне, значение которого получается после обработки. Отличие от радарных уровнемеров, где сигнал распространяется в газовой среде, в наличии волновода, по которому распространяется сигнал. Данный метод позволяет минимизировать влияние помех.

Расстояние до поверхности уровня имеет вид:

$$R_0 = \frac{cT_M F_B}{4\Delta F \sqrt{\epsilon\mu}} , \quad (1)$$

где c – скорость света, ΔF - девиация частоты, F_B – разностная частота, T_M - период, ε , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Рассмотрена зависимость диэлектрической проницаемости компонентов ракетного топлива от различных физических величин.

Проведен анализ частотного метода измерения уровня волноводным уровнемером. Рассмотрена математическая модель стандартного волноводного уровнемера, и выдвинуты решения для доработки модели применительно к измерению компонентов жидкого ракетного топлива.

В третьей главе разработаны функциональная и принципиальная электрическая схемы СВЧ уровнемера уровня компонентов ракетного топлива на высокочастотной элементной базе. Условно уровнемер можно разделить на три блока: передающий блок генератора, приемная часть генератора и блок обработки.

На функциональной схеме (рис. 2) цепь формирования частотного сигнала состоит из генератора, фильтра нижних частот и усилителя.

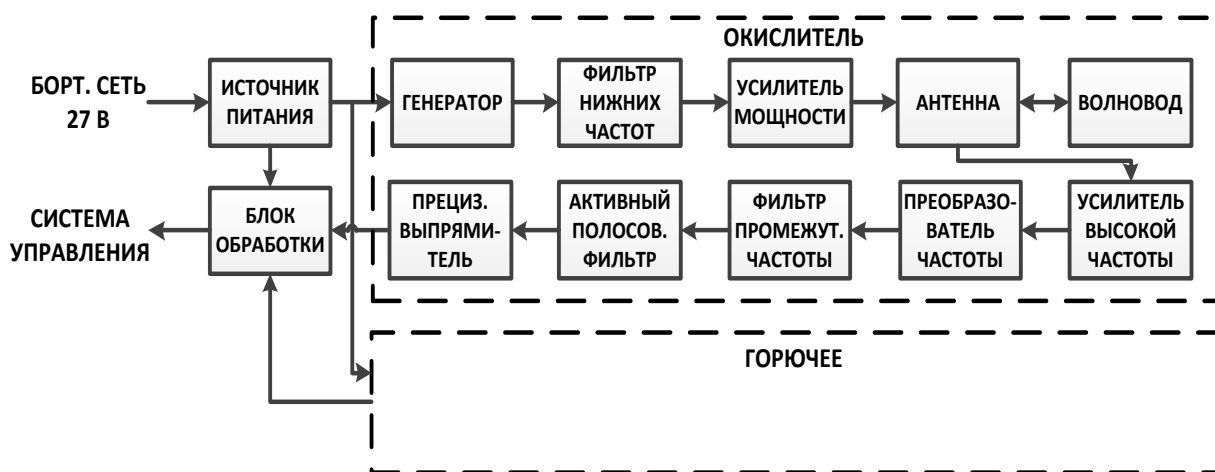


Рис. 2. Функциональная схема СВЧ уровнемера компонентов ракетного топлива

В принимающей части реализовано усиление и преобразование частоты, фильтрация и выпрямление сигнала. Источник питания формирует все необходимые напряжения для функционирования уровнемера. Блок обработки основан на современном микроконтроллере. Также в состав функциональной

схемы входят антенна и волновод. В каждом баке с компонентом топлива свой датчик, общими являются блоки обработки и питания, способные обеспечить работу нескольких датчиков одновременно.

Для практической реализации в соответствии со всеми блоками функциональной схемы реализована принципиальная схема СВЧ уровнемера компонентов ракетного топлива на высокочастотной элементной базе.

При проектировании проанализированы достоинства и недостатки разных типов волноводов. Учитывая необходимость обеспечить минимальный уровень потерь и большую предельную мощность, простоту конструкции и расчетов, был обоснован выбор прямоугольного волновода.

Исследованы процессы, происходящие в прямоугольном волноводе, определены структуры полей. На примере самой распространенной волны H_{10} подробно проанализирована структура поля и распределение токов проводимости по стенкам прямоугольного волновода.

Исследовано влияние частоты задающего генератора волноводного уровнемера на различные параметры прямоугольного волновода. Приведен график для минимального и максимального из исследуемых размеров прямоугольного волновода: 50 - 25 мм и 900 - 450 мм зависимостей длины волны $\lambda(f)$ и фазовой скорости $v(f)$ от частоты (рис. 3), вычисленный с помощью формул (2)-(3).

$$\lambda(f) = \frac{c}{f \sqrt{1 - \frac{c^2}{f^2 4a^2}}}, \quad (2)$$

где a – размер большей стороны волновода, c – скорость света, f – частота.

$$v(f) = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{f^2 4a^2}}} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}} \quad (3)$$

Известно, что размеры прямоугольного волновода и частота кардинально влияют на электрические характеристики волновода. В ходе исследований показано, что при увеличении частоты до 10^{10} Гц длина волны, фазовая скорость и волновое сопротивление имеют тенденцию к уменьшению. Групповая скорость и коэффициент затухания – наоборот увеличиваются.

Более значительное влияние частоты на электрические характеристики наблюдается у волновода с меньшими сторонами. Учитывая габариты баков компонентов топлива и требование к повышенной точности измерений, обоснован выбор волновода с наименьшими размерами.

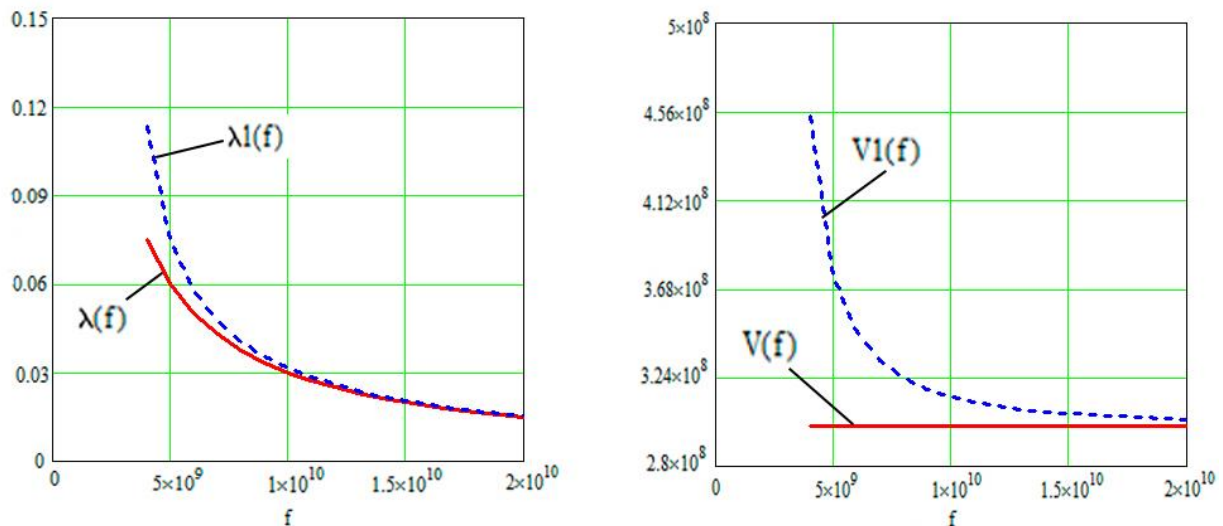


Рис. 3. Зависимость длины волны (слева) и фазовой скорости (справа) от частоты для волновода с параметрами $a=900$, $b=450$ мм (сплошная линия) и для волновода с параметрами $a=50$, $b=25$ мм (пунктирная линия)

Рассчитаны основные параметры электромагнитной волны H_{10} в прямоугольном волноводе для различных размеров, частот и измеряемых сред (керосин и жидкий кислород). Повышение частоты позволило получить большие значения групповой скорости, коэффициента распространения и соответственно малые значения критической частоты, длины волны, фазовой скорости, характеристического сопротивления и коэффициента затухания. Диэлектрическая проницаемость керосина и жидкого кислорода больше всего повлияли на характеристическое сопротивление и коэффициент затухания. Показано, что разницу можно снизить за счет увеличения частоты. Учитывая наиболее критичные параметры - минимальный коэффициент затухания волны, большой коэффициент распространения волны и критическую длину волны, выдвинуто обязательное требование к высокой частоте уровнемера.

Проведено моделирование трех типов антенн: стержневой диэлектрической, рупорной и волноводно-щелевой. Учитывая ширину диаграммы направленности, коэффициент

направленного действия и габариты, выбрана волноводно-щелевая антенна с 16-ю щелевыми излучателями.

Предложена функциональная схема уровнемера с поплавком внутри волновода, что позволило получить идеальный отраженный сигнал от зеркальной поверхности в форме сечения волновода независимо от диэлектрических свойств среды, исключить влияние отражения части частотного сигнала от дна бака и свести к минимуму погрешности от колебаний измеряемой поверхности (рис. 4).

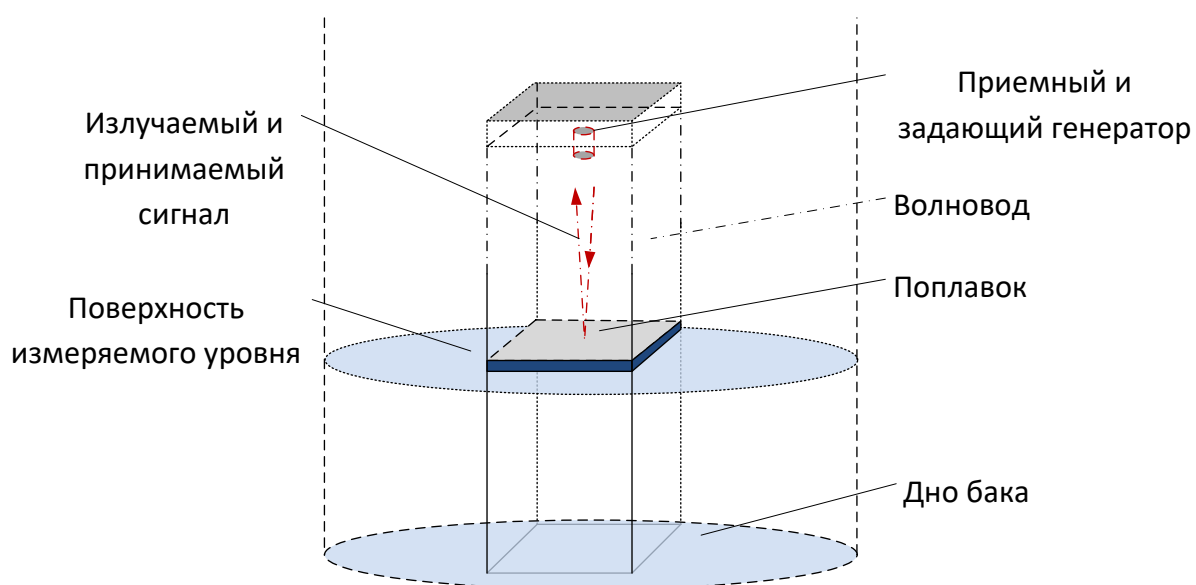


Рис. 4. Функциональная схема волноводного уровнемера с поплавком

В четвертой главе рассматриваются вопросы цифровой обработки сигналов. Рассмотрены плюсы и минусы спектрального анализа, основанного на преобразовании Фурье, оконного преобразования Фурье. Предложен альтернативный вариант, лишенный недостатков перечисленных преобразований – вейвлет-преобразование, главное преимущество которого – получение представления о всем сигнале, когда частотный состав гармоник меняется со временем. При вейвлет-преобразовании производится разложение по функциональному базису. В качестве базисных функций выступают вейвлеты, получающиеся растяжением и сдвигом материнского вейвлета:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (4)$$

где $\Psi(t)$ – материнский вейвлет, t – время, b – временной сдвиг, a – временной масштаб.

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала задается путем вычисления вейвлет-коэффициентов:

$$C(a,b) = \int_B S(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

Коэффициенты a связаны с частотой f через передаточную функцию:

$$f(a) = F_c / a\Delta, \quad (6)$$

где F_c – центральная частота вейвлета, Δ – длительность выборки.

Рассмотрена возможность использования аппарата вейвлет-анализа для оценки сигналов волноводного уровнемера. Разработан новый алгоритм вычисления уровня компонентов топлива в баках ракетносителя (блок-схема изображена на рис. 5), позволяющий снизить влияние помех с помощью непрерывного вейвлет-преобразования и механизма подбора вейвлета путем сравнения разницы между вычисленными результатами сигнала разностной частоты F_B согласно теореме об ординарности потока отказов. Неточный результат одного из вейвлетов не будет влиять на итоговый результат вычислений разностной частоты F_B . Разработанный алгоритм реализован в среде Matlab. Программа «Определение разностной частоты с помощью подбора вейвлет-функций» зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности с регистрационным номером 2019618617 от 02.07.2019 г.

Алгоритм вычисления уровня топлива состоит из следующих пунктов:

- вычисление пространства аппроксимирующих коэффициентов $C(a,b)$ по формуле (5) в диапазоне $0 \leq a \leq N$ и $0 \leq b \leq T_M/2$ с длительностью выборки Δ ;
- вычисление вейвлет-спектра для всех рассматриваемых вейвлет-функций;
- определение локальных экстремумов пространства коэффициентов $C(a,b)$ для каждой вейвлет-функции;
- вычисление усредненной ординаты этих экстремумов на оси коэффициентов a_0 для каждой вейвлет-функции;
- вычисление зависимости частоты f от коэффициента a при изменении времени выборки Δ согласно (6), определение a_0 и вычисление разностной частоты F_B для каждой вейвлет-функции;

- сравнение полученных результатов разностной частоты F_B всех вейвлет-функций и выбор самого эффективного результата;
- вычисление расстояния до уровня и самого уровня.

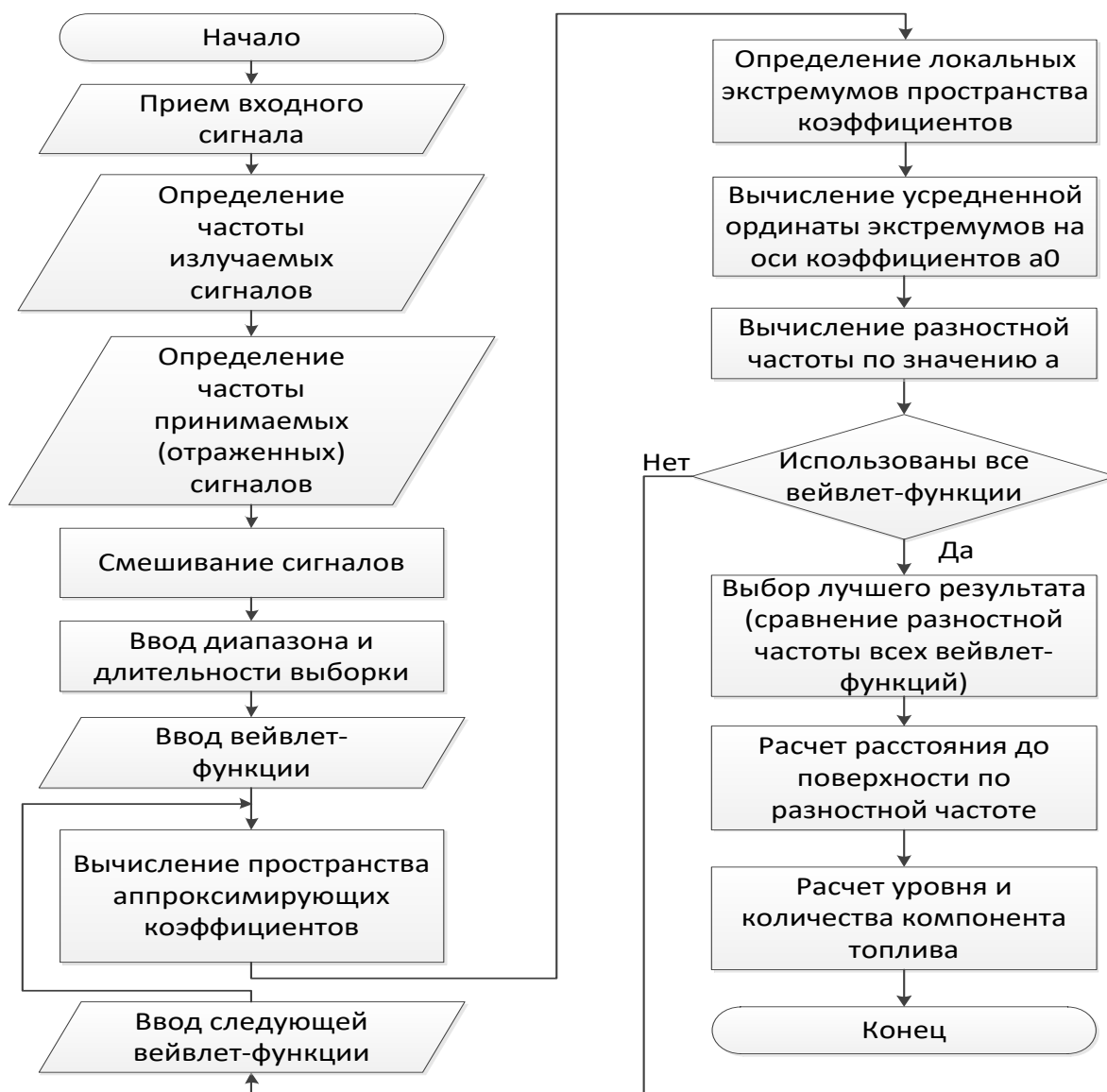


Рис. 5. Блок-схема алгоритма вычисления уровня с помощью непрерывного вейвлет-преобразования

Проведено моделирование отраженного от поверхности зашумленного линейно-частотно модулированного сигнала волноводного уровнемера компонентов топлива ракетносителя, и показаны результаты обработки с помощью вейвлет-преобразования и преобразования Фурье. Результаты моделирования демонстрируют преимущества вейвлет-преобразования. Спектрограмма линейно-частотно

модулированного сигнала с шумом (рис. 6) в случае преобразования Фурье показывает только наличие компонент с разными частотами, в то время как при вейвлет-преобразовании видна четкая разница между сигналами в разный момент времени.

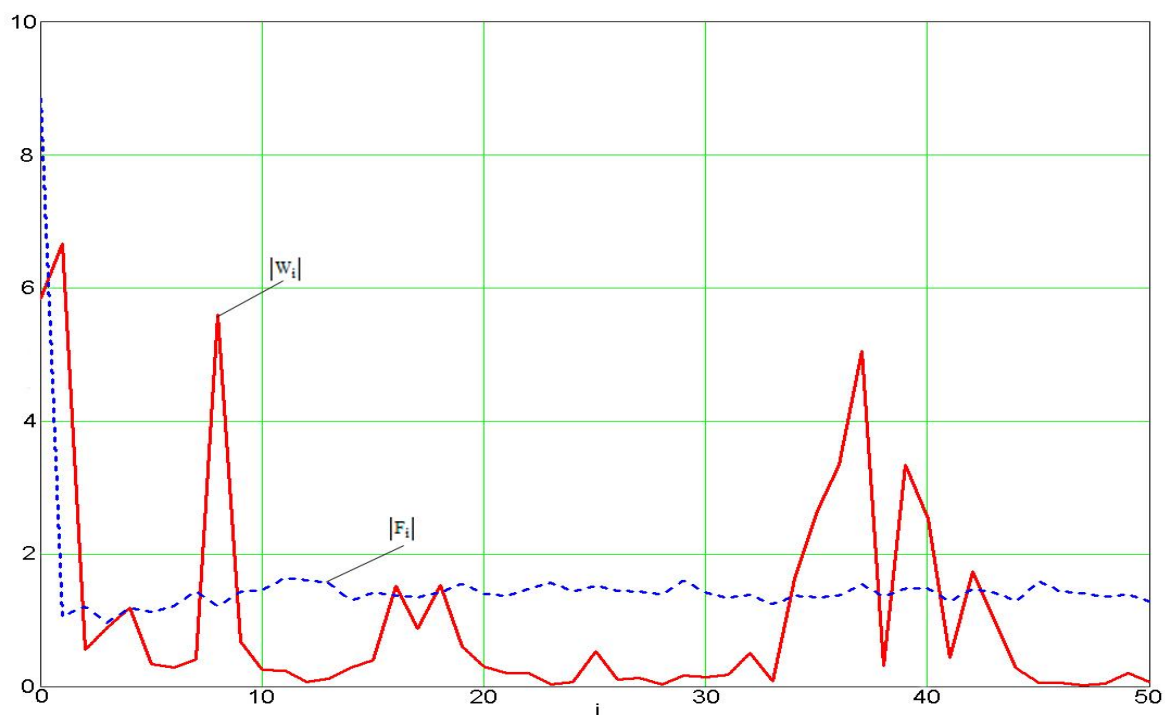


Рис. 6. Спектрограмма сигнала с шумом (Вейвлет-спектр W – сплошная линия и Фурье спектр F – пунктирная линия)

С помощью обратного вейвлет-преобразования проведена фильтрация сигнала волноводного уровнемера (рис. 7). Проведено моделирование линейно-частотно модулированного сигнала с наличием шумов различной амплитуды. Вейвлет-преобразование успешно применено в качестве аппарата фильтрации шумов. Сравнительно небольшой шум с амплитудой 1 В, при амплитуде полезного сигнала 27 В, эффективно очищен. Также восстановлен исходный линейно-частотно модулированный сигнал, очищенный от шума. Следует отметить эффективное устранение довольно большого шума. Показано, что вейвлет-преобразование дает возможность повысить информативность сигнала.

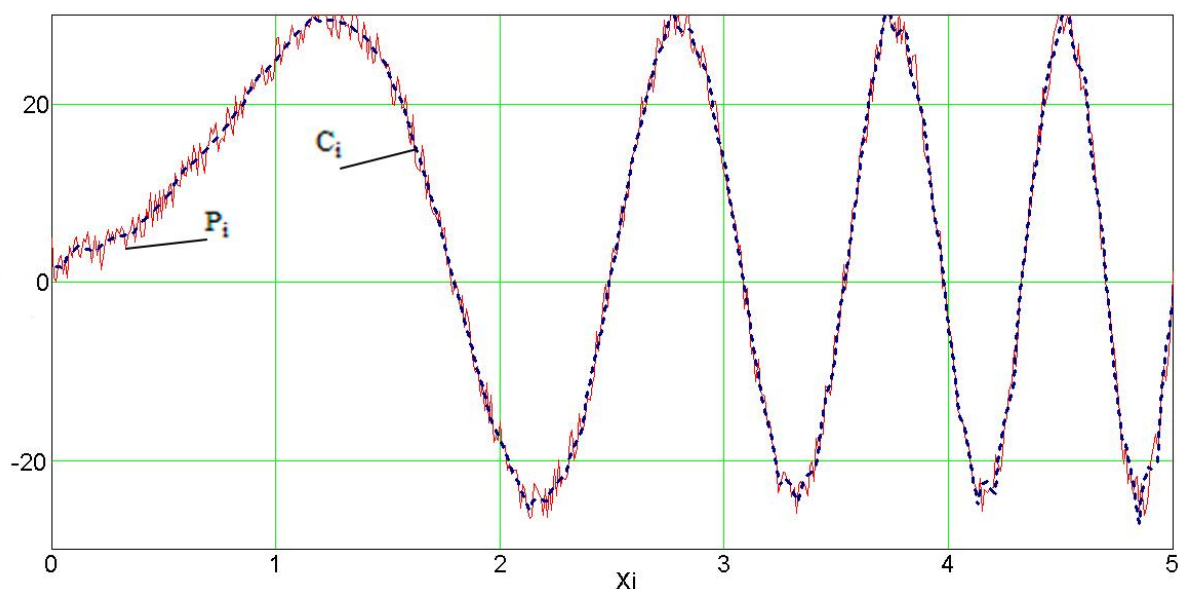


Рис. 7. Фильтрация линейно-частотно модулированного сигнала волноводного уровнемера с помощью обратного вейвлет-преобразования. Исходный сигнал с шумом (P_i - сплошная линия) и восстановленный сигнал (C_i - пунктирная линия)

Разработана функциональная модель СВЧ волноводного уровнемера, обеспечивающая измерение уровня компонентов жидкого топлива ракетносителей. На основе функционального разделения на блоки модель уровнемера включает: блок генератора, блок приема отраженного сигнала, блок смесителя и блок вычислителя. Составлены математические модели каждого блока и наложены соответствующие ограничения. На основе функции преобразования уровнемера (1) разработана общая математическая модель уровнемера компонентов ракетного топлива (7), обеспечивающая возможность корректировки и фильтрации выходного сигнала уровнемера.

$$R = \frac{cT_M \frac{F_c}{M}}{4\Delta F \sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (7)$$

$$M = \Delta \max \int_{-N}^N (S_{cm} + p) \frac{1}{\sqrt{a_v}} \Psi\left(\frac{t1 - b_v}{a_v}\right), \quad (8)$$

$$S_{cm} = A \cos\left(f_{u3l}t + \frac{\beta t^2}{2}\right) - A l e^{-\sigma t} \cos\left(f_{np}t + \frac{\beta t^2}{2}\right), \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{\pi\delta \left(1 + \frac{2bc^2}{af_{np}^2\lambda_{kp}^2}\right)}{\frac{c}{f_{np}}b\sqrt{\varepsilon\mu - \frac{c^2}{f_{np}^2\lambda_{kp}^2}}}, \quad (10)$$

$$\lambda_{kp} = \frac{2\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}, \quad (11)$$

где ΔF - девиация частоты, T_M - период модуляции, A - амплитуда, ω - частота, t - время, τ - задержка, F_c - центральная частота вейвлета, c - скорость света, ε и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемость, λ_{kp} - критическая длина волны в волноводе, δ - толщина скин слоя волновода, p - составляющая помехи, β - ускорение, a и b - размеры сторон волновода, Ψ - вейвлетная функция, a_v - временной коэффициент вейвлета, b_v - масштабный коэффициент вейвлета, N - область ограничения сигналов, n и m - число стоячих полуволн, $S_{см}$ - смешанный частотный сигнал, σ - коэффициент затухания.

Проведено моделирование каждого блока функциональной схемы модели и всей математической модели в целом для различных случаев с влиянием помех и без, а также для различных параметров волновода и среды. Применен разработанный алгоритм, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании и на механизме подбора вейвлета. В сравнении с сигналами без шума, самый точный результат для заданных параметров моделирования с наличием шума показал случай с применением вейвлета Хаара. При анализе сигнала математической модели с поплавком в волноводе, т.е. без помехи отражения, получились значения разностной частоты с помощью разных вейвлетов: 12,488; 12,498; 12,497; 12,494; 12,492 Гц. При аналогичном анализе математической модели сигнала с помехой получились значения уровня с помощью разных вейвлетов: 12,481; 12,498; 12,491; 12,503; 12,519 Гц. Результаты, полученные с помощью вейвлета Хаара, удовлетворяют условиям точности разработанного алгоритма, соответственно расчетное значение уровня равно 3,062 м для математической модели с поплавком и 3,06 м для математической модели с отражением от бурлящей поверхности. Также точный результат достигнут с

использованием вейвлета Морле, который составил 3,062 м для математической модели с поплавком.

Используя (1), получено эталонное значение разностной частоты при заданном расстоянии до поверхности. Самый близкий к эталонному значению результат моделирования с наличием составляющей помехи в отраженном сигнале получен с применением вейвлета Хаара. Спектральный метод показывает отличные от эталонного результаты, погрешность достигает более 6%, в то время как при использовании любой вейвлет-функции разработанного алгоритма не превышает 0,16%. В сравнении с результатами, полученными с помощью разработанного алгоритма, при тех же параметрах моделирования, метод спектрального анализа значительно уступает по точности при наличии шума в обрабатываемом сигнале.

На основе анализа абсолютной и относительной погрешности измерения расстояния до поверхности с помощью разных вейвлетов для двух математических моделей – с поплавком в волноводе и с отражением от бурлящей поверхности установлено, что минимальное значение погрешности в случае с применением вейвлета Морле – 0% для обеих математических моделей, аналогичный результат также достигнут при использовании вейвлета Хаара в случае с математической моделью для поплавка в волноводе. Менее точны вейвлеты Мексиканская шляпа и DOG, при некоторых параметрах моделирования погрешность составляла 5%. Надо отметить незначительную разницу между погрешностями двух математических моделей, что позволяет судить об эффективной обработке сигнала с шумовой составляющей от бурлящей поверхности.

Пятая глава посвящена анализу погрешностей. Исследованы погрешности уровнемеров компонентов топлива современного ракетносителя, а также повышение точности, которое достигается применением разработанных математических моделей. Максимальная и минимальная погрешность емкостного датчика окислителя 1695 мм и 191 мм соответственно, что соответствует объемам 11000 и 1300 литров. Максимальная и минимальная погрешности математической

модели составляют 9,2 мм, что соответствует 63 литра и 0 мм соответственно. Точность расчетов с помощью математической модели превосходит используемый в данный момент емкостной датчик на несколько порядков. Максимальные погрешности математической модели и емкостного датчика для бака с окислителем отличаются в 184 раза, а минимальные в 1900 раз. Для бака с горючим в 92 раза и 1500 раз соответственно.

Целесообразно сравнивать погрешность математической модели с минимальной погрешностью емкостных уровнемеров. На примере емкостного датчика, состоящего из одного конденсатора, можно судить о погрешности, которая составляет 2-5%. Сравнивая с этим значением погрешность математической модели уровнемера компонентов ракетного топлива 0,163%, можно сделать вывод, что математическая модель дает преимущество в точности в 12,27 раз лучше.

Экономия компонентов топлива, увеличение массы полезной нагрузки и снижение общей массы ракетносителя с применением уровнемера компонентов ракетного топлива наглядно видны на примере заправки бака с горючим. Расположение дискретных емкостных чувствительных элементов на расстояниях от 153,8 до 844,8 мм имеет погрешность от 0,888 до 4,848 тонн. Результаты моделирования позволили получить погрешность 0,05 тонн. Применение волноводного уровнемера при заправке позволяет сократить количество заправляемого на стартовой позиции горючего как минимум на 0,88 тонны и окислителя как минимум на 1,14 тонн. Как следствие можно увеличить массу полезной нагрузки, которая для данных параметров ракетносителя составляет 3,8 тонны до 5 тонн и более.

На основе технического акта «По результатам отработки и анализа телеметрической информации системы управления расходом топлива после проведения летных испытаний ракетносителя» были сопоставлены телеметрические данные каждого из баков системы управления расходом топлива с результатами моделирования, полученными с помощью математических моделей уровнемера с отражением от поплавка в волноводе и отражением от бурлящей поверхности. На основании аналоговых сигналов о срабатывании 6-ти пар измерительных точек в баках горючего и окислителя проведен

анализ работы системы в полете, построены графики срабатывания измерительных точек, а также определены времена срабатывания измерительных точек в каждом из баков.

Для сопоставления амплитудной телеметрии емкостного датчика системы управления расходом топлива и частотных данных модели волноводного уровнемера был применен преобразователь частоты в напряжение. Подстроечным резистором корректируется выходное напряжение, чтобы преобразованный амплитудный сигнал бака с окислителем не превышала 3 В, а для горючего – 6,5 В. Для бака с горючим разностная частота меняется в диапазоне от 0,433 до 26,928 Гц, для бака с окислителем - в диапазоне от 0,408 до 53,698 Гц в зависимости от заполнения баков. Во время работы прибора, в течении 250 секунд полета ступени ракетоносителя, баки практически полностью опорожняются, а амплитуда преобразованного частотного сигнала увеличивается линейно и непрерывно в диапазоне 0,089 В до 5,467 В по горючему и от 0,017 В до 2,18 В по окислителю. На рис. 8 изображены телеметрические данные срабатывания 12-ти измерительных точек емкостного датчика горючего в сопоставлении с преобразованным сигналом математической модели волноводного уровнемера с отражением от бурлящей поверхности и применением алгоритма вычисления уровня с помощью непрерывного вейвлет-преобразования.

Данные, полученные с помощью математических моделей уровнемера с поплавком в волноводе и с отражением от бурлящей поверхности, точно подтверждают время срабатывания каждой измерительной точки емкостных датчиков, определенное на летных испытаниях ракетоносителя. С помощью применения математических моделей получен непрерывный сигнал, таким образом, пропадают «мертвые» зоны между чувствительными элементами емкостных датчиков. Благодаря линейности результатов измерений модели уровнемера легко получить значение уровня в любой момент времени, что делает систему более информативной и полностью заменяет применяемые в данный момент уровнемеры.

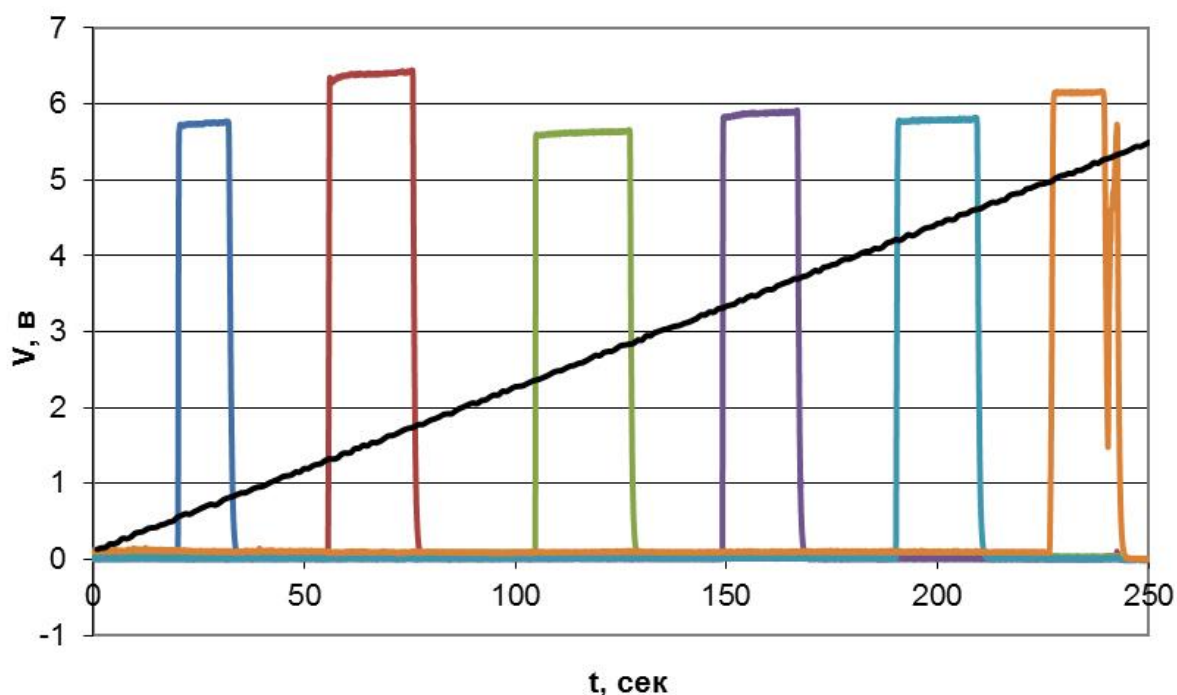


Рис. 8. Зависимость амплитуды преобразованного сигнала разностной частоты горючего от времени работы ступени ракетносителя в сопоставлении с телеметрическими данными срабатывания 12-ти измерительных точек по горючему

Срабатывание чувствительных элементов в баке горючего согласно телеметрической информации происходит в определенное время: 10,88; 23,42; 46,54; 66,79; 95,45; 118,23; 139,77; 157,93; 181,05; 200,49; 217,80; 230,74 сек. Соответственно, минимальная погрешность этих данных 17,31 сек., а максимальная – 28,66 сек. Другими словами, за время как минимум 17 сек. из 250 сек. полета ступени ракетносителя, нет информации о перемещении уровня с горючим. Математическая модель волноводного уровнемера имеет максимальную погрешность 2,3 сек., а минимальную – 0,0371 сек. Если сравнивать минимальные и максимальные погрешности по времени, то математическая модель волноводного уровнемера информативнее в 466 и 12 раз соответственно в зависимости от наполнения бака. Для бака с окислителем эти значения составляют 850 и 10 раз соответственно.

Аналогично результаты моделирования были успешно сопоставлены с телеметрической информацией разных ракетносителей с дискретными уровнемерами.

Исследованы методы и алгоритмы цифровой обработки сигнала, обеспечивающие стабильное определение уровня даже в

условиях слабого отраженного сигнала. Рассмотрены основные источники погрешностей волноводного уровнемера и выдвинуты требования для минимизации погрешностей. Самым эффективным методом, минимизирующим погрешности и шумы, является спектральный метод. На нем основана работа большинства современных волноводных уровнемеров. Но погрешность значения уровня, вычисленная методом с применением разработанного алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования, значительно меньше, чем полученная по максимальному значению плотности спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию аппаратно-алгоритмических средств повышения точности систем определения уровня топлива в баках ракетополетов. Предложены математическая модель уровнемера компонентов ракетного топлива на основе волновода, алгоритм и способ обработки сигнала для минимизации погрешностей. Основные результаты могут быть сформулированы в виде следующих положений:

1. Разработана функциональная схема уровнемера компонентов ракетного топлива, которая позволяет унифицировать систему определения уровня путем объединения уровнемеров разных типов для заправки и расхода в один универсальный, повысить точность и массогабаритные показатели применяемой в настоящее время системы контроля заправки и управления расходом топлива.

2. Предложен способ получения отраженного сигнала независимо от диэлектрических свойств среды, исключения влияния отражения части частотного сигнала от дна бака и сведения к минимуму погрешности от колебаний измеряемой поверхности, заключающийся в демпфировании бурлящей поверхности.

3. Разработана и исследована математическая модель волноводного уровнемера жидкости, учитывающая диэлектрическую проницаемость измеряемой среды и характеристики волновода, которая позволяет получить обоснование повышенной точности измерения уровня

компонентов ракетного топлива, по сравнению с применяемыми в данный момент уровнемерами, благодаря чему достигаются оптимальные пропорции окислителя и горючего на каждом этапе полета ракетоносителя. Разработанная математическая модель уровнемера позволяет использовать волноводный метод для реализации прибора и достигнуть следующих метрологических характеристик: Диапазон измерений: 0,01-30 м; Абсолютная погрешность: 0,005 м; Относительная погрешность: 0,163%; Диапазон рабочих частот: $4 \cdot 10^9$ - $2 \cdot 10^{10}$ Гц.

4. Разработаны алгоритм и программа, основанные на механизме подбора вейвлета путем сравнения разницы между вычисленными результатами сигнала разностной частоты, что позволило получить результаты обработки сигнала с шумом от бурлящей поверхности компонентов топлива, практически идентичные результатам отражения от идеальной поверхности. Проведено математическое моделирование сигнала разностной частоты волноводного уровнемера компонентов ракетного топлива с применением непрерывного вейвлет-преобразования и специальной процедуры сравнения результатов и выбора наиболее подходящего. Лучшие результаты показала математическая модель уровнемера с наличием шумовых составляющих с применением вейвлета Хаара.

5. На основе анализа критичных источников погрешностей волноводных уровнемеров предложены различные методы уменьшения погрешностей и обоснован наиболее точный для измерения уровня компонентов топлива – метод, основанный на определении экстремумов энергетической плотности коэффициентов с применением алгоритма непрерывного-вейвлет преобразования, который превосходит по точности самый распространенный и эффективный метод спектрального анализа.

6. Предложена методика определения характеристик волновода, необходимых для корректного отраженного сигнала от сред с малой диэлектрической проницаемостью, которая заключается в учете необходимости обеспечить наименьший уровень потерь, большую предельную мощность, простоту расчетов и конструкции волновода. Исследованы параметры электромагнитной волны H_{10} в прямоугольном волноводе для различной ширины, высоты и частоты для сред керосин и жидкий кислород, которые позволили выбрать прямоугольный волновод

с размерами сторон 25 мм и 50 мм и значение сверхвысокой частоты задающего генератора, учитывая габариты баков компонентов топлива и требование к повышенной точности измерений.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Прецизионный уровнемер компонентов топлива ракетносителей с жидкостными двигателями // Приборы, № 7, 2015 год – с. 24-32.
2. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Погрешности волноводных уровнемеров и методы их минимизации // Приборы № 3, 2016 год – с. 28-36.
3. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Определение уровня жидкости с помощью алгоритма, основанного на непрерывном вейвлет-преобразовании // Приборы № 6, 2019 год – с. 23-27.

В других изданиях:

1. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Непрерывный датчик уровня для системы заправки и расхода компонентов топлива ракетносителей Сб. трудов 62 НТК. – Ч.3. Технические науки. – М.: МИРЭА, 2013. – с. 92-100.
2. Гончаров В.Б. Разработка непрерывного датчика уровня Сборник Современные технологии в задачах управления и автоматики и обработки информации Алушта: Сб. мат. – М.: МАИ. 2013 – с. 82 – 83.
3. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Прецизионный уровнемер компонентов топлива ракетносителей с жидкостными двигателями Сборник Люльевские чтения: материалы девятой межрегиональной отраслевой научно-технической конференции, «ОКБ Новатор». Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – с. 145.
4. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Проблема точности уровнемеров компонентов топлива ракетносителей Электронный сетевой научно-методический журнал «ВЕСТНИК МГТУ МИРЭА» №2(3) июнь 2014, с. 114-125.
5. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Повышение точности уровнемеров компонентов топлива ракетносителей с помощью

вейвлет-преобразования Сборник Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации Алушта: – М.: ИКД «Зеркало-М», 2014 – с. 133 – 134.

6. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Повышение точности уровнемеров компонентов топлива ракетносителя // Авиационная промышленность, №2, 2016 год – с. 56-61.

7. Гончаров В.Б., Ивченко В.Д. Погрешности частотных уровнемеров и методы их минимизации Электронное сетевое издание «Российский технологический журнал» Том4 №3 (12) 2016, с. 3-10.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

1. Гончаров В.Б. «Определение разностной частоты с помощью подбора вейвлет-функций». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2019618617 от 02.07.2019 г. Номер заявки 2019617340 от 18.06.2019 г.