

На правах рукописи

Жеглов Максим Александрович

Многоканальный дискретный преобразователь уровня жидкости
на основе волоконного световода с последовательными изгибами

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-2009

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (государственного технического университета)

Научный руководитель

д.т.н., профессор Бусурин Владимир Игоревич

Официальные оппоненты

д.т.н., профессор Мельников Валерий Ефимович

к.т.н. Прохоров Николай Иванович

Ведущая организация

ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» КБ «Салют»

Защита состоится «___» _____ 2009 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д212.125.01 Московского авиационного института (государственного технического университета) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3. Волоколамское ш., д.4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.125.01

к.т.н.

Корнеенкова А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для тарировки баков ракетоносителей, заправки баков ракетным топливом и определения уровня топлива в полете на ракетоносителях используются различные виды преобразователей уровня жидкости (ПУЖ): для тарировки баков используется дискретный контактный ПУЖ; для заправки ракетоносителя топливом - индуктивный ПУЖ, который определяет уровень жидкости в верхней части бака; емкостной дискретный ПУЖ предназначен для определения уровня топлива в полете.

Применение унифицированного ПУЖ для этих задач затруднено, поскольку требования различны. Так, например, дискретный контактный ПУЖ нельзя использовать с горючими и взрывоопасными жидкостями. Для индуктивного ПУЖ обязательно наличие поплавка, а это, в свою очередь, накладывает специфические требования на сферу его применения. Характеристики емкостных ПУЖ сильно зависят от условий окружающей среды и параметров кабельной сети.

Поэтому разработка унифицированного ПУЖ, способного заменить вышеуказанные преобразователи и пригодного для использования при тарировке бака, заправке ракетоносителя и определении уровня топлива в полете, является актуальной задачей.

Цель работы состоит в разработке дискретного ПУЖ на основе модифицированных волоконных световодов, не имеющего подвижных частей, способного работать в пожаро- и взрывоопасных средах, в условиях электромагнитных помех.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие частные задачи исследования:

- разработать структурную и функциональную схему преобразователя уровня жидкости на основе волоконного световода с последовательными изгибами (далее преобразователя);
- разработать математическую модель преобразователя;

- исследовать влияние изменения параметров преобразователя на его характеристики;
- провести анализ влияния внешних возмущающих воздействий на преобразователь;
- разработать методику расчета параметров преобразователя;
- провести экспериментальные исследования характеристик преобразователя.

Методы исследования. При выполнении работы применялись аналитические методы, которые основывались на теории распространения света по волоконным световодам. Численные методы использовались при анализе характеристик, определении области допустимых параметров и расчете погрешностей преобразователя. Экспериментальные методы исследования применялись для подтверждения адекватности разработанной математической модели.

Научная новизна. Разработана структурная и функциональная схема преобразователя, обеспечивающего определение наличия жидкости в нескольких точках с помощью одного волоконного световода и позволяющего осуществлять дискретное измерение уровня жидкости на основе волоконных световодов с последовательными изгибами. Разработана математическая модель преобразователя, в которой учтено взаимодействие оптического излучения, распространяющегося в световоде, с исследуемой средой, окружающей каждый изгиб световода, с помощью коэффициентов взаимодействия световод - внешняя среда. Исследован эффект каплеобразования, вызывающий изменение выходного сигнала при извлечении изгибов световода из жидкости. Исследованы основная и дополнительная погрешности преобразователя, определены условия, обеспечивающие его функционирование. Предложен способ компенсации влияния внешних возмущающих воздействий путем определения текущего показателя преломления жидкости и газа и корректировки коэффициентов взаимодействия световод – внешняя среда.

Практическая ценность. Разработан алгоритм оптимизации параметров преобразователя, позволяющий обеспечить максимальное изменение выходного сигнала преобразователя, вызванное полным погружением последнего изгиба световода. Получено выражение, позволяющее определить радиусы изгибов световода для обеспечения одинаковой чувствительности преобразователя во всем диапазоне измерения. Определен коэффициент каплеобразования для воды при различной ориентации плоскости изгиба световода преобразователя. Разработана методика расчета параметров многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе волоконного световода с последовательными изгибами. Проведено экспериментальное исследование характеристик преобразователя уровня жидкости с тремя изгибами волоконного световода.

Результаты работы использованы в опытно-конструкторских работах ФГУП ГосНИИ Приборостроения. Макеты преобразователей использованы при разработке стенда, имитирующего процесс заправки топливных баков окислителя и горючего ракетносителей.

Автор защищает:

- структурную и функциональную схему многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе волоконных световодов с последовательными изгибами, каждый из которых обеспечивает определение наличия жидкости в нескольких точках;
- математическую модель преобразователя, в которой учтено взаимодействие оптического излучения, распространяющегося в световоде, с исследуемой средой, окружающей каждый изгиб световода, и влияние эффекта каплеобразования на выходной сигнал преобразователя;
- алгоритм оптимизации параметров преобразователя, позволяющий обеспечить максимальное изменение выходного сигнала преобразователя, вызванное полным погружением последнего изгиба световода;
- способ компенсации влияния внешних возмущающих воздействий путем определения текущего показателя преломления жидкости и газа и

корректировки коэффициентов взаимодействия световод – внешняя среда в математической модели;

- методику расчета параметров многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе волоконного световода с последовательными изгибами, позволяющую получить структурную схему преобразователя, определить конструктивные и оптические параметры световодов, определить коэффициенты передачи по каждому из каналов измерения и константы, необходимые для написания программы микроконтроллера.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

4-ой международной конференции “Авиация и космонавтика – 2005”, 10-13 октября 2005 г., г. Москва;

5-ой международной конференции “Авиация и космонавтика – 2006”, 23-26 октября 2006 г., г. Москва;

Российско-Китайской международной конференции по проектированию Аэрокосмической техники, г. Москва, 2007 г.;

7-ой международной конференция “Авиация и космонавтика – 2008”, 20-22 октября 2008 г., г. Москва;

Российской конференции с международным участием “Технические и программные средства систем управления”, 10-12 ноября 2008 г., г. Москва.

XVIII международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», 18-25 сентября 2009 г., г. Алушта;

8-ой международной конференция “Авиация и космонавтика – 2009”, 26-29 октября 2009 г., г. Москва.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе две статьи в журнале, рекомендованном ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения и четырех глав. Изложена на 159 страницах, содержит 74 рисунка, список использованных источников - 54 наименования и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки нового ПУЖ, который сочетает в себе следующие качества: высокую точность определения уровня, помехозащищенность, пожаро- и взрывобезопасность преобразователя, а также отсутствие подвижных частей. Сформулирована цель работы, определены задачи исследования, приведены полученные результаты работы и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор методов и средств измерения уровня жидких сред. Составлена классификация ПУЖ. Приведена сравнительная таблица характеристик ПУЖ различных типов (емкостные, индуктивные, магнитострикционные, ультразвуковые, оптические). В результате проведенного анализа было выявлено, что высокими точностными характеристиками обладают дискретные ПУЖ, но они либо имеют сложную конструкцию, либо существуют проблемы с детектированием измеряемого сигнала.

Использование в качестве чувствительного элемента преобразователя волоконного световода (ВС) должно повысить точность измерения уровня и обеспечить функционирование преобразователя в условиях сильных электромагнитных полей, в агрессивных, пожаро- и взрывоопасных средах, а также обеспечит отсутствие в преобразователе подвижных частей.

Вторая глава посвящена разработке структурной и функциональной схем многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе ВС с последовательными изгибами, математической модели преобразователя и исследованию его характеристик.

В общем случае ПУЖ состоит из m преобразователей, каждый из которых способен определять наличие жидкости в k точках, датчиков внешних возмущающих воздействий, предназначенных для осуществления коррекции результата, и блока обработки информации, предназначенного для преобразования электрических величин в физические и корректировки

результатов измерения в зависимости от параметров внешних возмущающих воздействий (рисунок 1).

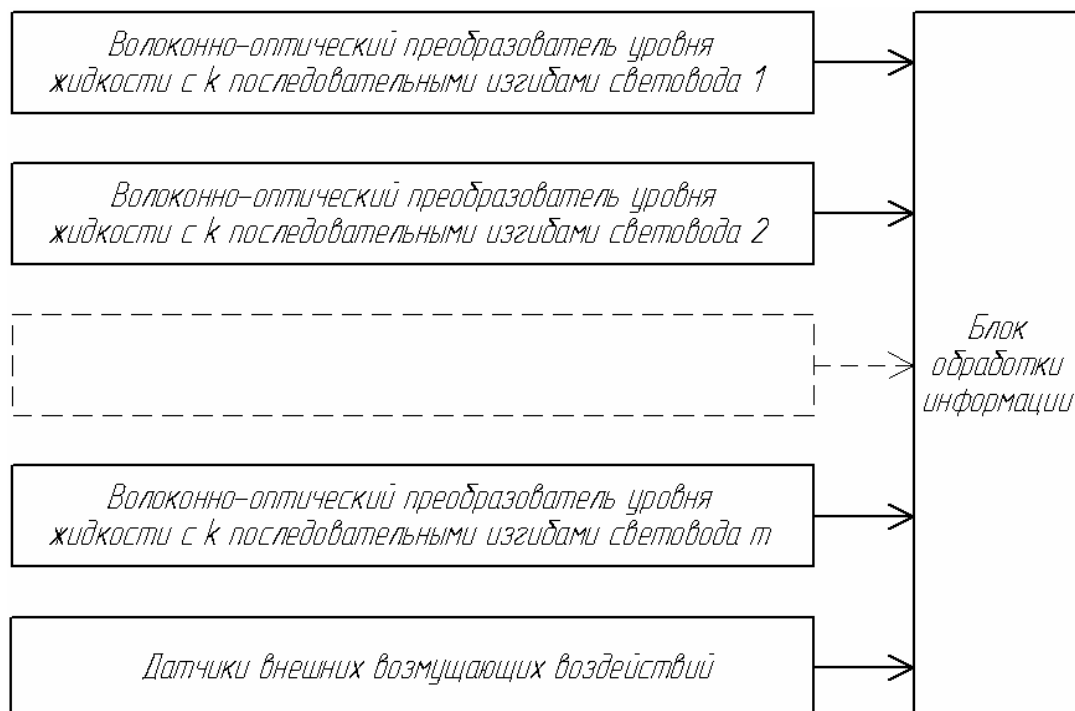


Рисунок 1 - Структурная схема m -канального преобразователя.

Количество преобразователей m и количество изгибов световода k каждого преобразователя выбирается в соответствии с требуемой точностью измерения уровня. Количество уровней, контролируемых многоканальным дискретным преобразователем уровня жидкости на основе ВС с последовательными изгибами составляет $m \cdot k$.

Функциональная схема преобразователя показана на рисунке 2. Источник оптического излучения 1 генерирует излучение заданной мощности, которое затем вводится в ВС с k -изгибами 2. Излучение на выходе световода детектируется фотоприемником 3, усиливается усилителем 4, преобразовывается в цифровую форму с помощью АЦП 5. Для повышения точности определения уровня жидкости необходима информация о температуре жидкости в резервуаре 6, давлении в резервуаре 7. Также, если аналоговые элементы подвержены влиянию широкого диапазона температур, то необходимо измерение температуры внутри корпуса электронного блока 8. Для обработки информации и определения уровня жидкости Z используется микроконтроллер 9.

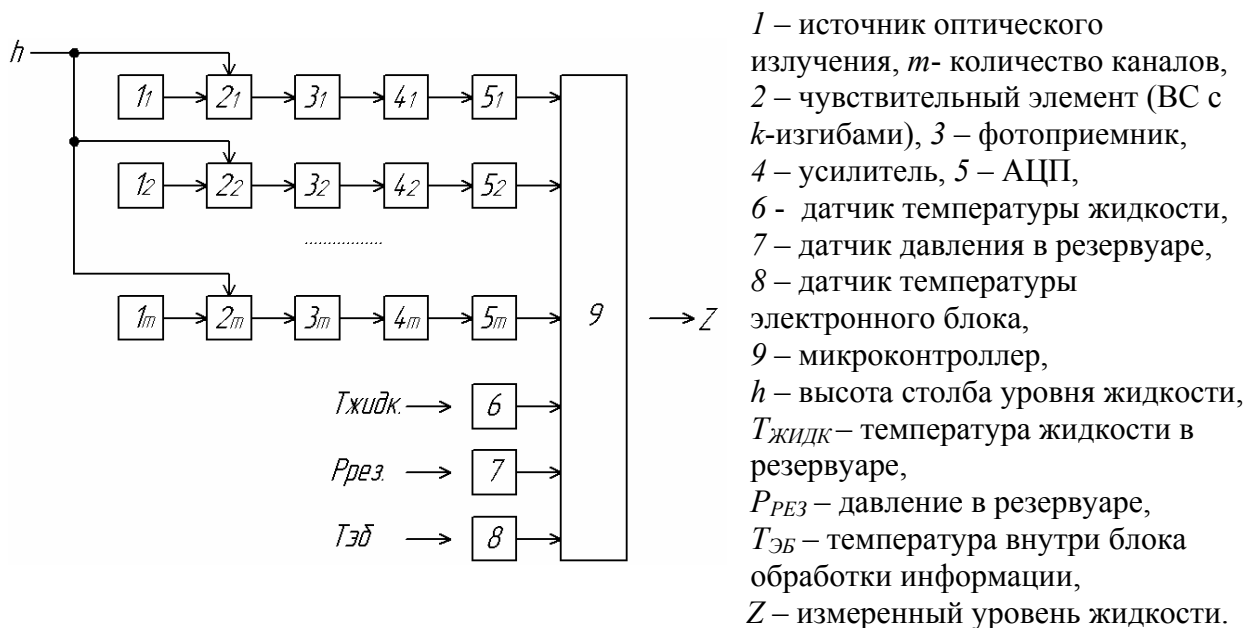


Рисунок 2 – Функциональная схема m -канального преобразователя.

Принцип действия чувствительного элемента преобразователя основан на выходе части оптического излучения из сердцевины ВС в местах изгиба (рисунок 3). Мощность оптического излучения, которая покидает сердцевину ВС, зависит от показателя преломления среды, окружающей изгиб. В зависимости от уровня жидкости изменяется количество погруженных изгибов, и, соответственно, изменяется мощность оптического излучения, детектируемая приемником оптического излучения.

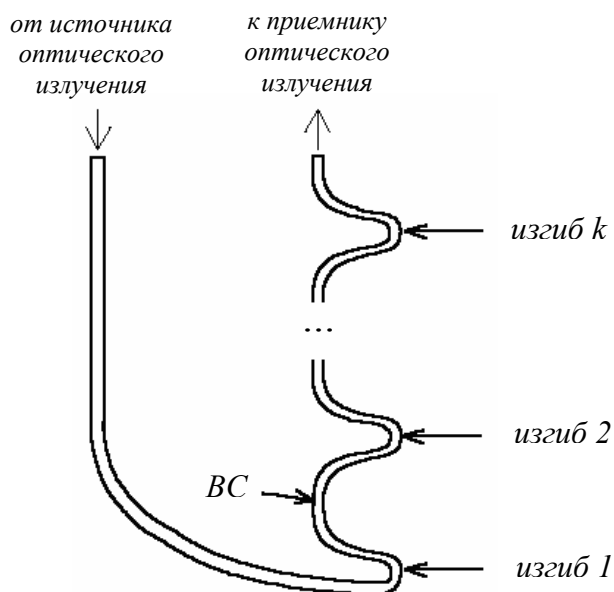


Рисунок 3 – Волоконный световод с k -изгибами.

Выходной сигнал преобразователя (измеряемый уровень жидкости Z) зависит от величины внешнего воздействия, параметров световода с последовательными изгибами, фотоприемника, усилителя, АЦП, микроконтроллера, окружающей среды:

$$Z = F_{ЭБ} \left[P_{вых} (N, k, P_{вх}, K_{Ж}, K_{Г}, R_i, K_{КО}, T, p), S_{ФП}, f_{ОУ}, f_{АЦП}, T_{ЭБ} \right], \quad (1)$$

где Z – измеренный уровень жидкости, $F_{ЭБ}$ – функция преобразования блока обработки информации, $P_{вых}$ – мощность выходного оптического сигнала ВС с последовательными изгибами, N – количество погруженных изгибов, k – количество изгибов на одном световоде, $P_{вх}$ – мощность излучения на входе ВС, $K_{Ж}$ – коэффициент взаимодействия световод - жидкость, $K_{Г}$ – коэффициент взаимодействия световод - газ, R_i – радиус i -го изгиба ВС, $K_{КО}$ – коэффициент каплеобразования, T – температура жидкости, p – давление в резервуаре, $S_{ФП}$ – чувствительность фотоприемника, $f_{ОУ}$ – функция преобразования опереационного усилителя, $f_{АЦП}$ – функция преобразования АЦП, $T_{ЭБ}$ – температура внутри корпуса электронного блока, в котором расположены все электронные элементы.

Мощность излучения на выходе световода $P_{вых}$ зависит от общего количества изгибов ВС, количества погруженных изгибов, коэффициентов взаимодействия оптического излучения световод - внешняя среда для жидкости и газа, коэффициента каплеобразования, параметров световода и исследуемых сред и может быть записана в виде:

$$P_{вых} (N, k, P_{вх}, K_{Ж}, K_{Г}, R_i, K_{КО}, T, p) = P_{вх} (\lambda, T, U) \times$$

$$\times \prod_{i=1}^N \left(\frac{1 - \left(1 - n_1^2 (\lambda, T, p) \cdot \theta_{k_i}^2 (n_1, n_{Ж}) \cdot \left(1 - \frac{K_{Ж} (n_{Ж}, n_1, a)}{R_i} \right) \right)^{\frac{w}{2}+1}}{1 - \left(1 - n_1^2 (\lambda, T, p) \cdot \theta_{k_i}^2 (n_1, n_{Ж}) \right)^{\frac{w}{2}+1}} \right) \times$$

$$\times \prod_{j=N+1}^k \left(K_{КО} (Re, \mu, \sigma_{ж}, \alpha, t_j) \cdot \frac{1 - \left(1 - n_1^2 (\lambda, T, p) \cdot \theta_{k_i}^2 (n_1, n_{Г}) \cdot \left(1 - \frac{K_{Г} (n_{Г}, n_1, a)}{R_i} \right) \right)^{\frac{w}{2}+1}}{1 - \left(1 - n_1^2 (\lambda, T, p) \cdot \theta_{k_i}^2 (n_1, n_{Г}) \right)^{\frac{w}{2}+1}} \right), \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения, U – напряжение питания источника излучения, n_l – показатель преломления сердцевины ВС, θ_{ki} – критический угол распространения высшей моды для i -го изгиба, $n_{ж}$ – показатель преломления исследуемой жидкости, a – диаметр сердцевины ВС, w – целое число, возрастающее с увеличением направленности излучателя, Re – число Рейнолдса, μ – коэффициент динамической вязкости, $\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения, α – угол наклона между плоскостью изгиба световода и вектором силы тяжести, t_i – время, прошедшее от момента извлечения i -го изгиба из жидкости, $n_{г}$ – показатель преломления газа в резервуаре.

При извлечении преобразователя из жидкости на световоде образуются капли, которые влияют на оптическое излучение, распространяющееся по световоду. Величина коэффициента $K_{КО}$ зависит от параметров жидкости и ориентации плоскости изгиба световода. Величина этого коэффициента для воды определена экспериментально и изменяется в диапазоне от 0,98 до 1,08 и зависит от расположения изгиба световода.

Коэффициент взаимодействия световод-внешняя среда, может принимать только два значения, соответствующих изгибу, погруженному в жидкость или газовую среду:

$$K_{ж(\Gamma)}(n_{ж(\Gamma)}, n_1, a) = \frac{n_{ж(\Gamma)}(\lambda, T, p)}{n_1(\lambda, T, p)} \cdot \frac{a(T, p)}{\left[\arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{n_{ж(\Gamma)}(\lambda, T, p)}{n_1(\lambda, T, p)} \right)^2} \right]^2}. \quad (3)$$

Для обеспечения одинаковой чувствительности преобразователя во всем диапазоне измерения величина радиусов всех изгибов ВС должна быть переменной. Радиус i -го изгиба ВС зависит от радиуса последнего изгиба, номера изгиба и коэффициентов взаимодействия световод-внешняя среда и определяется выражением:

$$R_i(R_k, k, K_{ж}, K_{г}) = R_k(T) + (i - k) \cdot (K_{ж}(n_{ж}, n_1, a) - K_{г}(n_{г}, n_1, a)), \quad i = 1..k. \quad (4)$$

Радиус последнего изгиба выбирается, исходя из условия обеспечения максимальной чувствительности преобразователя к погружению последнего изгиба ΔP_k :

$$\Delta P_k = P_{ex}(\lambda, T, U) \cdot \prod_{i=1}^{k-1} \left[1 - \frac{K_{\Gamma}(n_{\Gamma}, n_1, a)}{R_i} \right] \cdot \left(\frac{K_{\text{Ж}}(n_{\text{Ж}}, n_1, a) - K_{\Gamma}(n_{\Gamma}, n_1, a)}{R_k} \right) = \max. \quad (5)$$

Совокупность выражений (1...5) представляет собой математическую модель преобразователя уровня жидкости на основе ВС с последовательными изгибами.

Зависимость выходного оптического сигнала на выходе ВС $P_{вых}$ от количества погруженных изгибов N представлена на графике (рисунок 4).

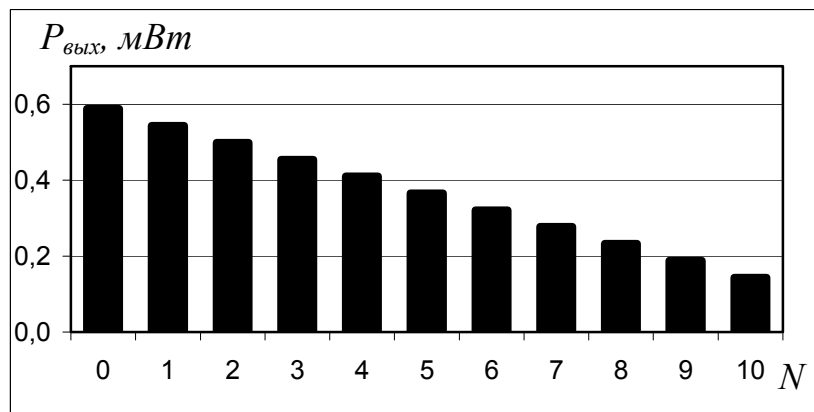


Рисунок 4 – Зависимость мощности излучения на выходе ВС от количества погруженных изгибов.

Для экспериментального исследования характеристик были разработаны макеты преобразователей. Получена экспериментальная зависимость изменения выходного сигнала $U_{вых}$ от времени t при измерении уровня жидкости (рисунок 5) для преобразователя с тремя изгибами. Пунктирной линией нанесены значения, соответствующие граничным условиям ΓU_i каждого уровня. Отклонение экспериментально полученной зависимости выходного сигнала преобразователя уровня жидкости от расчетной составляет около 4,6%.

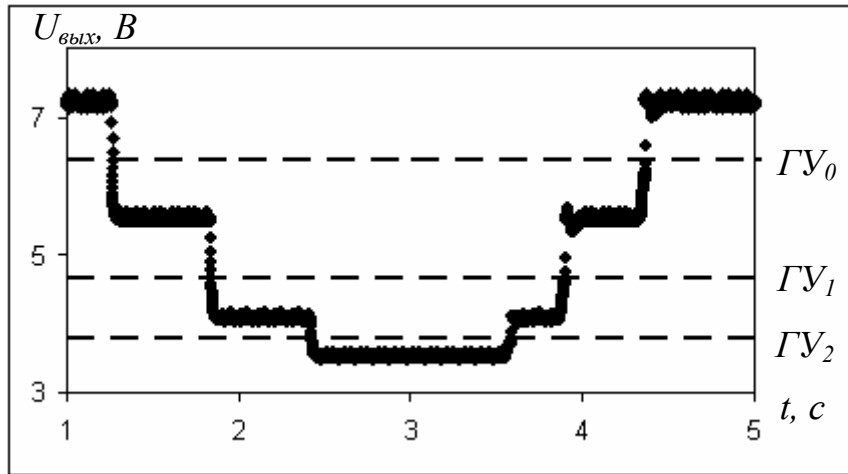


Рисунок 5 – Изменение выходного сигнала преобразователя.

Одной из составляющих основной погрешности $\Delta P_{осн}$ является погрешность из-за эффекта каплеобразования $\Delta_{КО}$, которая заключается в выходе части оптического излучения в местах изгибов в зависимости от наличия капель жидкости, которые образуются при извлечении преобразователя из жидкой среды. Также влияние на результат измерения оказывает погрешность преобразования электронного блока $\Delta_{ЭБ}$ и погрешность канала стабилизации оптической мощности источника излучения $\Delta_{ИИ}$:

$$\Delta P_{осн} = \sqrt{(\Delta_{ИИ} \cdot P_{вх})^2 + (\Delta_{ЭБ} \cdot P_{вых\ макс})^2 + (\Delta_{КО} \cdot P_{вых\ k-1})^2}, \quad (6)$$

где $P_{вых\ макс}$ – сигнал, соответствующий выходному сигналу сухого преобразователя, $P_{вых\ k-1}$ – сигнал, соответствующий выходному сигналу преобразователя изгибы которого с номерами от 1 до $k-1$ находятся в жидкости, а изгиб с номером k находится в газе.

Основная погрешность определяет максимальное количество точек k , которое можно реализовать на одном световоде при нормальных условиях, используя неравенство:

$$\sqrt{(\Delta_{ИИ})^2 + \left(\Delta_{ЭБ} \cdot \prod_{i=1}^k \left[1 - \frac{K_{\Gamma}}{R_i}\right]\right)^2 + \left(\Delta_{КО} \cdot \prod_{i=1}^{k-1} \left[1 - \frac{K_{Ж}}{R_i}\right] \cdot \left(1 - \frac{K_{\Gamma}}{R_k}\right)\right)^2} < \prod_{i=1}^{k-1} \left[1 - \frac{K_{Ж}}{R_i}\right] \cdot \left(\frac{K_{Ж} - K_{\Gamma}}{R_k}\right), \quad (7)$$

Максимальное количество точек, которые можно реализовать на одном ВС, составляет, примерно, 50..60 при нормальных условиях окружающей среды.

Показано, что основная погрешность преобразователя уровня жидкости определяется эффектом каплеобразования (от -2,2 до 8,3 % от выходного сигнала, в зависимости от ориентации преобразователя), погрешностью канала определения мощности источника излучения (0,5 %) и погрешностью преобразования электронного блока (0,2 %).

В третьей главе проведен анализ влияния внешних дестабилизирующих факторов на дополнительную погрешность преобразователя.

Выходной сигнал преобразователя Z , квантованный по уровню, в общем виде является функцией многих параметров, в число которых входят как параметры устройства, так и параметры, характеризующие условия эксплуатации, меняющиеся под воздействием окружающей среды (1).

Дополнительная погрешность преобразователя $\Delta P_{доп}$ будет определяться выражением:

$$\Delta P_{доп} = \sqrt{\left(\frac{\partial F_{ЭБ}}{\partial P_{вых}} \cdot \Delta P_{вых}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{ЭБ}}{\partial S_{ФП}} \cdot \frac{\partial S_{ФП}}{\partial T_{ЭБ}} \cdot \Delta T_{ЭБ}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{ЭБ}}{\partial f_{ОУ}} \cdot \frac{\partial f_{ОУ}}{\partial T_{ЭБ}} \cdot \Delta T_{ЭБ}\right)^2}. \quad (8)$$

Выходной сигнал ВС с последовательными изгибами $P_{вых}$ зависит как от параметров преобразователя, так и от температуры и давления в резервуаре:

$$P_{вых} = F(N, k, P_{вх}, K_{ж}, K_{Г}, R_i, K_{КО}, T, p), \quad (9)$$

где F – функция, описывающая связь выходного сигнала ВС с последовательными изгибами с уровнем жидкости.

Изменение выходного сигнала ВС с последовательными изгибами $\Delta P_{вых}$, вызванное изменением температуры жидкости и давления в резервуаре, определяется выражением:

$$\Delta P_{вых} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial T} \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p} \cdot \Delta p\right)^2}. \quad (10)$$

Для функционирования преобразователя должно выполняться условие: выходной сигнал преобразователя, с учетом изменения выходного сигнала из-за основной и дополнительной погрешности, должен позволять однозначно определять уровень жидкости, т.е.

$$P_{ГВ}(i) < \left(P_{расч} \pm \sqrt{(\Delta P_{осн})^2 + (\Delta P_{дон})^2} \right) < P_{ГВ}(i-1), \quad (11)$$

где $P_{ГВ}(i)$ – выходной сигнал, соответствующий граничным условиям i -го уровня, $P_{расч}$ – расчетное значение выходного сигнала при нормальных условиях.

В результате анализа влияния температуры на преобразователь установлено, что температура влияет на геометрические размеры ВС l , показатель преломления сердцевины ВС, показатель преломления жидкости, показатель преломления газа, источник оптического излучения:

$$\frac{\partial P_{вых}}{\partial T} = \frac{\partial F}{\partial P_{ex}} \cdot \frac{\partial P_{ex}}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial n_1} \cdot \frac{\partial n_1}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial n_{ж}} \cdot \frac{\partial n_{ж}}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial n_{г}} \cdot \frac{\partial n_{г}}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial l} \cdot \frac{\partial l}{\partial T}. \quad (12)$$

Компенсация температурной погрешности источника оптического излучения осуществляется аппаратно.

Изменение выходной мощности излучения при учете влияния температуры (от -70 °С до $+80$ °С) на показатель преломления сердцевины ВС, показатель преломления газа, диаметр сердцевины ВС (без учета влияния температуры на параметры жидкости) составляет менее 0,1 %. Изменение выходного сигнала преобразователя $P_{вых}$ (с учетом влияния температуры на все параметры преобразователя) показано на рисунке 6.

В диапазоне температур от -70 до $+80$ °С (рисунок 6) изменение выходного сигнала составляет 10% при одном погруженном изгибе ($N=1$), 22,4% - при двух погруженных изгибах ($N=2$) и 37,5% - при трех погруженных изгибах ($N=3$), что соответствует $-0,42$ %/°С. При 20 контролируемых точках изменение выходного сигнала полностью погруженного преобразователя составляет $-0,79$ %/°С.

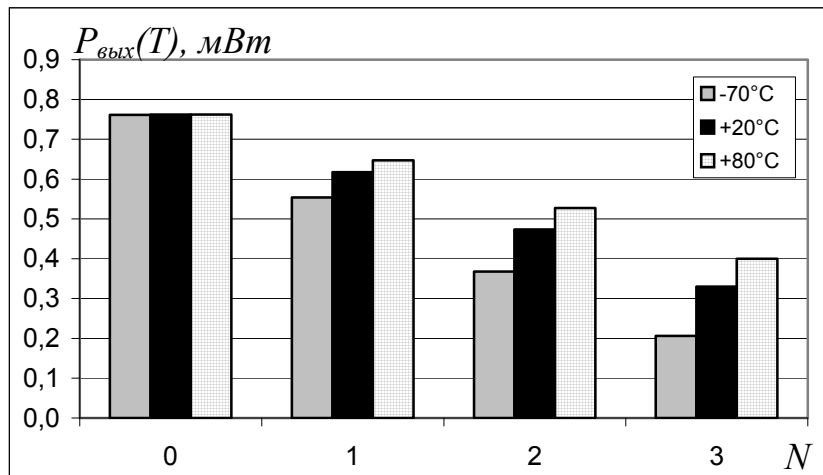


Рисунок 6 - Зависимость выходного сигнала от уровня при различной температуре в резервуаре.

Таким образом, установлено, что температура значительно сильнее влияет на показатель преломления жидкости, чем на параметры световода и показатель преломления газа:

$$\frac{\partial F}{\partial n_1} \cdot \frac{\partial n_1}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial n_r} \cdot \frac{\partial n_r}{\partial T} + \frac{\partial F}{\partial l} \cdot \frac{\partial l}{\partial T} \ll \frac{\partial F}{\partial n_{ж}} \cdot \frac{\partial n_{ж}}{\partial T} \quad (13)$$

Следовательно, основной составляющей температурной погрешности преобразователя является изменение показателя преломления жидкости от температуры:

$$\Delta P_{вых}(T) \approx \frac{\partial F}{\partial n_{ж}} \cdot \frac{\partial n_{ж}}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (14)$$

Результаты математического моделирования влияния температуры на преобразователь с тремя изгибам в диапазоне температур от -57 °С до +80 °С совпали с данными эксперимента с точностью 18%.

С увеличением количества контролируемых уровней усиливается влияние температуры на результат измерения. Для расширения рабочего температурного диапазона преобразователя необходимо, либо уменьшать количество контролируемых точек (увеличивать порог срабатывания), либо осуществлять температурную коррекцию результата.

Температурная коррекция результата заключается в определении температуры жидкости в резервуаре и на ее основе расчете текущего значения показателя преломления жидкости.

При измерении температуры жидкости в резервуаре с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ температурная погрешность преобразователя существенно уменьшается (рисунок 7). Так при трех погруженных изгибах температурная погрешность составит 1,1%, а при десяти погруженных изгибах 6,3%.

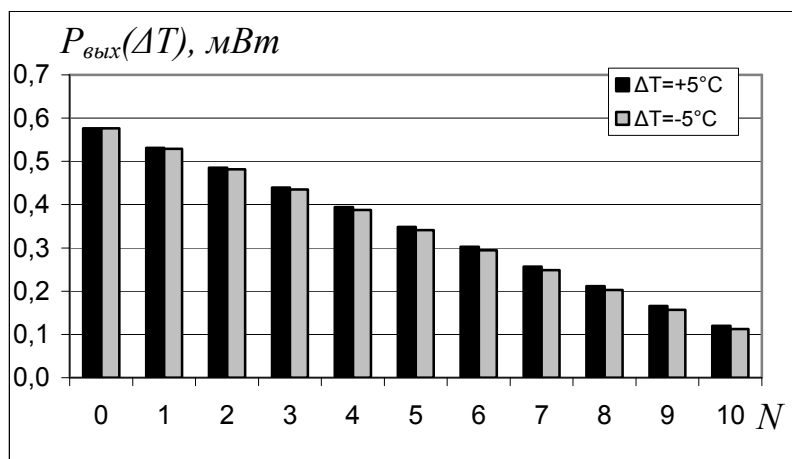


Рисунок 7 - Зависимость выходного сигнала от уровня жидкости при учете температуры жидкости в резервуаре.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что температура слабо влияет на параметры преобразователя. Температурная погрешность связана, в основном, с изменением показателя преломления жидкости из-за ее температуры. Корректировка зависимости выходного сигнала от уровня жидкости, при изменении параметров жидкости, позволяет обеспечить более высокую точность определения уровня.

Давление оказывает влияние на показатели преломления жидкости и газа в резервуаре и диаметр сердцевины ВС, т.е.

$$\frac{\partial P_{\text{вых}}}{\partial p} = \frac{\partial F}{\partial n_{\text{ж}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{ж}}}{\partial p} + \frac{\partial F}{\partial n_{\text{г}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{г}}}{\partial p} + \frac{\partial F}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial p} \quad (15)$$

В процессе исследований установлено, что влияние давления на геометрические параметры световода незначительно, т.е.

$$\frac{\partial F}{\partial a} \cdot \frac{\partial a}{\partial p} \ll \frac{\partial F}{\partial n_{\Gamma}} \cdot \frac{\partial n_{\Gamma}}{\partial p} + \frac{\partial F}{\partial n_{\text{ж}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{ж}}}{\partial p} . \quad (16)$$

На графике показана зависимость выходного сигнала $P_{\text{вых}}$ при давлении в резервуаре равном 10^5 Па и $30 \cdot 10^5$ Па (рисунок 8).

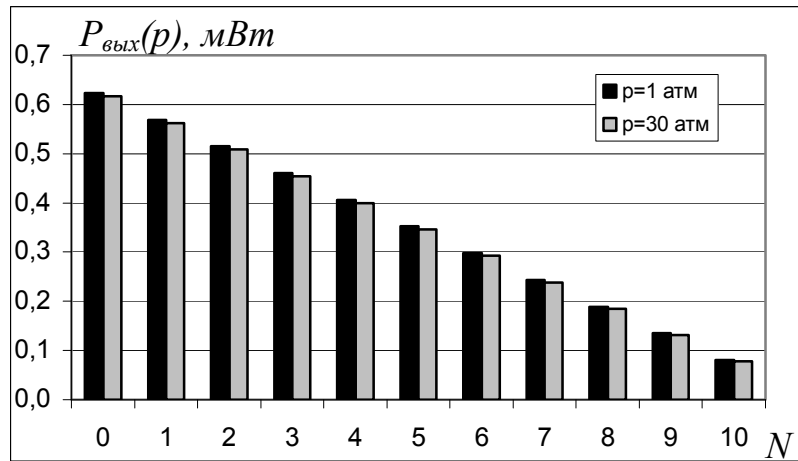


Рисунок 8 - Зависимость изменения выходного сигнала от давления в резервуаре.

У сухого преобразователя изменение выходного сигнала составляет -1,07%. Это вызвано влиянием давления на показатель преломления газа. При 10 погруженных изгибах погрешность составляет -3,65%. Данная погрешность обусловлена изменением свойств жидкости.

Таким образом, изменение выходного сигнала преобразователя $\Delta P_{\text{вых}}$, вызванное давлением в резервуаре, определяется изменением показателя преломления жидкости и газа в резервуаре:

$$\Delta P_{\text{вых}}(p) \approx \left(\frac{\partial F}{\partial n_{\text{ж}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{ж}}}{\partial p} + \frac{\partial F}{\partial n_{\Gamma}} \cdot \frac{\partial n_{\Gamma}}{\partial p} \right) \cdot \Delta p . \quad (17)$$

Суммарное изменение выходного сигнала преобразователя определяется совокупностью влияния всех возмущающих воздействий. При требуемом количестве контролируемых точек не должно возникать ошибки в определении уровня. Если эти условия совместно выполнить невозможно, то необходимо, либо уменьшать влияние возмущающих воздействий, либо уменьшать количество контролируемых точек на одном ВС. Требуемую точность определения уровня необходимо получить с помощью увеличения

количества ВС с последовательными изгибами световода (увеличения количества каналов).

В четвертой главе разработана методика проектирования многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе ВС с последовательными изгибами, разработано программное обеспечение, позволяющее осуществить расчет характеристик преобразователя, приведены примеры проектирования преобразователей уровня жидкости.

Методика проектирования многоканального дискретного ПУЖ на основе ВС с последовательными изгибами состоит из следующих этапов:

- 1) на основании требуемой точности измерения уровня жидкости Δl (по ТЗ) определяем требуемое количество изгибов k , на одном ВС ($m=1$);
- 2) определение параметров жидкости и газа, а также дестабилизирующих факторов;
- 3) оптимизация параметров преобразователя (a, R, n_l) для k точек с целью обеспечения максимальной чувствительности преобразователя;
- 4) определение погрешности измерения;
- 5) если погрешность измерения не влияет на результат определения уровня, то (шаг 6), иначе:
 - а) увеличить количество ВС ($m=m+1$) и уменьшить количество контролируемых точек на одном ВС ($k=k/m$) (шаг 3);
 - б) провести коррекцию результата измерения (шаг 2);
- 6) результат: определено количество требуемых ВС (m), количество изгибов одного ВС (k), параметры ВС (a, R, n_l); данный преобразователь обеспечивает требуемую точность измерения уровня Δl ;
- 7) определение коэффициентов передачи каналов электронного блока обработки информации; определение констант $P_{ГУ}(i)$, соответствующих граничным условиям различных уровней жидкости, для микроконтроллера.

В работе приведены примеры проектирования многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе ВС с последовательными изгибами с помощью разработанной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения данной работы были получены следующие научные и практические результаты.

Разработана структурная и функциональная схема многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе волоконного световода с последовательными изгибами, обеспечивающего определение наличия жидкости в нескольких точках с помощью одного волоконного световода и позволяющего осуществлять дискретное измерение уровня жидкости на основе волоконных световодов с последовательными изгибами.

Разработана математическая модель дискретного преобразователя уровня жидкости на основе волоконного световода с последовательными изгибами, в которой учтено взаимодействие оптического излучения, распространяющегося в световоде, с исследуемой средой, окружающей каждый изгиб световода, с помощью коэффициентов взаимодействия световод - внешняя среда. Учтено влияние эффекта каплеобразования, возникающего при извлечении изгибов световода из жидкости, на характеристики преобразователя уровня жидкости путем введения коэффициента каплеобразования в математическую модель.

Разработан алгоритм оптимизации параметров преобразователя, позволяющий обеспечить максимальное изменение выходного сигнала преобразователя, вызванное полным погружением последнего изгиба световода. Получено выражение, позволяющее определить радиусы изгибов световода для обеспечения одинаковой чувствительности преобразователя во всем диапазоне измерения. Совместное выполнение данных требований позволяет осуществить определение 50..60 уровней жидкости с помощью одного волоконного световода при нормальных условиях эксплуатации.

Показано, что основная погрешность преобразователя уровня жидкости определяется эффектом каплеобразования (от -2,2 до 8,3 % от выходного сигнала, в зависимости от ориентации преобразователя), погрешностью канала определения мощности источника излучения (0,5 %) и погрешностью преобразования электронного блока обработки информации (0,2 %).

Разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние внешних возмущающих воздействий на выходной сигнал. В результате исследований установлено, что влияние изменения температуры (в диапазоне от -70 °С до +80 °С) и давления (в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $30 \cdot 10^5$ Па) на волоконно-оптический световод вызывает изменение выходного сигнала менее, чем на 0,1%. Изменение температуры жидкости в том же температурном диапазоне вызывает изменение выходного сигнала полностью погруженного преобразователя с коэффициентом от $-0,42 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ (для 3 контролируемых точек) до $-0,79 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ (при 20 контролируемых точках) относительно выходного сигнала при +20 °С. Влияние давления на параметры жидкой и газовой сред в резервуаре в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $30 \cdot 10^5$ Па вызывает изменение выходного сигнала преобразователя на -1,07 % - для сухого и -3,65 % - для полностью погруженного преобразователя (при 10 контролируемых точках) и возрастает с увеличением количества изгибов.

Предложен способ компенсации влияния внешних возмущающих воздействий путем определения текущего показателя преломления жидкости и газа и корректировки коэффициентов взаимодействия световод – внешняя среда в математической модели. Применение данного способа позволяет уменьшить температурную погрешность преобразователя с 37,5% до 1,1% при температуре -70 °С.

Проведено экспериментальное исследование характеристик преобразователя уровня жидкости с тремя изгибами волоконного световода. Отклонение экспериментально полученной зависимости выходного сигнала преобразователя уровня жидкости от расчетной составляет около 4,6%. Проведены экспериментальные исследования влияния температуры на

измерительный преобразователь с тремя изгибами световода. Отклонение экспериментально полученной зависимости выходного сигнала преобразователя уровня жидкости от расчетной составляет около 18% в диапазоне измерения $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Исследован эффект каплеобразования, возникающий при стекании жидкости, и определено время срабатывания преобразователя. Определен коэффициент каплеобразования для воды при различных углах между плоскостью изгиба световода и вектором силы тяжести.

Разработана методика расчета параметров многоканального дискретного преобразователя уровня жидкости на основе волоконного световода с последовательными изгибами, которая, на основании требуемой точности определения уровня жидкости, информации о параметрах жидкости и газа, величине внешних возмущающих воздействий, погрешности преобразования электронного блока, позволяет получить структурную схему преобразователя и определить конструктивные и оптические параметры световодов, определить коэффициенты передачи по каждому из каналов измерения и константы, необходимые для написания программы микроконтроллера. Приведены примеры расчета преобразователей с помощью разработанной методики.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бусурин В.И., Гаврилин Б.Н., Жеглов М.А. Волоконно-оптический датчик уровня жидких сред с несколькими последовательными изгибами волоконно-оптического световода // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, №8, 2007, с. 42-44.
2. Бусурин В.И., Жеглов М.А., Ззя М. Анализ влияния температуры на волоконно-оптический датчик уровня жидких сред с несколькими последовательными изгибами волоконно-оптического световода //

Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, №6, 2008, с. 38-40.

3. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Волоконно-оптическая система контроля уровня топлива // 4-я международная конференция “Авиация и космонавтика – 2005”, 10-13 октября 2005 года. г. Москва. Тезисы докладов.-М.: Изд-во МАИ, 2005, с. 123.
4. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Волоконно-оптическая система контроля уровня топлива. // 5-я международная конференция “Авиация и космонавтика – 2006”, 23-26 октября 2006 года. г. Москва. Тезисы докладов.-М.: Изд-во МАИ, 2006, с. 267-268.
5. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Датчик уровня жидких сред с несколькими последовательными изгибами волоконно-оптического световода // Труды Российско-Китайской международной конференции по проектированию Аэрокосмической техники. Изд-во ИНФОРМИЗДАТ, 2007 г. с.204-209.
6. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Анализ влияния температуры на датчик уровня жидких сред с несколькими последовательными изгибами волоконного световода // 7-я международная конференция “Авиация и космонавтика – 2008”, 20-22 октября 2008 года. г. Москва. Тезисы докладов.-М.: Изд-во МАИ, 2008, с. 143-144.
7. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Датчик уровня жидких сред с к-изгибами волоконного световода. // Материалы Российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ-08) 10-12 ноября 2008 года, г. Москва. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), с 189-191.
8. Бусурин В.И., Жеглов М.А. Система комплексной оценки параметров жидких сред на основе волоконно-оптического преобразователя уровня жидкости с последовательными изгибами световода. // Труды XVIII международного научно-технического семинара

«Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», сентября 2009 г., Алушта. –М.: МИРЭА, 2009, с. 86.

9. Жеглов М.А. Методика расчета многоканального дискретного преобразователя уровня жидких сред на основе волоконного световода с последовательными изгибами. // 8-я международная конференция “Авиация и космонавтика – 2009”, 26-29 октября 2009 года. г. Москва. Тезисы докладов.-М.: Изд-во МАИ, 2009, с.117-118.