

На правах рукописи



Леонидова Зоя Евгеньевна

**ДАТЧИКИ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ С
НЕСКОЛЬКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ И
МАТРИЧНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре информационно-измерительной техники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Ясовеев Васих Хаматович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Гречишников Владимир Михайлович
Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П.Королева, зав. кафедрой электротехники

кандидат технических наук,
Важдаев Константин Владимирович
Уфимская государственная академия экономики и сервиса, доцент каф. МАПТС

Ведущее предприятие: ОАО УНПП «Молния», г.Уфа

Защита состоится «25» декабря 2012 г. в 9⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «23» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук, доцент



Месропян А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Информация об уровне сточных вод, продуктов нефтепереработки, технологических жидкостей и т.п. широко используется в системах управления водоподготовки, в нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, химической и пищевой промышленности, при производстве строительных материалов, в металлургии и т.д.

Датчики уровня жидкости (ДУЖ) в составе систем управления применяются для осуществления таких задач, как контроль и измерение уровня, объема и массы различных жидкостей, защита от сухого запуска насосов, защита от перелива и т.д.

Со стороны систем управления к датчикам уровня предъявляются достаточно жесткие требования по диапазону измерения (до 30 м и выше), разрешающей способности (до 0,1 мм и менее), точности (0,01...3 %), быстродействию (до 1 с), взрывобезопасности, механической прочности, рабочему диапазону температур и давлений, сроку эксплуатации, стоимости и т.д.

Наиболее полно этим требованиям отвечают бесконтактные датчики уровня (радиоизотопные, ультразвуковые, радарные, оптические).

Оптические бесконтактные датчики находят все более широкое применение за счет обеспечения работоспособности в достаточно жестких условиях эксплуатации, высокой точности, быстродействия, взрывобезопасности, надежности, широкого динамического диапазона, а также постепенного снижения их стоимости.

Однако, недостатками большинства бесконтактных оптических ДУЖ являются наличие значительной зоны нечувствительности (0,25...0,5 м) и недостаточная разрешающая способность (1...5 мм).

На практике часто желательное использование наклонных каналов измерения, когда датчик можно расположить рядом с объектом контроля (под некоторым углом к вертикальной оси резервуара). Это обеспечивает более эффективное использование объема резервуара (часто весьма дорогостоящего), уменьшение «мертвой» зоны, упрощение настроек, снижение требований к обеспечению безопасности обслуживающего персонала и снижение стоимости и эксплуатационных затрат.

Наибольшими потенциальными возможностями по уменьшению зоны нечувствительности и измерению уровня под углом к поверхности жидкости обладают оптические ДУЖ с использованием многоэлементных приемников излучения (триангуляционные, поплавковые, визуальные и т.д.). Созданию и развитию различных способов реализации ДУЖ с использованием многоэлементных приемников излучения посвящены разработки ученых России, США, Тайваня: Плотникова С.В., Якимовича Е.А. ,

Замятина Н.В., Бодика М.К., Пергамента А.М., Ти-Хо Ванг, Сид Азер, Шварц Нира, Катыса Г.П, Гонсалеса Р., Тагировой К.Ф и многих других.

ДУЖ с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения являются одним из перспективных направлений развития. Однако данные ДУЖ и их технические возможности не исследованы. В связи с этим разработана и исследована высокоточных бесконтактных способов измерения уровня жидкости (СИУЖ) и устройств с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения с уменьшенной зоной нечувствительности, улучшенной разрешающей способностью и универсальными возможностями размещения является актуальной задачей.

Цель работы: разработка и исследование способов и устройств измерения уровня жидкости с уменьшенной зоной нечувствительности, улучшенной разрешающей способностью, возможностью установки ДУЖ под углом к поверхности жидкости и обеспечивающих требуемые точность, быстродействие и диапазон измерения.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи:**

1) разработка способов и устройств измерения уровня жидкости с возможностью установки ДУЖ под углом к поверхности жидкости, обеспечивающих уменьшенную зону нечувствительности и улучшенную разрешающую способность;

2) теоретическая и экспериментальная оценка зоны нечувствительности, разрешающей способности, основной и дополнительной погрешностей разработанных ДУЖ с целью определения их технических возможностей;

3) разработка алгоритма определения уровня жидкости путем обработки цифровых изображений, полученных матричным приемником излучения ДУЖ, проведение его экспериментальной апробации и определение быстродействия;

4) разработка математической модели для определения предельного значения диапазона измерения разработанных ДУЖ и проведение теоретической и экспериментальной оценки факторов, влияющих на предельный диапазон измерения.

Методы исследований. Поставленные задачи решались путем теоретического анализа с последующей разработкой, изготовлением и испытанием физической модели ДУЖ. В теоретических исследованиях были использованы методы математического моделирования, основы геометрической оптики, фотометрии, теории измерений, матричного исчисления. Для реализации алгоритма определения уровня жидкости и обработки экспериментально полученных изображений использован пакет MATLAB.

Научная новизна

1. Предложен способ измерения уровня жидкости с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения, отличающийся получением и математической обработкой изображения нескольких лазерных меток (две, четыре) на поверхности жидкости с использованием триангуляционного и логометрического методов измерений (патенты РФ на изобретение № 2332644 и № 2338163).

2. Впервые получены аналитические выражения зоны нечувствительности, разрешающей способности, основной и дополнительных погрешностей ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, построенного на основании предложенного способа, учитывающие измеряемый уровень, технические параметры излучателей и приемника излучения, а также варианты их расположения, позволяющие оценивать характеристики ДУЖ и проектировать ДУЖ с требуемыми характеристиками.

3. Предложен алгоритм определения уровня жидкости путем обработки цифрового изображения лазерных меток, полученного фотокамерой ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками, включающий сегментацию, отличающуюся адаптивным определением порога, с использованием свойства связности пикселей, и позволяющий определять уровень жидкости посредством предложенного ДУЖ, а также способы, позволяющие уменьшить время выполнения исходного алгоритма, заключающиеся в повышении начального порога сегментации и изменении порядка сканирования.

4. Разработана математическая модель для определения предельного значения диапазона измерения для ДУЖ с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения, учитывающая размеры изображения лазерной метки, порог чувствительности матричного приемника излучения, конструктивные параметры датчика, технические параметры излучателей и приемника излучения, варианты их расположения, свойства жидкости и газовой среды над поверхностью жидкости, и позволяющая выявить максимально возможный диапазон измерения ДУЖ любого конструктивного исполнения, построенного по предложенному способу измерения, а также позволяющая осуществлять подбор технических характеристик и расположения относительно друг друга источников и приемника излучения датчика для получения требуемого диапазона измерения при проектировании ДУЖ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, позволяет уменьшить зону нечувствительности в 2 – 5 раз и повысить раз-

решающую способность в 1,5 – 4 раза по сравнению с аналогичными оптическими датчиками уровня в диапазоне измерения до 6 м.

2. Полученные аналитические выражения для ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, и математическая модель позволяют проектировать ДУЖ с требуемыми характеристиками.

3. ДУЖ с двумя параллельно направленными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной под углом к поверхности жидкости, позволяет реализовать наклонный канал измерения уровня жидкости, что позволяет расширить функциональные возможности и область применения датчика.

На защиту выносятся:

1. Способ измерения уровня жидкости и конструкции для ДУЖ с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований зоны нечувствительности, разрешающей способности, основной и дополнительной погрешностей ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости.

3. Алгоритм определения уровня жидкости предложенного ДУЖ и результаты экспериментального исследования быстродействия алгоритма.

4. Математическая модель для определения предельного значения диапазона измерения ДУЖ с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения и результаты теоретического и экспериментального исследования факторов, влияющих на предельный диапазон измерения.

Реализация результатов работы. Физическая модель и алгоритм обработки изображения ДУЖ с фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, и четырьмя неподвижными лазерами внедрены в учебный процесс УГАТУ. Предложенный алгоритм обработки изображений меток внедрен в ООО НПФ «Экситон-Автоматика» и ООО «НИЦМИ», г.Уфа, при разработке программного обеспечения для систем уровнеметрии.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на IV Всероссийской научно-технической конференции «Информационные и управленческие технологии в медицине и экологии» (Пенза, Россия, 2010), на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», посвященной 75-летию УГАТУ (Уфа, Россия, 2007), на 15-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника

и информатика – 2008» (Москва, Россия), на VIII Международной научно-практической конференции Наука и технологии: шаг в будущее – 2012 (Прага, Чехия), на VIII Международной научно-практической конференции Новости передовой науки -2012 (София, Болгария), на VIII Международной научно-практической конференции Прикладные научные разработки -2012 (Прага, Чехия), на Международной научно-практической конференции «Измерения: Состояние, перспективы развития» (Челябинск, Россия, 2012) а также на научных семинарах кафедры ИИТ УГАТУ в 2007–2012 гг.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 научных работ, 4 из которых из перечня ВАК. Получено 2 патента РФ на изобретения на способы измерения уровня жидкости и устройства, их реализующие (№ 2332644 и № 2338163).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 86 наименований и приложений. Материал диссертации изложен на 206 страницах, содержит 68 иллюстрации и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, выделены научная новизна и практическая ценность работы, а также сформулированы основные выводы и результаты диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе показаны место и роль ДУЖ в типовых системах управления процессом очистки сточных вод, канализации и дожимных насосных станций.

Сформулированы основные требования, предъявляемые к ДУЖ со стороны систем управления.

Разработана классификация известных способов измерения уровня жидкости. В результате проведенного сравнительного анализа наиболее перспективными признаны ДУЖ с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения.

Во второй главе предложен способ измерения уровня жидкости с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения, заключающийся в получении и математической обработке изображения нескольких (двух, четырех) лазерных меток на поверхности жидкости, а также поверхностях вспомогательных элементов, с применением триангуляционного и логометрического методов. По предложенному способу разработаны конструкции, функциональные схемы и получены формулы вычисления уровня для ДУЖ с двумя и с четырьмя лазерными источниками, с использованием тонкой прозрачной пленки в качестве вспо-

могательного элемента и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости. Принцип действия ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости (рисунок 1 а,б), заключается в следующем: лучи лазеров 1 и 2, 3 и 4, отражаясь от поверхности жидкости, дают изображение четырех лазерных меток N_1, B_1, D_1, F_1 ; цифровое изображение лазерных меток фиксирует фотокамера и передает его в микроконтроллер, где вычисляется уровень жидкости по следующей формуле:

$$h_1 = \frac{l_2}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}} - b_1 = \frac{l_1 \cdot l_{2\text{изм}}}{2 \cdot l_{1\text{изм}} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}} - b_1, \quad (1)$$

где l_1 и l_2 – расстояния между метками N_1 и B_1, D_1 и F_1 ; $l_{1\text{изм}}$ и $l_{2\text{изм}}$ – расстояния между центрами яркости лазерных меток N_1 и B_1, D_1 и F_1 , полученные микроконтроллером; α_1 – угол между лазерами 1 и 3; b_1 – величина, определяемая конструкцией датчика.

Для ДУЖ (рисунок 1 а, б) получены формулы расчета зоны нечувствительности z_1 , образуемой лазерами 1 и 3, и минимальной зоны нечувствительности $z_{2\text{мин}}$, образуемой лазерами 2 и 4:

$$z_1 = \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \cdot b_1}{\operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (2) \quad z_{2\text{мин}} = h_{1\text{макс}} \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \frac{\rho}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\theta_1}{2}} + \frac{P_{1\text{мин}}}{P_{1\text{к}}} \right), \quad (3)$$

где θ_1 – угол обзора камеры ($\alpha_1 < \theta_1$); b_1, e_1 – величины, определяемые конструкцией ДУЖ; $h_{1\text{макс}}$ – максимальное значение уровня; ρ – угол расхождения лучей лазеров; $P_{1\text{мин}}$ – минимальное расстояние между изображениями лазерных меток в пикселях, $P_{1\text{мин}} \neq 0$; $P_{1\text{к}}$ – разрешение фотокамеры в направлении с наименьшим количеством пикселей.

Задав $b_1 = 0$, можно исключить зону нечувствительности z_1 .

Для различных фотокамер, при значениях параметров $\rho = 2,5 \cdot 10^{-3}$, $P_{1\text{мин}} = 5$ пикселей, в диапазоне измерения уровня до 30 м получены зависимости $z_{2\text{мин}}(h_{1\text{макс}})$, предельные случаи которых показаны на рисунке 1 в.

Минимальная зона нечувствительности при заданных параметрах составляет: 0,0092 м в диапазоне измерения уровня до 2 м, что в 1,08 – 2,5 раз меньше зоны нечувствительности оптических триангуляционных ДУЖ и как минимум в 5 раз меньше зоны нечувствительности оптических радарных ДУЖ в этом диапазоне; 0,027 м в диапазоне измерения уровня до 6 м, что как минимум в 2 раза меньше зоны нечувствительности оптических радарных ДУЖ в этом диапазоне; 0,046 – 0,138 м - в диапазоне измерения уровня 10...30 м, что соответствует зоне нечувствительности оптических радарных ДУЖ.

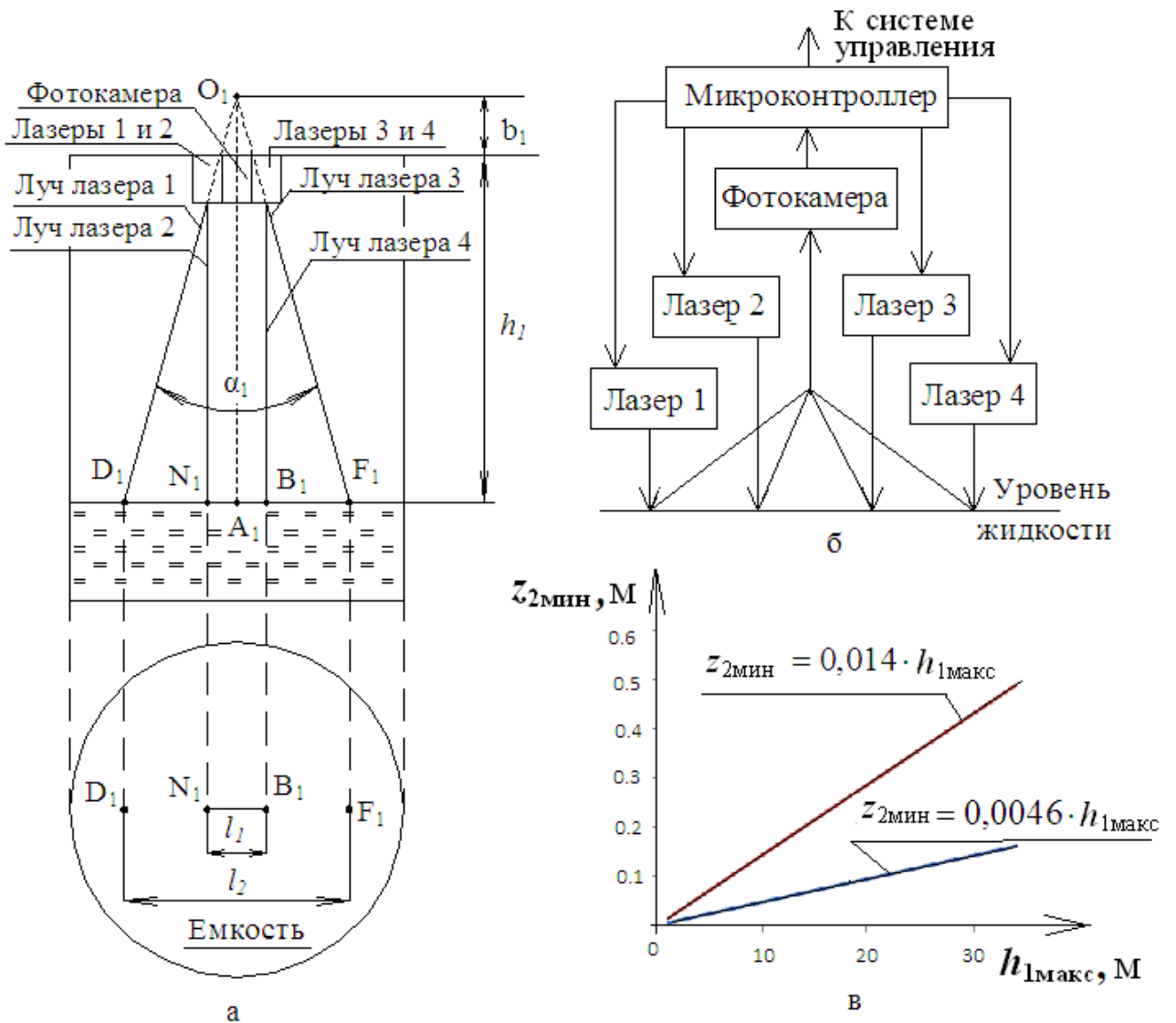


Рисунок 1 – Датчик уровня жидкости с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости:

а – конструктивная схема датчик; б – структурная схема датчика;
в – зона нечувствительности $z_{2\text{мин}}$ ДУЖ

При расположении излучателей и приемника ДУЖ под углом к поверхности жидкости, изображение меток, получаемое фотокамерой ДУЖ, является искаженным. Предложен ДУЖ с двумя параллельно направленными лазерами и фотокамерой, расположенными под углом к поверхности жидкости (рисунок 2 а). Для разработанного ДУЖ получено аналитическое выражение, связывающее расстояние между изображениями лазерных меток с уровнем :

$$l_3(h_2) = \frac{(h_2 - h_{1к}) \cdot F_k \cdot (a_2 + b_2) \cdot \cos \gamma_2}{(h_2 - h_{1к})^2 + (h_2 - h_{1к}) \cdot (a_2 - b_2) \cdot \sin \gamma_2 - a_2 \cdot b_2 \cdot \sin \gamma_2}, \quad (4)$$

где l_3 – значение расстояния между изображениями меток А и В (A_1B_1);

h_2 – уровень жидкости; $h_{1к}$ – высота расположения фотокамеры; F_k – фокусное расстояние фотокамеры; a_2, b_2 – расстояние между оптической осью объектива и осями параллельно направленными лазерами ($OL_1=a_2, OL_2=b_2$); γ_2 – угол между оптической осью объектива и вертикалью.

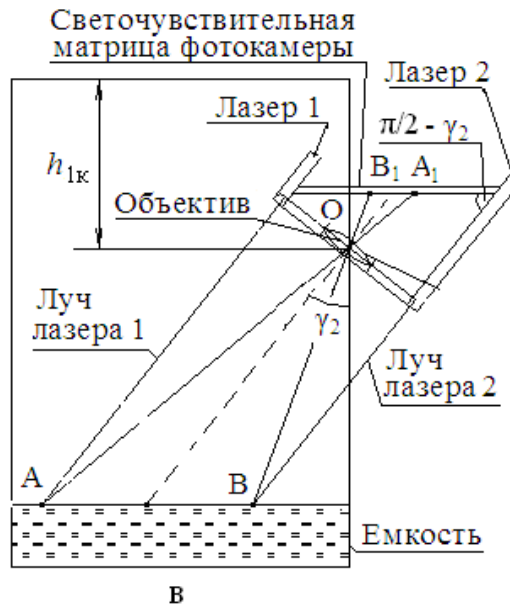
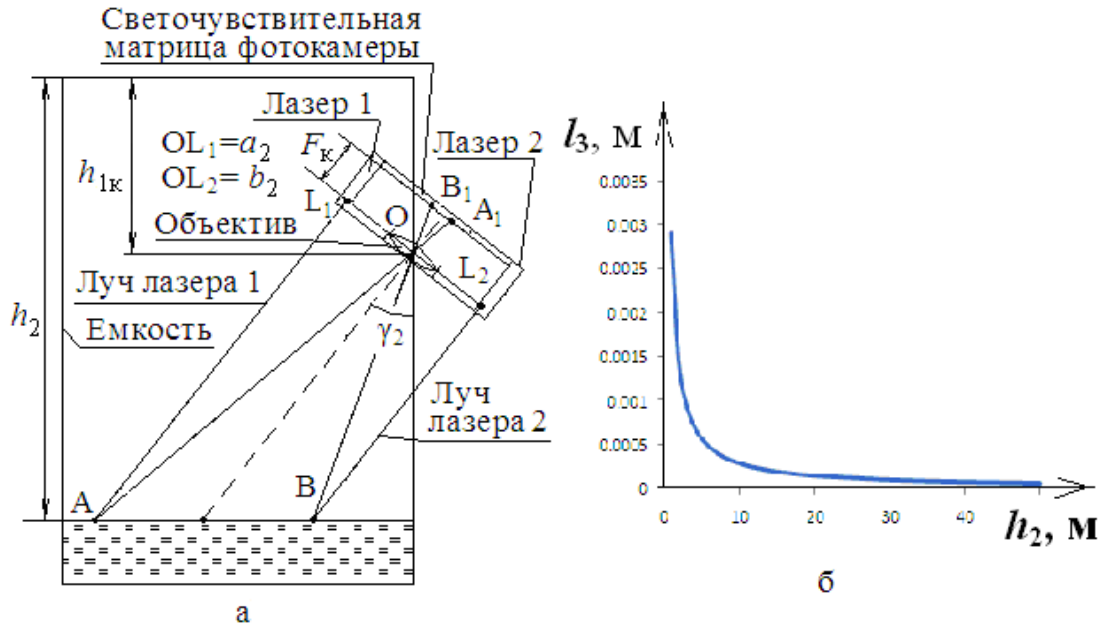


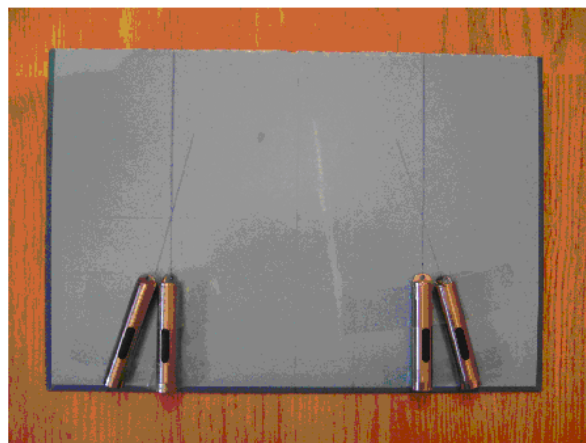
Рисунок 2 – Измерение уровня под углом к поверхности жидкости:
 а – конструктивная схема ДУЖ с двумя параллельно направленными лазерами и фотокамерой, расположенными под углом к поверхности жидкости; б – функция $l_3(h_2)$; в – компенсация искажения изображения путем расположения светочувствительной матрицы под углом $(\pi/2 - \gamma_2)$ к оптической оси

Чувствительность такого ДУЖ для заданных параметров выше в диапазоне уровня жидкости до 7 м (рисунок 2 б).

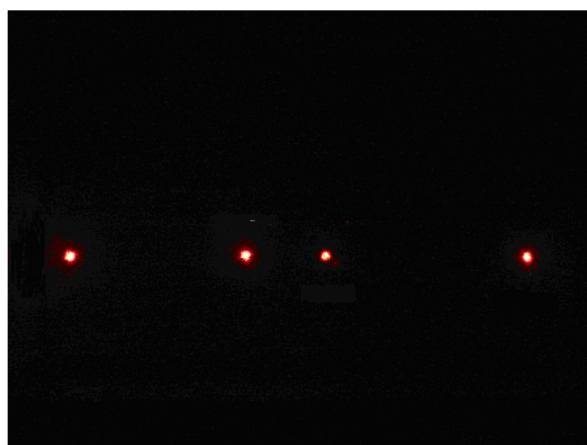
Другим способом измерения в условиях ограниченного пространственного доступа к объекту при помощи предложенных ДУЖ является

компенсация искажения изображения. Показано, что для случая наклонного к поверхности жидкости расположения оптического канала возникающее искажение изображения меток на поверхности жидкости может быть скомпенсировано путем расположения светочувствительной матрицы матричного приемника излучения под соответствующим углом (рисунок 2 в).

Третья глава посвящена разработке алгоритма обработки цифрового изображения лазерных меток (рисунок 3 а) и исследованию быстродействия и разрешающей способности ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости. Для этой цели была разработана физическая модель ДУЖ, состоящая из фотокамеры Panasonic DMS-FX8 и четырех лазеров UL-3, конструктивное расположение которых показано на рисунке 3б.



б



в

Рисунок 3 – Алгоритм определения уровня и физическая модель ДУЖ:

а – схема алгоритма определения уровня; б – конструктивное расположение лазеров UL-3; в – изображение полученное фотокамерой физической модели датчика

Нахождение оптимального порога сегментации в алгоритме происходит с использованием свойства связности пикселей. Центр яркости каждой лазерной метки соответствует гравитационному центру метки по яркости.

Предложенный алгоритм реализован в пакете MATLAB.

При исследовании способов повышения быстродействия были использованы повышение начального порога сегментации и порядка сканирования, линейная пространственная и медианная фильтрации изображения.

Время вычисления значения уровня по предложенному алгоритму (на ПЭВМ с процессором Intel Core DUO CPU, с тактовой частотой 1.80 ГГц и оперативной памятью 3.574 Гбайт) с погрешностью измерения уровня 0,2 % составляет 1,07 – 7,55 с, а при расчете с погрешностью измерения уровня 1,8 % составляет 0,97 с. Что удовлетворяет требованиям большинства систем управления.

Получено аналитическое выражение для расчета разрешающей способности ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости:

$$h_p = \frac{2 \cdot l_{1п} \cdot h_1 \cdot S_{1п}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2} \cdot \pi \cdot F_k^3 \cdot \left(\frac{R_{нл}}{h_1} + \operatorname{tg} \frac{\rho}{2} \right)^2}, \quad (7)$$

где h_1 – уровень жидкости; F_k – фокусное расстояние фотокамеры; $l_{1п}$ – максимальная длина 1 пикселя в метрах; $S_{1п}$ – площадь 1 пикселя в квадратных метрах; $R_{нл}$ – радиус выходной апертуры (выходного отверстия) лазера; ρ – угол расхождения лазерного луча.

На рисунке 4 показаны найденные зависимости $h_p(h_1)$ для различных фотокамер при минимальных значениях F_k и максимальных значениях разрешающих способностей фотокамер, $\alpha_1=30^\circ$, $R_{нл}=1,5$ мм, $\rho=2,5 \cdot 10^{-3}$ рад.

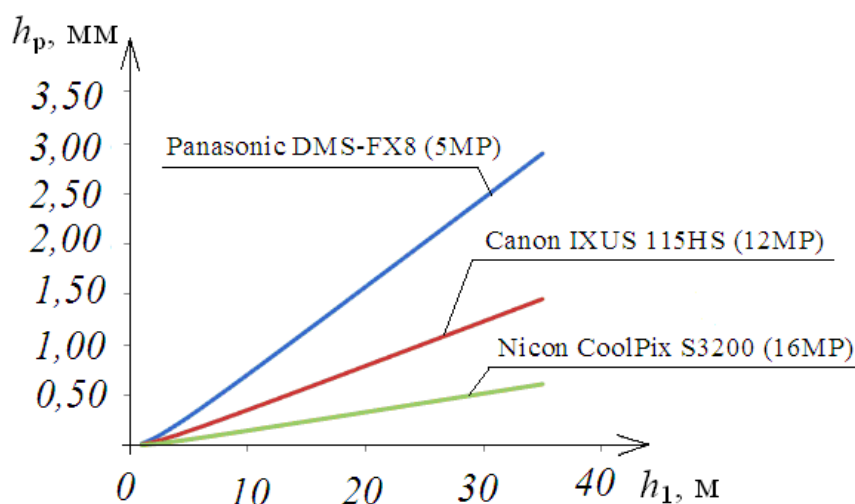


Рисунок 4 – Зависимости $h_p(h_1)$ для различных фотокамер

Расчетное значение разрешающей способности ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой (Nicon CoolPix S3200), расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, в диапазоне уровня до 6 м не превышает 29 – 77,7 мкм, что как минимум в 1,5 – 4 раза меньше значения разрешающей способности оптических радарных датчиков.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию математической модели для определения предельного значения диапазона измерения предложенных ДУЖ. Были выделены факторы, способные ограничить диапазон измерения.

По результатам проведенного эксперимента контрастность изображения лазерных меток, определяемая соотношением сигнал/шум 1,14...5,1, при условии исключения посторонних источников света и поверхностей с высоким коэффициентом диффузного отражения из поля зрения приемника излучения, не влияет на предельный диапазон измерения.

При введении допущений (площади всех лазерных меток минимальны и имеют форму окружности; жидкость непрозрачна; поток диффузно отраженного излучения равномерно распределен по всем возможным направлениям над поверхностью жидкости в телесном угле $\Omega_1=2\pi$; газовая среда над поверхностью жидкости однородна) получена математическая модель для расчета предельного диапазона измерения рассматриваемых ДУЖ по порогу чувствительности матричного приемника излучения:

$$h_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{(\cos\varphi)^2 \cdot k_{\text{пл}} \cdot k_{\text{до}} \cdot \Phi_0 \cdot S_{\text{д}}^2 \cdot \cos\alpha_2}{\pi^2 \cdot F_{\text{к}}^2 \cdot S_{\text{нл}} \cdot \left(E_{\text{в}} - \frac{k_{\text{пл}} (\sigma_{\text{р}} \cdot \Phi_{\text{зо}} + \Phi_{\text{пи}})}{S_{\text{илм}}}\right) \cdot \text{tg} \frac{\rho}{2}}} \times \sqrt{\frac{\sin\psi \cdot \sin^2(\psi + \varphi) \cdot e^{(-\mu(2h_{2\text{к}} - h_{1\text{к}} - h_{1\text{л}}))}}{(\text{tg} \alpha_2 \cdot (\text{tg}(\alpha_2 - \frac{\rho}{2}) + \text{tg}(\alpha_2 + \frac{\rho}{2})) + 2) \cdot \text{tg} \frac{\rho}{2}}} - \frac{R_{\text{нл}}}{\text{tg} \frac{\rho}{2}} + h_{1\text{л}}}, \quad (8)$$

где φ – угол расположения камеры относительно вертикали; α_2 – угол отклонения лазера от вертикали; ψ – угол между осью конуса лазерного луча и поверхностью жидкости; $k_{\text{пл}}$ – коэффициент поглощения излучения в системе линз приемника; $k_{\text{до}}$ – коэффициент диффузного отражения жидкости; Φ_0 – выходная мощность лазера; $S_{\text{д}}$ – площадь апертурной диафрагмы фотокамеры; μ – полный коэффициент ослабления; $h_{2\text{к}}$ – высота емкости; $h_{1\text{к}}$ – высота фотокамеры; $h_{1\text{л}}$ – высота лазера; $S_{\text{нл}}$ – площадь выходной апертуры лазера; $E_{\text{в}}$ – освещенность изображения отдельной лазерной метки; $\sigma_{\text{р}}$ – индикатриса распределения зеркально отраженного света по направлениям; $\Phi_{\text{зо}}$ – поток зеркально отраженного света; $\Phi_{\text{пи}}$ – поток от посторонних источников излучения.

При использовании различных приемников излучения с оптимальным временем выдержки в диапазоне 1/60...1с, лазерного источника UL-3 с $\alpha_2 = \pi/6$ рад, при $k_{до} = 30\%$, $\Phi_{пи} = 0$ предельный диапазон измерения составляет не менее 40 м, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым со стороны большинства систем управления.

Получена формула предельного диапазона измерения уровня ДУЖ, ограниченного размерами изображения лазерной метки:

$$h_p = \frac{R_{нл}}{\frac{1}{F_k} \sqrt{\frac{S_{лп}}{\pi} - \operatorname{tg} \frac{\rho}{2}}} \quad (9)$$

Влияние размера изображения лазерной метки на предельный диапазон измерения может быть исключено соответствующим подбором разрешающей способности и фокусного расстояния фотокамеры. Достоверность полученных данных подтверждена результатами эксперимента по измерению площади лазерной метки.

Получены аналитические выражения для расчета предельного значения уровня, ограниченного конструктивными параметрами ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, учитывающее параметры источников и приемников излучения, а также их расположение в пространстве. Выявлены условия, при которых влияние части конструктивных параметров может быть исключено.

Предложена математическая модель для определения предельного значения диапазона измерения предложенных ДУЖ:

$$h_{п} = \min(h_p, h_{ч}, h_{к}), \quad (10)$$

где $h_{к}$ – предельный диапазон измерения, ограниченный конструктивными параметрами ДУЖ.

Пятая глава посвящена анализу погрешностей предложенных ДУЖ.

Основная относительная погрешность ДУЖ с четырьмя лазерными источниками и фотокамерой (Canon IXUS 100IS), расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, определена экспериментально и составляет 0,25...0,6 % в диапазоне изменения уровня 0,5...6 м. В данном случае погрешность практически полностью определяется абберациями объектива фотокамеры, а именно, дисторсией, которая может быть скорректирована путем калибровки фотокамеры и исправлена программно. При программной коррекции дисторсии, основная погрешность ДУЖ будет определяться погрешностью дискретизации $\Delta h_{д}$, и ее ожидаемое значение по результатам расчетов и экспериментов составляет около 0,01 %:

$$\Delta h_d = h_1 \cdot \frac{l_{д2} + l_{д4}}{\frac{l_1 \cdot F_k}{(h_1 - e_1) \cdot l_{1п}} + l_{д2} + l_{д4}} - \frac{(l_{д1} + l_{д3}) \cdot (h_1 - e_1) \cdot l_{1п}}{2F_k \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_1}{2}}, \quad (11)$$

где $l_{д1}$, $l_{д2}$, $l_{д3}$, $l_{д4}$ – расстояния перехода лазерных меток, соответствующие разрешающей способности датчика.

Дополнительная относительная температурная погрешность Δh_t в диапазоне измерения уровня до 2 м при заданных параметрах ($e_1=0$; $b_1=0$; $l_1=0,15$ м; $\alpha_1=30^\circ$; коэффициент теплового расширения стали нержавеющей ферритной 12Х13 $k_t=9,9 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) увеличивается при отклонении от нормальной температуры на значение $8,5 \cdot 10^{-4} \%/^\circ\text{C}$; а в диапазоне измерения уровня до 30 м – на значение $10^{-3} \%/^\circ\text{C}$.

Дополнительная относительная погрешность от влияния посторонних источников излучения определена экспериментально и не превышает 2 %.

Получена формула дополнительной погрешности от нестабильности поверхности уровня жидкости:

$$\Delta h_6 = \frac{h_1 \cdot \Delta h_{1B} + h_1 \cdot \Delta h_{1N} + 2\Delta h_{1N} \cdot \Delta h_{1B}}{2h_1 + \Delta h_{1B} + \Delta h_{1N}} - h_1 \left(\frac{h_1 \Delta h_{1D} + h_1 \Delta h_{1F} + 2\Delta h_{1F} \cdot \Delta h_{1D}}{2 \cdot (h_1 + \Delta h_{1F})(h_1 + \Delta h_{1D})} \right), \quad (12)$$

где Δh_{1N} , Δh_{1B} , Δh_{1F} , Δh_{1D} – высота расположения лазерных меток относительно истинного значения уровня; h_b – высота волнений поверхности.

В наихудшем случае Δh_b соответствует половине высоты волнений поверхности. Эту погрешность можно уменьшить, используя усредненную информацию нескольких изображений для одного измерения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен способ измерения уровня жидкости для ДУЖ с несколькими лазерными источниками и матричным приемниками излучения, отличающийся получением и математической обработкой изображения нескольких (двух, четырех) лазерных меток на поверхности жидкости с использованием триангуляционного и логометрического методов измерений, позволяющий уменьшить зону нечувствительности и улучшить разрешающую способность ДУЖ. Новизна способа подтверждена патентами РФ на изобретения № 2332644, № 2338163.

Предложенный способ позволяет обеспечить расположение ДУЖ под углом к поверхности жидкости.

2. Впервые получены аналитические выражения зоны нечувствительности и разрешающей способности ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерами и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, учитывающие технические параметры излучателей и приемни-

ка излучения, а также варианты их расположения, и позволяющие оценивать характеристики ДУЖ и проектировать ДУЖ с требуемыми характеристиками. Полученное значение зоны нечувствительности в 2 – 5 раз меньше по сравнению с другими оптическими датчиками в диапазоне измерения до 6 м. Значение разрешающей способности рассматриваемого датчика в диапазоне измерения уровня до 6 м как минимум в 1,5 – 4 раза лучше значения разрешающей способности оптических радарных датчиков.

3. Предложен алгоритм определения уровня жидкости, путем обработки цифрового изображения лазерных меток, полученного фотокамерой ДУЖ с четырьмя неподвижными лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, включающий сегментацию, отличающуюся адаптивным определением порога, с использованием свойства связности пикселей, и позволяющий определять уровень жидкости посредством предложенного ДУЖ, а также способы, позволяющие уменьшить время выполнения исходного алгоритма в 7 – 8 раз, заключающиеся в повышении начального порога сегментации и изменении порядка сканирования. Экспериментально получено время выполнения предложенного алгоритма (на ПЭВМ с процессором Intel Core DUO CPU, с тактовой частотой 1.80 ГГц и оперативной памятью 3.574 Гбайт): с погрешностью измерения уровня 0,2 % составляет 1,07 – 7,55 с, а при расчете с погрешностью измерения уровня 1,8 % (при изменении порядка сканирования) – 0,97 с.

Соответствующее времени выполнения алгоритма, быстродействие физической модели ДУЖ удовлетворяет требованиям со стороны большинства систем управления.

4. Разработана математическая модель для определения предельного значения диапазона измерения предложенных ДУЖ, учитывающая размеры изображения лазерной метки, порог чувствительности приемника излучения, конструктивные параметры датчика, технические параметры излучателей и приемника излучения, варианты их расположения, свойства жидкости и газовой среды над поверхностью жидкости, и позволяющая выявить максимально возможный диапазон измерения ДУЖ любого конструктивного исполнения, построенного по предложенному способу измерения, а также осуществлять подбор технических характеристик и расположения относительно друг друга источников и приемника излучения датчика для получения требуемого диапазона измерения при проектировании ДУЖ. Расчетное значение предельного диапазона измерения ДУЖ для выбранных типовых параметров составило не менее 40 м, что соответствует диапазону измерения аналогичных датчиков, а в некоторых случаях превышает его.

5. Основная относительная погрешность ДУЖ с четырьмя лазерными источниками и фотокамерой, расположенной перпендикулярно поверхности жидкости, определена экспериментально и составляет 0,25...0,6 % в диапазоне изменения уровня 0,5...6 м. При использовании программной коррекции дисторсии объектива фотокамеры основная погрешность ДУЖ будет соответствовать погрешности дискретизации, ожидаемое значение которой составляет около 0,01 %.

Дополнительная относительная температурная погрешность при отклонении от нормальной температуры в диапазоне измерения уровня до 2 м при заданных параметрах увеличивается на значение $8,5 \cdot 10^{-4} \%$ / °С; в диапазоне измерения уровня до 30 м – на значение $10^{-3} \%$ / °С.

Дополнительная относительная погрешность от влияния посторонних источников излучения определена экспериментально и не превышает 2 % .

Дополнительная погрешность от нестабильности поверхности уровня жидкости в наихудшем случае соответствует половине высоты волновой поверхности. Установлено, что эту погрешность можно уменьшить, используя усредненную информацию нескольких изображений для обработки одного измерения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Леонидова З.Е., Мукаев Р.Ю. Датчики уровня жидкости с матричными приемниками излучения // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 6 . – С. 53–58.

2. Леонидова З.Е. Лазерный датчик уровня жидкости с многоэлементным приемником излучения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика . – 2012. – № 6. – С. 60–66.

3. Леонидова З.Е. Бесконтактные измерения уровня жидкости в условиях ограниченного доступа к объекту // Экологические системы и приборы. – 2012. – № 6. – С. 3-10.

4. Леонидова З.Е. Особенности обработки цифровых изображений датчиков уровня жидкости с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения // Экологические системы и приборы. – 2012. – № 7. – С. 29–36.

Патенты:

5. Пат. 2332644 РФ. Новый способ и устройство измерения уровня жидкости / Леонидова З.Е., Мукаев Р.Ю. ; Заявл. 27.03.2007; Оpubл. 28.08.2008, Бюл. № 24. – 11 с.

6. Пат. 2338163 РФ. Новый способ и устройство измерения уровня жидкости / Леонидова З.Е., Мукаев Р.Ю. ; Заявл. 06.06.2007; Оpubл. 10.11.2008, Бюл. № 31. – 10 с.

Статьи в других изданиях:

7. Леонидова З.Е. Способ измерения уровня жидкости с использованием телевизионной камеры // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная науч.конф., посвященная 75-летию УГАТУ: Сб. труд. Т. 2. – Уфа, 2007. – С. 71

8. Леонидова З.Е. Видеоуровнемеры // Микроэлектроника и информатика – 2008. 15-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2008. – С. 65

9. Леонидова З.Е. Мукаев Р.Ю. Новое поколение датчиков медицинского назначения // Информационные и управленческие технологии в медицине и экологии: Сб.ст. 4-ой Всероссийской НТК. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2010. – С. 69–72.

10. Леонидова З.Е. Преобразователь уровня жидкости с четырьмя неподвижными лазерными источниками и матричным приемником излучения // Новости передовой науки–2012: Мат. VIII междунар. науч.-практ. конф. Т. 26: Технологии. – София (Болгария), 2012. – С. 36–38.

11. Леонидова З.Е. Бесконтактный способ измерения уровня жидкости с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения для систем управления очистки сточных вод // Наука и технологии: шаг в будущее-2012: Мат. VIII междунар. науч.-практ. Конф.. Т. 37: Технологии.- Прага (Чехия), 2012. – С. 53–55.

12. Леонидова З.Е. Преобразователь с двумя неподвижными лазерными источниками и матричным приемником излучения, предназначенный для бесконтактного измерения уровня в условиях ограниченного доступа к объекту // Прикладные научные разработки – 2012: Мат. VIII междунар. науч.-практ. конф. Т. 13: Технологии. – Прага (Чехия), 2012. – С. 77–79.

13. Леонидова З.Е., Мукаев Р.Ю. Датчики уровня жидкости с матричными приемниками излучения // Справочник инженера. – 2012.– № 3. – С. 25–32.

14. Леонидова З.Е., Ясовеев В.Х. Датчики уровня жидкости с несколькими лазерными источниками и матричными приемниками излучения // Измерения: состояние, перспективы развития: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 159–160

Леонидова Зоя Евгеньевна

ДАТЧИКИ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ С НЕСКОЛЬКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ И МАТРИЧНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.11.2012. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman
Усл. печ.л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 1035

ФГ БОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12.