

На правах рукописи



**Борисов Руслан Андреевич**

**ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТНО-  
СКОРОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства  
вычислительной техники и систем  
управления

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

Ульяновск – 2022

Работа выполнена на кафедре «Авиационная техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

Научный руководитель: **Антонец Иван Васильевич**, доктор технических наук, доцент  
Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, профессор кафедры «Авиационная техника»

Официальные оппоненты: **Михайлов Пётр Григорьевич**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», ведущий научный сотрудник

**Новиков Сергей Геннадьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»

Ведущая организация: Акционерное общество «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», г. Ульяновск

Защита диссертации состоится 18 мая 2022 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.277.04 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». Диссертация и автореферат размещены на сайте <http://www.ulstu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Наместников А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертационного исследования.

Аэрметрические датчики давлений, входящие в состав системы воздушных сигналов (СВС), предназначены для восприятия полного и статического давлений с последующим преобразованием полученной информации в цифровые сигналы, которые, в свою очередь, передаются в вычислительное устройство СВС с целью вычисления высотно скоростных параметров движения летательного аппарата.

Повышение технических характеристик цифровых авиационных систем управления существенно зависит от точности и надёжности источников первичной информации. При этом существенная роль отведена датчикам давления, составляющим до 80% всех датчиков, входящих в комплектацию авиационных объектов, которые должны обладать неизменностью метрологических характеристик в течение всего срока их службы и иметь высокую устойчивость к внешним воздействиям. Глубокая интеграция бортового электронного оборудования и бортовых вычислительных средств, необходимость повышения ресурса авиационной техники, снижения эксплуатационных затрат требует разработки и внедрения высокоточных датчиков.

Выпускаемые в настоящее время измерительные преобразователи давления, основанные на методе прямого преобразования, различаются как видом деформационного упругого чувствительного элемента (УЧЭ), так и способом преобразования его перемещения или развиваемого им усилия в электрический сигнал. Наибольшее распространение в авиации в настоящее время получили частотные датчики полного и статического давлений, обладающие относительно высокой точностью и функциональной надёжностью. Однако, частотным датчикам давлений присущи недостатки, среди которых отметим относительно сложную схему автогенератора, обеспечивающего контроль температуры резонатора; скачкообразное изменение выходного сигнала по давлению при переходе через критические точки давления и погрешность, вызванную изменением температуры.

Датчики давления, основанные на оптоэлектронных преобразователях информации, предполагающие наличие линеек фотоэлектронных приемников (ЛФП), позволяющих осуществлять преобразование пространственного распределения светового поля в электрический сигнал, получают в последние годы широкое распространение.

Отличительной чертой, предлагаемых в работе датчиков, является наличие высокочувствительного вторичного преобразователя и упругого элемента с ограниченной амплитудой отклонений, что обеспечивает повышение точности измерения давлений и во многом исключает недостатки аналогов. Отсюда возникает необходимость теоретического исследования процесса обработки первичной информации и разработки математических моделей, в том числе дискретных, позволяющих использовать их в цифровых алгоритмах для повышения точности результатов измерений и оптимизации самого процесса измерения по временным затратам и себестоимости.

**Степень разработанности темы исследования.** Фундаментальные основы теоретических и экспериментальных исследований первичных преобразователей давлений, заложены в работах: Феодосьева В.И. Андреевой Л.Е., Пономарева С.Д., Панова Д.Ю., Феликсона Е.И. Кроме того, этому вопросу посвящены работы: Church A. H., Almen L., Sayere M.E. Fangelmann M.G. и др. Исследованиям и разработкам датчиков давлений посвящены работы: А.Н. Петунина, Е.С. Вождаева (ФГУП «ЦАГИ»), Б.М. Абрамова, Г.Е. Бельфора, Б.В. Лебедева, В.Г. Кравцова, А.К. Панкратова, Н.В. Алексеева, Р.Г. Чачикяна, А.А. Солдаткина, В.В. Солдаткина, Н.Н. Макарова, R.V. Egolf, J. Grau, R.P. Smith, Daw, P.E. Sheridian и других отечественных и зарубежных специалистов и ученых.

**Цель диссертационного исследования** – разработка и исследование новых датчиков статического и полного давлений, использующих оптоэлектронные преобразователи на основе ЛФП с улучшенными метрологическими характеристиками, сниженными массогабаритными параметрами конструкции и уменьшенным собственным потреблением мощности.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработка методики расчета УЧЭ, принципиальным отличием которой является учет технических характеристик вторичного преобразователя, в частности, порога чувствительности вторичного преобразователя, и прогиба центра мембраны как функции координаты пикселя ЛФП.

2. Разработка алгоритмов работы микроконтроллера, реализующих обработку сигналов с выхода ЛФП и обеспечивающих повышение точности измерений деформации мембран датчика давлений, использующего оптоэлектронные преобразователи.

3. Создание экспериментального стенда и проведение сравнительных исследований по определению величин прогибов мембраны, полученных аналитическим методом, с использованием программного комплекса ANSYS, и полученных в результате проведенных экспериментов.

4. Разработка методов и алгоритмов вычисления величины деформации УЧЭ при использовании процесса ветвления исходной информации, который осуществляется применением шторок с  $n$  щелями, позволяющим сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления.

5. Создание экспериментальной установки для исследования метрологических характеристик датчиков статического и полного давлений на основе упругих мембран и оптоэлектронных преобразователей.

6. Осуществление экспериментальной проверки и оценки метрологических характеристик датчиков давлений на основе оптоэлектронных преобразователей.

**Методы исследований.** При выполнении работы использовались логические и эмпирические методы математического исследования на основе наблюдения и опыта, сравнения, анализа и синтеза. Синтезирующая математическая модель выполнена в интегрированной среде разработки

Microsoft Visual Studio на языке программирования C++. При решении упруго-пластичных задач использовался программный комплекс ANSYS Workbench. Разработка и отладка программного обеспечения микропроцессорной техники аппаратно-программного комплекса выполнена в среде разработки Keil uVision на языке программирования «Си». Автоматизация, визуализация и статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась на базе разработанного программного обеспечения на графическом языке программирования «G» в среде LabVIEW.

#### **Научная новизна диссертационной работы:**

1. Впервые получены и обоснованы рекомендации для построения конструктивных схем датчиков давлений на базе оптоэлектронных преобразователей, которые отличаются наличием высокочувствительного вторичного преобразователя и упругой мембраны с минимизированной деформацией, а также устройства управления деформациями, основанного на законах магнитного притяжения, обеспечивающих повышение точности измерения аэрометрических параметров.

2. Впервые разработаны математические модели взаимосвязей порога чувствительности вторичного преобразователя с процедурами обработки информационных данных, получаемых при деформации УЧЭ, вызванных изменением статического и полного давлений и отличающиеся тем, что в них учитывается шаг дискретизации вторичного преобразователя.

3. Предложены алгоритмы работы микроконтроллера, которые обеспечивают, при измерении линейных перемещений жестких центров мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на него одного светового пятна, отличающиеся тем, что при опросе ЛФП, аналого-цифровой преобразователь совершает двойное преобразование, что обеспечивает более высокую точность измерения перемещения жесткого центра мембраны.

4. Предложены алгоритмы работы микроконтроллера, которые обеспечивают обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на нее двух оптических пятен, причем процесс математической обработки полученных данных выполняется до завершения полного цикла опроса, что обеспечивает более высокую точность измерений перемещения жесткого центра мембраны, а также повышение быстродействия измерительной системы.

5. Предложены метод и алгоритм обработки исходной информации, которые осуществляются применением шторок с  $n$  щелями и дают возможность сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления, что позволяет за один период опроса линейки получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усредняя результат, повысить точность измерения, а также свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов, в частности, вибраций.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработанная методика математического моделирования статической характеристики УЧЭ, учитывающая функциональные возможности вторичного преобразователя и закономерность изменения статического и полного давлений,

может быть использована при оценке точностных характеристик датчиков давлений на этапах предварительного проектирования УЧЭ.

2. Разработанные алгоритмы работы микроконтроллера, обеспечивают обработку выходных сигналов ЛФП при измерении линейных перемещений жесткого центра УЧЭ и могут быть использованы при разработке аналогичных измерительных систем линейных перемещений.

3. Разработанные новые высокоточные датчики статического и полного давлений, использующие оптоэлектронные преобразователи информации на основе ЛФП в качестве вторичных преобразователей, имеют цифровой выход и подключаются к вычислительному устройству СВС без дополнительных преобразователей.

4. Разработанные метод и алгоритм использования процесса ветвления исходной информации, позволяют за один период опроса линейки получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения, а также свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов, в частности, вибраций.

5. На основе проведенных исследований разработаны, обладающие высокими метрологическими характеристиками, опытные образцы датчиков статического и полного давлений, использующие в качестве первичных преобразователей упругие мембраны и ЛФП – в качестве вторичного преобразователя информации.

6. Предложенные в работе способы управления восприятием статического и полного давлений, которые позволяют повысить точность измерений за счет использования высокочувствительного вторичного преобразователя, а также изменения жесткости упругого элемента или вариации сил магнитного притяжения, могут быть использованы в широком спектре датчиков давлений.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Полученные результаты использованы при выполнении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) ООО «МИП «МЭлКон» (г. Ульяновск). Так, полученные в процессе подготовки кандидатской диссертации результаты, были использованы при разработке приспособления для автоматических выключателей ВА50-41, А3790 и ВА50-43 регулировки и контроля провалов между подвижными и малоподвижными контактами (договор №75 от 5 февраля 2018 г.). Научные и практические результаты исследований использовались в ООО «СТЦ» (г. Санкт-Петербург, № 113/08/01ЛИК от 16.08.2021 г.) при разработке методик и программ летных испытаний беспилотных воздушных судов, в частности, позволили осуществить предварительную оценку характеристик точности СВС.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов диссертации определяется корректностью постановки задач, корректным применением математических методов цифровой обработки сигналов, соответствующих известным фундаментальным теоретическим представлениям, соответствием полученных теоретических результатов результатам натурных экспериментов, проведенных на созданном автором

экспериментальном стенде, а также повторяемостью результатов при многократных измерениях.

Результаты диссертации доложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на следующих конференциях: V Международная научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» (г. Воронеж, 2017 г.), XXXII Научно-практическая конференция «Потенциал современной науки» (г. Липецк, 2017 г.), VI Международная научно-практическая конференция «Академические Жуковские чтения» (г. Воронеж, 2018 г.), 22-ой Международная конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2020» (г. Москва, 2020) и VII Международном форуме «Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2021»(г. Ижевск, 2021).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика моделирования и расчета статической характеристики УЧЭ датчиков давлений, в которой учитывается шаг дискретизации вторичного преобразователя и закономерность изменения измеряемых давлений, обеспечивает получение, при минимально необходимой деформации упругого элемента, заданной чувствительности.

2. Конструктивные схемы датчиков давлений, полученные путем интеграции оптоэлектронного вторичного измерительного преобразователя, упругих мембран, и устройств управления деформациями, основанных на законах магнитного притяжения, а также оптического отражения, обеспечивающих улучшение метрологических характеристик.

3. Алгоритм работы микроконтроллера, позволяющий, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембраны при воздействии на ЛФП одного светового пятна, в процессе опроса ЛФП совершать аналого-цифровому преобразователю двойное преобразование, что обеспечивает более высокую точность измерений перемещения жесткого центра мембраны.

4. Алгоритм работы микроконтроллера, который, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран обеспечивает обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на нее двух световых пятен, при этом процесс математической обработки полученных данных выполняется до завершения полного цикла опроса, что обеспечивает повышение точности измерений перемещения жесткого центра мембраны, а также быстродействия измерительной системы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК, 5 патентов на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и пяти приложений. Общий объем работы 186 страниц, 109 рисунков, 33 таблицы и 112 наименований литературы.

**Личный вклад автора.** Теоретические и экспериментальные исследования, включая апробацию разработанных способов и алгоритмов, проведены автором лично. Обсуждение и интерпретация экспериментальных

результатов проводились совместно с соавторами, где вклад автора диссертации работы был определяющим.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и аргументирована новизна научных исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** диссертации выполнен критический анализ первичных и вторичных измерительных преобразователей давлений системы управления высотно-скоростными параметрами движения воздушного судна.

Датчики давлений, входящие в состав СВС, конструктивно представляют собой совокупность первичных и вторичных измерительных преобразователей и являются источниками информации о статическом и полном давлениях. Это предопределяет существенную зависимость метрологических характеристик СВС от точности измерения указанных давлений (при воздействии дестабилизирующих факторов и от сохранения заданной точности во времени). Анализ известных конструкций аэрометрических датчиков давлений, в частности, распространенных УЧЭ различных типов, форм и материалов для их изготовления, а также используемых вторичных преобразователей, позволил выявить ряд факторов, которые накладывают ограничения на точность измерения давлений. Отметим неустранимую нестабильность градуировочной характеристики, высокие гистерезисные эффекты под влиянием давлений и температуры, низкую устойчивость при воздействии ударных нагрузок и вибраций.

Широкое распространение в современной авиации получили частотные датчики измерения полного и статического давлений, у которых собственная частота колебаний механического резонатора перестраивается в зависимости от значения измеряемого давления. Выявлены достоинства датчика: низкие (практически отсутствуют) гистерезисные эффекты, высокая стабильность характеристик, высокий предел рабочей температуры, высокая точность измерений, низкий порог чувствительности, основная погрешность составляет 0,01 % от измеряемого давления.

Показан, однако, ряд существенных недостатков частотных датчиков, среди которых отметим относительно большую потребляемую мощность, относительно большие массогабаритные параметры, влияние вибраций на точность измерений. Отметим также, что в цепи обратной связи используется относительно сложная схема автогенератора, обеспечивающая контроль температуры резонатора; скачкообразное изменение выходного сигнала по давлению при переходе через критические точки давления и погрешность, вызванную изменением температуры, которая составляет до 7% от рабочего диапазона давления.

Определено, что перечисленных недостатков практически не имеют датчики давлений, в которых деформация УЧЭ за счет пространственного распределения светового поля преобразуется в цифровой сигнал. Указанное

преобразование позволяет повысить точность и расширить диапазон измерения аэрометрических датчиков давлений. Разработанные оригинальные аэрометрические датчики давлений, использующие ЛФП, на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), высокая чувствительность которых требует минимальной деформации УЧЭ. Показано, что минимизация деформации позволяет избавиться от целого ряда методических погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств материала с течением времени и т.п. Бесконтактный съём информации и работа информационной системы в условиях вакуума значительно повысят эффективность процессов измерения. Отметим также значительное уменьшение энергопотребления и массогабаритных параметров.

**Во второй главе** представлена методика моделирования и расчета статических характеристик УЧЭ датчиков давлений, которая учитывает шаг дискретизации вторичного преобразователя и закономерность изменения измеряемых давлений, обеспечивающая получение, при минимально необходимой деформации УЧЭ, заданной чувствительности.

Приводится обоснование выбора методики статического расчета гофрированных мембран. За базу взята методика приближенного статического расчета мембран с гофрировкой произвольной формы, предложенная Л.Е. Андреевой. Основное расчетное выражение:

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = \eta a \frac{\omega_0}{h} + \xi b \frac{\omega_0^3}{h^3}, \quad (1)$$

где,  $p$  – давление при заданном прогибе центра мембраны,  $R$  – радиус мембраны,  $\omega_0$  – прогиб центра мембраны,  $E$  – модуль упругости первого рода,  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от формы профиля мембраны и природы материала,  $\eta$  и  $\xi$  – коэффициенты, зависящие от формы профиля и радиуса жёсткого центра.

Представляемая методика расчета статических характеристик УЧЭ выполнена с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, в частности, задается порог чувствительности вторичного преобразователя  $S$  в мм, а прогиб центра мембраны представлен, как:

$$\omega_{0i} = Si, \quad (2)$$

где  $i$  – шаг измерения т.е. целочисленные значения от 1 до  $i_{\max} \approx \omega_{0\max} / S$ .

Преобразуя выражение (1) и (2), получаем:

$$P_i = \left( \eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4}, \quad (3)$$

где  $P_i$  – измеренное давление на  $i$  – шаге измерения.

Значение высоты  $H$ , при заданном значении статического давления  $P$ , определяется по формуле:

$$H = \left( 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\tau R} \right) \frac{T_0}{\tau}, \quad (4)$$

где  $P_0$  - давление на опорной высоте,  $T_0$  - температура на опорной высоте,  $\tau$  - температурный градиент,  $R$  - газовая постоянная,  $H$  – высота при текущем давлении  $P$ .

Преобразовав выражения (3) и (4), получаем:

$$H_i = \left( 1 - \left( \left( \left( \eta a \frac{S_i}{h} + \xi b \frac{(S_i)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4} \right) / P_0 \right)^{\tau R} \right) \frac{T_0}{\tau}, \quad (5)$$

где  $H_i$  – измеренное значение высоты на  $i$ -м шаге измерения.

Для оценки погрешности измерения датчика давления вводится понятие дискретность измерения  $D_{Hi}$  на  $i$ -м шаге измерения:

$$D_{Hi} = H_{i+1} - H_i. \quad (6)$$

Именно этот параметр в дальнейшем используется как опорный параметр для оценки погрешности измерения датчика давлений. Так как, в разработанных датчиках в качестве опорного давления используется вакуум, то УЧЭ имеет начальное нагруженное состояние, т.е. мембрана прогнута на величину  $\omega_{0cm}$  под действием статического давления  $P$ .

Известно, что:

$$P^* = P + \frac{\rho c^2}{2}, \quad (7)$$

где  $P^*$  – полное давление,  $P$  – статическое давление,  $\rho$  – плотность воздуха.

Тогда, преобразовав (3) и (7), получили:

$$c_i = \sqrt{2 \left( \left( \left( \eta a \frac{(\omega_{0cm} + S_i)}{h} + \xi b \frac{(\omega_{0cm} + S_i)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4} - P \right) \right) / \rho}, \quad (8)$$

и

$$P_{дин i} = \frac{\rho c_i^2}{2}, \quad (9)$$

где  $P_{дин i}$  – динамическое давление при скорости  $c_i$ .

$$P_i^* = P + \frac{\rho c_i^2}{2}, \quad (10)$$

где  $P_i^*$  – полное давление при скорости  $c_i$ .

Дискретность измерений  $Dc_i$  при скорости  $c_i$ :

$$D_{ci} = c_{i+1} - c_i. \quad (11)$$

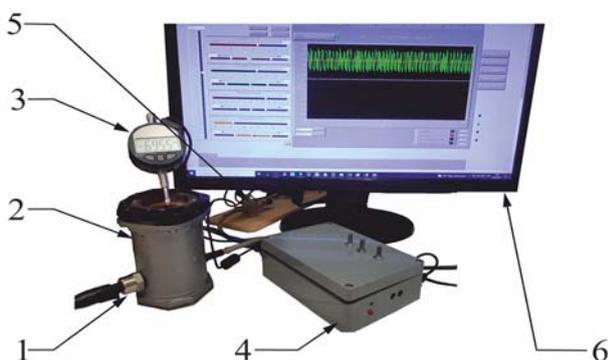
Предлагаемый алгоритм дает возможность проводить расчет основных конструктивных параметров УЧЭ практически во всем диапазоне их типоразмеров и с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, при различных значениях и закономерностях изменения измеряемой физической величины.

Крайне важным этапом в проектировании УЧЭ является расчет максимального напряжения  $\sigma_{max}$  при максимальной рабочей нагрузке и коэффициент запаса прочности  $k$ . Именно эти показатели отражают способность УЧЭ сохранять свою работоспособность во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок.

В работе представлен алгоритм решения задач упруго-пластичных деформаций методом конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS.

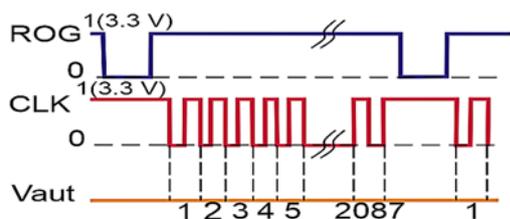
На основе полученной математической модели разработан алгоритм и программа для ЭВМ на языке программирования C++, обеспечивающая расчет УЧЭ.

Предложенная методика позволяет производить моделирование и расчет статической характеристики УЧЭ датчиков давлений, в которой учитывается шаг дискретизации вторичного преобразователя и закономерность изменения измеряемых давлений, обеспечивающая получение при минимально необходимой деформации УЧЭ заданной чувствительности.



**Рис. 1.** Фото АПК:

- 1 – пьезоэлектрический датчик давления,
- 2 – датчик давления на основе ЛФП,
- 3 – микрометр, 4 – блок управления и обработки данных, 5 – пневматическая система, 6 – монитор (графический интерфейс пользователя).



**Рис.2.** Схема управления ЛФП типа ILX544B.

обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на него одного светового пятна.

Определено, что каждому импульсу CLK соответствует поступление на выход ILX544B сигнала с одного пикселя(рис.2).

Таким образом, получаем, что для опроса пикселей ЛФП необходимо, чтобы между двумя импульсами ROG было не менее 2087 импульсов CLK с учетом рабочих и технических пикселей. Частота следования импульсов ROG определяет быстродействие измерительной системы, использующей ЛФП,

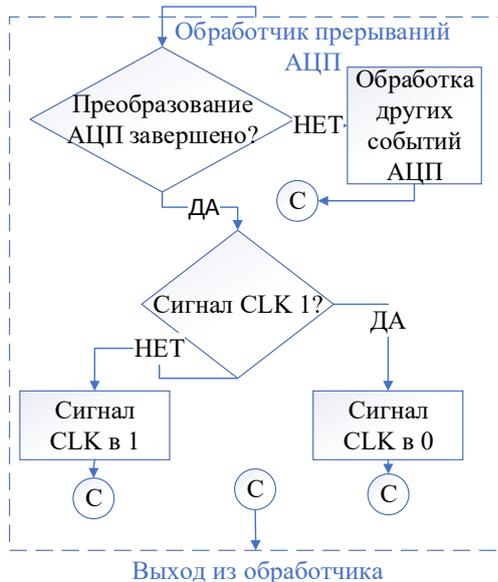
**Третья глава** посвящена разработке методов и средств, для проведения исследований метрологических характеристик датчиков давлений. С этой целью разработаны аппаратно-программный комплекс (АПК), а также алгоритмы управления и обработки получаемой информации.

Использовалась экспериментальная конструкция датчика давлений на основе оптоэлектронного преобразователя информации на базе ЛФП типа ILX554B.

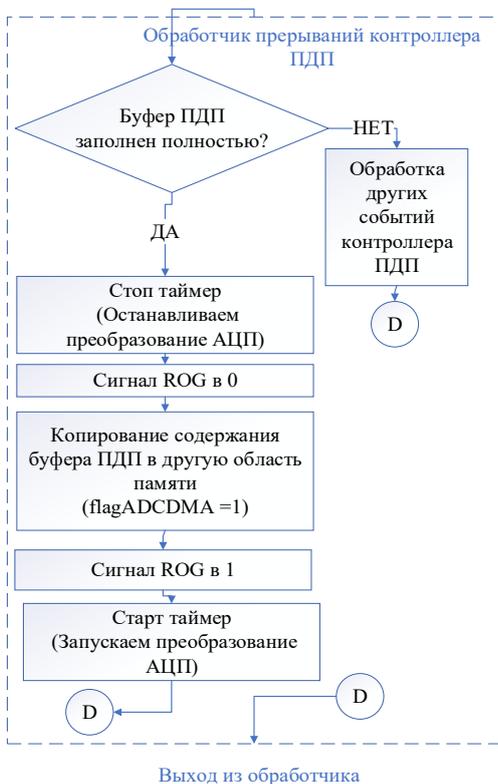
На рис.1 представлено фото рабочего места пользователя АПК.

В результате воздействия световых пятен на поверхность ЛФП, на его выходе происходит изменение амплитуды напряжения во времени.

Предложен алгоритм и разработана программа управления микроконтроллером, которые обеспечивают, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран,



**Рис. 3.** Блок-схемы алгоритма обработки прерывания АЦП.



**Рис. 4.** Блок-схемы алгоритма обработки прерывания

следовательно, частота обновления информации на ее выходе определяется вышеприведенным условием.

Особенностью предлагаемого алгоритма является методика формирования синхроимпульсов CLK, формируемых в прерывании аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (рис.3), а для импульсов сброса ROG - в прерывании контроллера прямого доступа к памяти (ПДП) (рис.4).

Очередное преобразование АЦП начинается по триггеру от таймера, при этом оцифрованные значения сохраняются в массиве данных, с использованием контроллера ПДП.

Предложен алгоритм работы программы микроконтроллера, который обеспечивает, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на него двух оптических пятен. Отличием данного алгоритма является использование прерываний контроллера ПДП по заполнению половины буфера. Подобное решение позволило производить математическую обработку сигнала до завершения полного цикла опроса ЛФП и повысить быстродействие измерительной системы.

Предложен способ математической обработки значений координаты светового пятна с использованием центроид метода, обеспечивающего вычисление координаты «центра тяжести» изображения светового пятна.

Алгоритм, реализующий данные вычисления, организован следующим образом. Вначале определяются номера  $n$

пикселей  $N_{max\_n}$ , амплитуда сигнала с которых соответствует локальным максимумам в пределах каждого из  $n$  световых пятен на фоточувствительной поверхности ЛФП. Затем выделяется область из  $M/2$  пикселей до и  $M/2$  пикселей после максимума. И для данной области осуществляется вычисление координаты максимума сигнала, выраженное в номере пикселя, по формуле:

$$MAX_n = \left( \sum_{i=Nmax_n-\frac{M}{2}}^{Nmax_n+\frac{M}{2}} (A_i \times i) \right) / \left( \sum_{i=Nmax_n-\frac{M}{2}}^{Nmax_n+\frac{M}{2}} (A_i) \right), \quad (12)$$

где  $MAX_n$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на оптической линейке,  $A_i$  – амплитуда сигнала с  $i$ -го пикселя в окрестностях  $n$ -го пятна,  $N_{max\_n}$  – номер пикселя, амплитуда которого в пределах  $n$ -го пятна максимальна. Количество пикселей  $M/2$  выбирается таким образом, чтобы охватить все пиксели вокруг локального максимума, амплитуда сигнала которых заметно превышает начальный (темновой) уровень.

Вычисление по формуле (12) новых значений координат световых пятен позволяет определить изменение давления по величине смещения мембраны относительно исходного значения:

$$\Delta P_n(t) = k_n \times (MAX_n(t) - MAX_n(0)), \quad (13)$$

где  $\Delta P_n(t)$  – текущее значение изменения давления, соответствующее смещению  $n$ -го пятна,  $MAX_n(t)$  – координата максимума  $n$ -го светового пятна на оптической линейке в текущий момент времени  $t$ ,  $MAX_n(0)$  – исходное значение координаты  $n$ -го светового пятна,  $k_n$  – калибровочный коэффициент, связывающий координаты  $n$ -го пятна, выраженное в пикселях, с изменением статического давления.

Для повышения точности измерения смещения мембраны предлагается усреднять результаты измерения изменения давления, полученные для всех  $n$  пятен:

$$\Delta P(t) = \frac{\sum_n P_{cm_n}(t)}{n}. \quad (14)$$

Предложена также методика математической обработки сигнала, отличающаяся тем что, выполняется определение координат оптического пятна по заданному значению амплитуды сигнала. Алгоритм, реализующий данные вычисления, организован следующим образом. Вначале определяется номер пикселя  $N1\_n$ , амплитуда сигнала которого близка к заданному значению по фронту сигнала и, аналогично, номер пикселя  $N2\_n$  на спаде сигнала. Данные вычисления производятся для всех  $n$  световых пятен. Центральный пиксель светового пятна определяется:

$$N_{aver} = (N1\_n + N2\_n) / 2, \quad (15)$$

Затем выделяется область из  $M/2$  пикселей до и  $M/2$  пикселей после  $N_{aver}$ . Преобразовав выражение (11) получили:

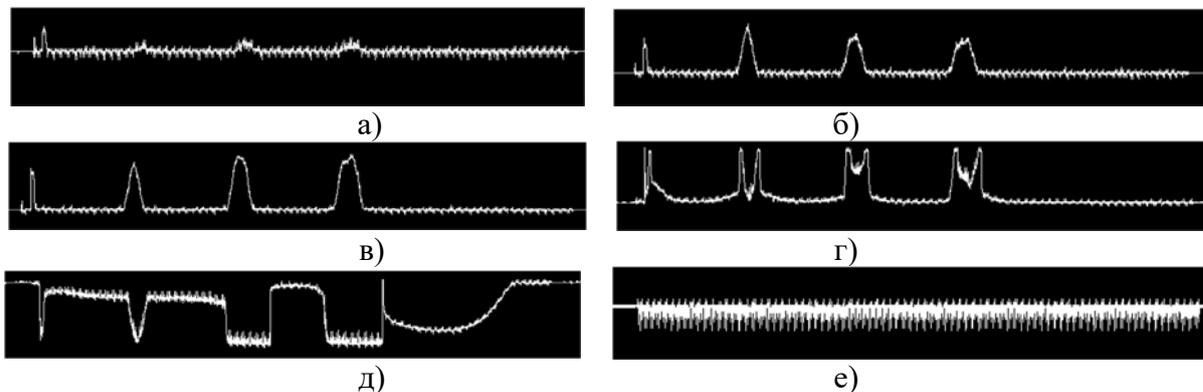
$$MAX_n = \left( \sum_{i=Naver\_n-\frac{M}{2}}^{Naver\_n+\frac{M}{2}} (A_i \times i) \right) / \left( \sum_{i=Naver\_n-\frac{M}{2}}^{Naver\_n+\frac{M}{2}} (A_i) \right), \quad (16)$$

где  $N_{aver}$   $n$  – номер центрального пикселя  $n$ -го светового пятна.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований по оценке характеристик точности датчиков на основе УЧЭ и ЛФП, а также влияние внутренних и граничных условий на точность измерений [2].

1. Установлено влияние характеристик источника оптического излучения на форму выходного сигнала (рис. 5) ЛФП, в частности, интенсивности светового потока при различных значениях потребляемого тока  $I$ .

Подобное явление называется «блюмингом». Для каждой модели фотоэлектронных приемников и источников оптического излучения значения

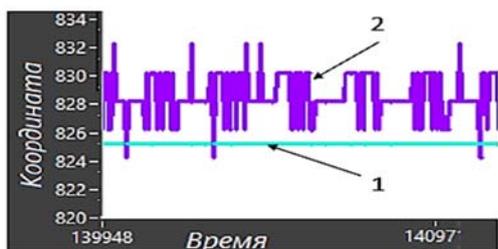


**Рис. 5.** Влияние потребляемого тока на форму выходного сигнала:

а –  $I = 0,04$  мА, б –  $I = 0,08$  мА, в –  $I = 0,10$  мА, г –  $I = 0,13$  мА, д –  $I = 0,16$  мА, е –  $I = 0,17$

интенсивности светового потока, при которых возникает подобный эффект различны, поэтому при разработке необходимо обеспечить допустимый его предел.

2. Установлено влияние режима работы ЛФП на форму выходного сигнала, в частности, использование электронного затвора способствует увеличению шумов (рис.6) проявляющиеся как низкочастотные колебания напряжения что, в значительной степени усложняет процесс измерений.

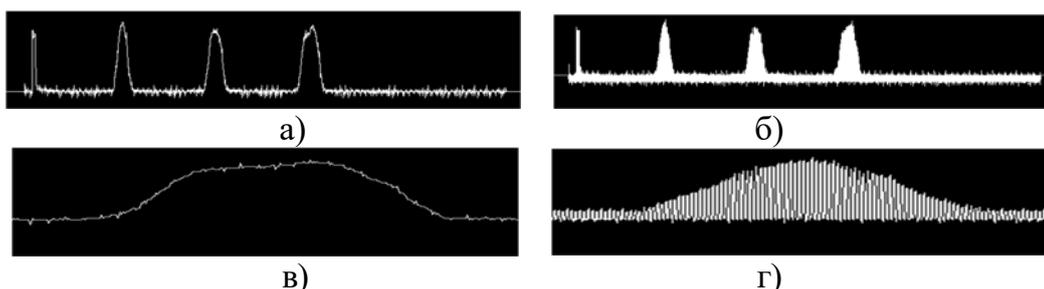


**Рис. 7.** Определение локального максимума светового пятна и центра оптического пятна:

1 – центр оптического пятна,  
2 – локальный минимум

3. Установлено влияние методик, представленных в главе 3, вычисления  $MAX_n$  (12) и (16). На рис. 7 представлен результат определения локального максимума  $N_{max\_n}$ , и центра оптического пятна  $N_{aver\_n}$ . Из рисунка видно что, центр оптического пятна 1 более стабилен чем локальный максимум 2, что обеспечивает более точное определение  $MAX_n$ .

4. Установлены метрологические характеристики датчиков. В качестве



**Рис. 6.** – Влияние режима работы ЛФП на форму выходного сигнала:

а – без электронного затвора, б – с электронным затвором, в – геометрическая форма оптического пятна без электронного затвора, г – геометрическая форма оптического пятна с электронным затвором

критериального параметра для оценки характеристик точности разрабатываемых датчиков давлений определена точность измерения положения геометрического центра УЧЭ –  $\omega_0$ . Выбор обусловлен тем, что данный параметр не зависит ни от

геометрических размеров ни формы УЧЭ, но в свою очередь, позволял оценивать точность любого датчика давлений в целом с использованием методики, предложенной во второй главе.

В таблице 1 представлены результаты статистического анализа

Таблица № 1 – Результаты определения положения геометрического центра УЧЭ

Наименование	Значение									
	Частота измерений, Гц	400	200		100		66		50	
Кратность усреднения	без	без		2		3		4		
Количество оптических пятен	1* и 2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Абсолютная погрешность $\pm \Delta \omega_0$ , мкм	1,057	0,633	0,278	0,337	0,155	0,327	0,137	0,238	0,100	
Среднеквадратическое отклонение $\omega_0$ , мкм	0,42	0,21	0,071	0,100	0,0495	0,099	0,045	0,082	0,034	

\*результаты измерения от первого оптического пятна вычисляется до завершения полного цикла опроса экспериментальных данных полученных при измерении  $\omega_0$ .

Максимальное быстродействие достигается при использовании двух оптических пятен, при этом результат измерения от первого оптического пятна получен до окончания опроса ЛФП, подобное достигается благодаря алгоритму и программе, описанных в главе 3. Повышение точности измерений достигается как за счет усреднения результатов измерений, так и за счет использования двух оптических пятен. Приведенная погрешность измерения положения геометрического центра при частоте измерений 50 Гц составляет не более 0,008% к максимальному прогибу УЧЭ.

Результаты эксперимента с использованием УЧЭ радиусом 25 мм, толщиной 0,22 мм, глубиной гофры 0,75 мм, радиусом жесткого центра 5 мм, пильчатого профиля с 3 гофрами из бериллиевой бронзы БрБ2 с использованием двух оптических пятен и четырехкратным усреднением выборок, по определению точности измерения давления  $P$  и эквивалентной высоты  $H$ , представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения давления и эквивалентной высоты.

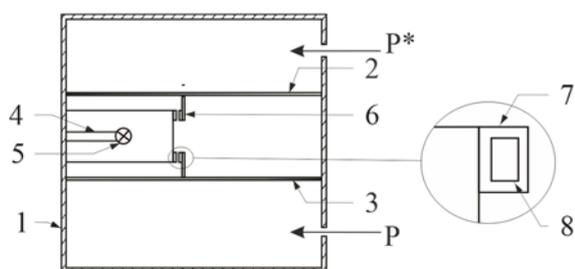
		Параметр	Значение							
		Значение $H$ , м	-500	0	500	1000	3000	6000	12000	15000
Для высоты $H$	Абсолютная погрешность $\pm \Delta H$ , м	0,97	0,98	1,00	1,01	1,08	1,22	2,11	3,27	7,38
	Среднеквадратическое отклонение $S_H$ , м	0,379	0,367	0,37	0,366	0,397	0,449	0,789	1,156	2,59
	Значение $P$ , Па	107438	101325	95496	89941	70269	47404	19481	11713	4411
Для давления $P$	Абсолютная погрешность $\pm \Delta P$ , Па	13,14	12,49	11,98	11,64	10,02	7,99	6,486	6,28	6,32
	Среднеквадратическое отклонение $S_P$ , Па	5,08	4,82	4,37	4,14	3,65	2,90	2,355	2,26	2,52
	Прогиб мембраны $\omega_0$ , мм	1,260	1,215	1,165	1,115	0,92	0,66	0,268	0,15	0,05

Сравнительная оценка результатов экспериментальных данных с метрологическими характеристиками датчиков давлений типа ДДГ входящих в состав серийно выпускаемы СВС (СВС-2Ц-У2, СВС-96):

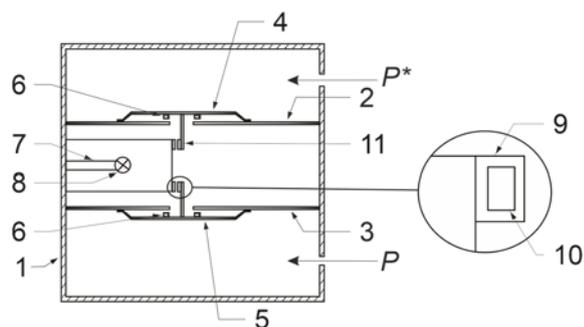
- уменьшение на 19 % интервала передачи информации, до 0,25 с. против 0,31 с,
- снижение питающего напряжения на 78 %, до 3,3 В против 15 В,
- снижение потребляемой мощности на 72 %, до 280,708 мВт против 1000 мВт,
- уменьшение погрешности измерения на 59 %, до 13,14 Па против 32 Па,
- уменьшение времени готовности на 96%, до 1 с. против 30 с,
- снижение массы датчика на 46,75%, до 213 гр. против 400 гр.

**Пятая глава** посвящена разработке и совершенствованию датчиков статического и полного давлений на базе УЧЭ и ЛФП в направлении получения оптимального сочетания метрологических, конструктивных, технологических характеристик с максимальной устойчивостью к воздействию возмущающих факторов.

Первая конструкция датчика аэрометрических давлений использующего оптоэлектронные преобразователи информации приведена на рис. 8.



**Рис. 8.** Датчик давления, использующий оптический метод преобразования информации: 1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 – стойка, 5 – источник излучения, 6 – ЛФП, 7 – шторка, 8 – прорези.



**Рис. 9.** Датчик давлений: 1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны второй ступени, 4, 5 мембраны первой ступени, 6 – кольцевые упоры, 7 – стойка, 8 – источник излучения, 9 –шторка, 10 – прорезь, 11 – ЛФП.

т.п. Бесконтактный съем информации и работа информационной системы в

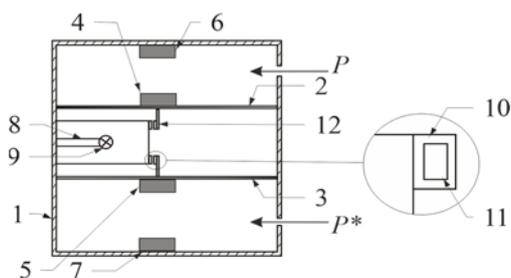
Датчик содержит корпус 1 с двумя отверстиями, соответственно для измерения статического (P) и полного (P\*) давлений, причем отверстия расположены выше и ниже зазора, образованного мембранами 2 и 3. Мембраны 2 и 3 анероидного чувствительного элемента разнесены по высоте, образуя зазор, из которого выкачан воздух, и герметично по периметру прикреплены к корпусу. Внутри безвоздушного зазора к стойке 4 прикреплен источник излучения 5 и две шторки 7 с прорезями 8. Две ЛФП 6 крепятся соответственно к верхней и нижней мембранам 2 и 3, причем указанные ЛФП обращены к соответствующим прорезям шторок 7.

Высокая чувствительность ЛФП требует минимальной деформации УЧЭ, что позволит избавиться от целого ряда погрешностей: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств материала с течением времени и

условиях вакуума значительно повысят эффективность процессов измерения. Отметим также значительное уменьшение энергопотребления.

Вторая конструкция датчика аэрометрических давлений (рис. 9) отличается наличием отверстий в геометрических центрах верхней и нижней основных мембран, которые с внешних сторон мембран по отношению к зазору перекрыты дополнительными верхней и нижней мембранами.

Предлагаемый датчик, обладая всеми достоинствами прототипа, позволяет значительно повысить точность измерения нелинейно изменяющегося давления (статического и полного), а также чувствительность датчиков давления на первоначальном этапе измерения.



**Рис. 10.** Датчик давлений:

- 1 – корпус с двумя отверстиями,
- 2 и 3 – мембраны, 4 и 5 – ферромагниты, 6 и 7 – магниты,
- 8 – стойка, 9 – источник излучения,
- 10 – шторка, 11 – прорезь,
- 12 – ЛФП.

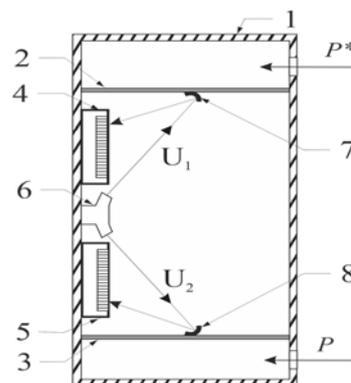
Третья конструкция датчика аэрометрических давлений отличается установкой в геометрических центрах верхней и нижней мембран ферромагнитных элементов, а на внутренней поверхности корпуса соосно и с зазором по отношению к введенным ферромагнитным элементам установкой постоянных магнитов (рис. 10). Введение в конструкцию корпуса датчика аэрометрических давлений постоянных магнитов, взаимодействующих с ферромагнитными элементами, позволит линейаризовать зависимость деформаций мембран от воспринимаемых давлений. В

результате происходит повышение чувствительности и точности измерения давления и по высоте, и по скорости полета воздушного судна, а также расширяются функциональные возможности УЧЭ.

Четвертая конструкция (рис. 11) датчика аэрометрических давлений отличается введением устройства для формирования оптических лучей и установкой в геометрических центрах верхней и нижней мембран криволинейных отражателей оптических излучений.

Предлагаемый датчик работоспособен при существенно меньших, чем у прототипов, значениях деформации УЧЭ вследствие применения криволинейного отражателя света.

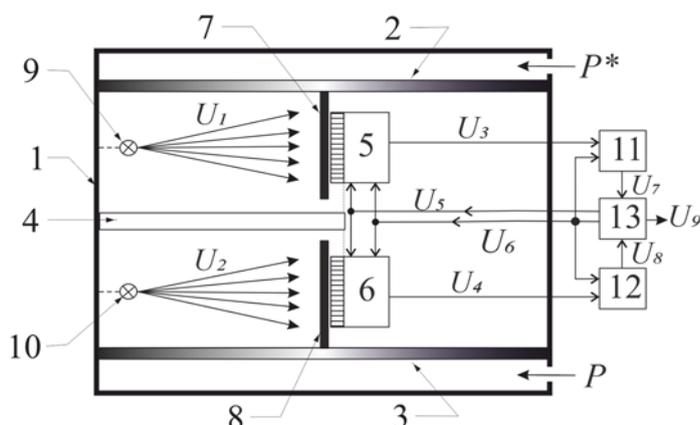
Это позволит избавиться от целого ряда погрешностей УЧЭ: остаточной деформации, нелинейности, упругих несовершенств материала, температурных колебаний, от воздействия линейных ускорений, от воздействия вибраций, от изменения свойств материала с течением времени и т.п.



**Рис. 11.** Датчик давлений:

- 1 – корпус с двумя отверстиями,
- 2 и 3 – мембраны, 4, 5 – ЛФП,
- 6 – устройство для формирования оптических лучей,
- 7, 8 – отражатели оптических излучений.

Пятая конструкция датчика аэрометрических давлений предусматривает ветвление исходной информации за счет использования  $n$  оптических пятен (рис. 12), обладающий следующими достоинствами:



**Рис. 12.** Датчик давления:

1 – корпус с двумя отверстиями, 2 и 3 – мембраны, 4 – стойка, 5 и 6 – ЛФП, 7 и 8 – шторы с прорезями (щелями), 9 и 10 – источники излучения, 11 и 12 – аналогово-цифровой преобразователь, 13 – микроконтроллер.

1) применение шторок с  $n$  щелями позволяет сформировать на ЛФП  $n$  световых пятен, перемещающихся пропорционально изменению измеряемого давления. Благодаря этому за один период опроса оптической линейки удается получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения;

2) отсутствие на шторках дополнительных элементов (излучателей и ЛФП), улучшает

динамические свойства датчика;

3) внешние механические воздействия на датчик могут привести к смещениям ЛФП относительно шторок.

В связи с тем, что ЛФП крепятся на общей стойке, подобные смещения будут приводить к синфазным изменениям в измеренных значениях статического и полного давления. Синхронный режим работы ЛФП позволяет обнаружить подобные синфазные составляющие в выходных сигналах и программно минимизировать их влияние на точность измерения давлений.

Комплексное использование конструктивных и схемотехнических решений, определение параметров УЧЭ с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, ветвление исходной информации, а также новые алгоритмы ее преобразования, позволили разработать измерительные преобразователи с цифровым выходным сигналом и с уменьшенной погрешностью в широком диапазоне температур, способные измерять как статическое, так и полное давления.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате решения поставленных задач диссертационного исследования достигнута цель работы. В ходе исследований:

1. Разработан высокоточный датчик статического и полного давлений, использующий оптоэлектронные преобразователи информации на основе ЛФП в качестве вторичных преобразователей, что позволило минимизировать амплитуду деформаций УЧЭ, а бесконтактный способ съема информации и

работа информационной системы в условиях вакуума позволили повысить стабильность процедур измерения давлений.

2. Разработана методика расчета УЧЭ, принципиальным отличием которой является учет технических характеристик вторичного преобразователя, в частности, порога чувствительности вторичного преобразователя и прогиба центра мембраны в функции координаты пикселя ЛФП. Кроме того, разработан алгоритм и программа на языке программирования C/C++, реализующие алгоритм расчета УЧЭ.

3. Для измерения значений деформаций УЧЭ (мембран) датчика давлений была разработана программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4. Использование данной программы позволило существенно повысить точность вычислений деформации мембран датчика давлений, использующих оптоэлектронные преобразователи, за счет того, что при опросе одного пикселя ЛФП аналого-цифровой преобразователь совершает двойное преобразование.

4. Сравнительные результаты определения значений прогибов центров мембран, полученных аналитическим методом, с использованием программного комплекса ANSYS, и полученных в результате проведенных экспериментов показали, что максимальная погрешность не превышает 15%, что следует признать удовлетворительным. Сравнительная погрешность результатов силового расчета с использованием программного комплекса ANSYS и известными экспериментальными данными не превысила 9 %.

5. Разработана методика вычисления положения жесткого центра упругой мембраны, использующая процесс ветвления исходной информации путем применения шторок с  $n$  щелями, что позволяет сформировать на ЛФП  $n$  оптических пятен, перемещающихся в функции измеряемого давления. Благодаря этому, за один период опроса линейки удастся получить  $n$  независимых значений измеряемого давления и, усреднив результат, повысить точность измерения, а также свести к минимуму влияние внешних возмущающих факторов, в частности, вибраций.

6. Разработан аппаратно-программный комплекс, включающий алгоритмы управления и обработки данными и экспериментальную конструкцию датчика давлений, использующего оптоэлектронные преобразователи информации на базе ЛФП типа ILX554B. Предложены алгоритмы и разработаны программы управления микроконтроллером, которые обеспечивают, при измерении линейных перемещений жесткого центра мембран, обработку сигналов с выхода ЛФП при воздействии на него одного и двух оптических пятен.

7. Определены метрологические характеристики датчиков давлений, причем в качестве критериального параметра для оценки точностных характеристик разработанных датчиков давлений использована точность измерения положения геометрического центра УЧЭ. Установлено, что повышение точности измерений достигается как за счет усреднения результатов измерений, так и за счет использования двух оптических пятен. Приведенная погрешность измерения положения геометрического центра при частоте измерений 50 Гц составляет не более 0,008% по отношению к максимальному прогибу УЧЭ.

8. Разработана гамма новых датчиков статического и полного давлений с цифровым выходным сигналом и с уменьшенной погрешностью в широком диапазоне измеряемых давлений, на базе комплексного использования конструктивных и схемотехнических решений определения параметров УЧЭ с учетом технических характеристик вторичного преобразователя, ветвления исходной информации, а также новых алгоритмов ее преобразования.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:**

1. Борисов, Р.А. Методология разработки датчика статического и полного давлений на базе упругих чувствительных элементов и оптических линеек / Р. А. Борисов, И. В. Антонец, А. В. Кротов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2021. – № 1 (134). – С. 33-50.

2. Борисов, Р. А. Система измерения статического и полного давлений, использующая ветвление исходной информации на входе вторичного преобразователя / Р. А. Борисов, И. В. Антонец, А. А. Черторийский, А. В. Кротов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, – № 9. – С. 813-822.

3. Антонец, И.В. Датчик статического и полного давления на основе линейки фотоэлектронных приемников / И. В. Антонец, Р. А. Борисов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, – № 3. – С. 222-227.

4. Антонец, И.В. Разработка весоизмерительных устройств, определяющих остаточную деформацию упругого чувствительного элемента/ И.В. Антонец В.А. Борсоев, Р.А. Борисов, С.М. Степанов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. –Т. 21, –№ 01. – С. 11-21.

5. Антонец, И.В. Разработка конструкций динамометрических датчиков, использующих силовую компенсацию деформации упругого чувствительного элемента от внешних нагрузок/ И.В. Антонец В.А. Борсоев, В.В. Борсоева, Р.А. Борисов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. –Т. 21, № 06. – С. 92-104.

6. Антонец, И.В. Методика аналитического расчета и обобщенный алгоритм определения величин деформации и чувствительности кольцевых упругих чувствительных элементов переменного сечения / И.В. Антонец В.А. Борсоев, В.В. Борсоева, Р.А. Борисов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – № 26. – С. 126-137.

### **Патенты и авторские свидетельства:**

7. Пат. 2653596 Российская Федерация, МПК G01L 7/00 (2006.01). Датчик аэрометрических давлений / Антонец И.В., Горшков Г.М., Борисов Р.А.; патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. (RU) – № 2017111362, заявл. 04.04.2017, опубл. 11.05.2018, Бюл. №14.

8. Пат. 2684683 Российская федерация, МПК G01L 7/08 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01). Датчик аэрометрических давлений / Антонец И.В., Борисов Р.А., Горшков Г.М., Черторийский А. А.; патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. (RU). – № 2017139645, заявл. 14.11.2017, опубл. 11.04.2019, Бюл. №11.

9. Пат. 2712777 Российская Федерация, МПК G01L 7/02 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01). Датчик аэрометрических давлений/ Антонец И.В., Борисов Р.А., Черторийский А. А.; патентообладатель ФГБУ науки Институт радиотехники и

электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (RU). – № 2019114581, заявл. 13.05.2019, опубл. 31.01.2020, бюл. № 4.

10. Пат. 2702808 Российская Федерация, МПК G01L 7/08 (2006.01), G01L 11/02 (2006.01) Датчик аэрометрических давлений/ Антонец И.В., Борисов Р.А., Горшков Г.М.; патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. (RU) – № 2018131388, заявл. 30.08.2018, опубл. 11.09.2019, Бил. № 29.

11. Пат. 2736736 Российская Федерация, G01L 11/02 (2006.01) Датчик аэрометрических давлений/ Антонец И.В., Борисов Р.А., Горшков Г.М., Шайхутдинов Б.Р. ; патентообладатель Ульяновский гос. тех. ун-т. (RU) – № 2019129417, заявл. 17.09.2019, опубл. 19.11.2020, бюл. № 32.

12. Свид. № 2019612079 Российская Федерация. Свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих оптические преобразователи / Борисов Р.А., Антонец И.В.; заявитель и патентообладатель Борисов Р.А. – № 2018660953; заявл. 03.10.2019; опубл. 11.02.2019.

13. Свид. № 2019663045 Российская Федерация. Свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для расчета упругих чувствительных элементов датчиков аэрометрических давлений / Борисов Р.А., Антонец И.В.; заявители и патентообладатели Борисов Р.А., Антонец И.В. – № 2019619234; заявл. 18.07.2019; опубл. 09.10.2019.

14. Свид. № 2021611914 Российская Федерация. Свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа управления микроконтроллерами семейства STM32F4, обеспечивающая измерение линейных перемещений чувствительных элементов датчиков, использующих линейки фотоэлектронных приемников/ Борисов Р.А., Антонец И.В.; заявитель и патентообладатель Борисов Р.А. – № 2021611007; заявл. 19.01.2021; опубл. 08.02.2021.

#### **Основные публикации в других изданиях:**

15. Борисов, Р.А. Исследование закономерности изменения давления, при проектировании упругих чувствительных элементов, для датчиков статического давления аэрометрических устройств / Р.А. Борисов // Сборник научных трудов издан по итогам XXXII-ой Международной научной конференции «Потенциал современной науки» (Российская Федерация, г. Липецк, 18 сентября 2017г.) – 2017. –С 42-48.

16. Борисов, Р.А. Метод определения величины прогиба упругого чувствительного элемента, измеряющего статическое давление / Р.А. Борисов, И.В. Антонец // История, современность, перспективы развития: сборник материалов II международной заочной научно-практической конференции БГАА. г. (Минск, 9–10 ноября 2017 г.) – 2017. –С. 120-122.

17. Антонец, И.В. Разработка и исследование датчика аэрометрических давлений на основе упругой мембраны и фотоприемной линейки/ И.В. Антонец, Р.А. Борисов // История, современность, перспективы развития: сборник

материалов II международной заочной научно-практической конференции БГАА. г. (Минск, 9–10 ноября 2017 г.) – 2017. – С. 118-119.

18. Борисов, Р.А. Актуализация методики статического расчета упругих чувствительных элементов аэрометрических устройств / Р.А. Борисов // «Проблемы и современные направления развития образования в области аэронавигации» Всероссийская педагогическая научная конференция – Сызрань: ВУНЦ ВВС «ВВА» – 2017. – С. 12-14.

19. Борисов, Р.А. Гистерезис упругих чувствительных элементов аэрометрических устройств / Борисов Р.А. // Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования: сб. науч. ст. по материалам V международной науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения» 22-23 ноября 2017 г. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА» – 2018. – С. 14-16.

20. Антонец, И.В. Определение характеристики упругого чувствительного элемента для аэрометрического датчика полного давления / И.В. Антонец, Р.А. Борисов // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сб. тезисов докладов. – М.: ИД Академии Жуковского – 2018. – С. 215.

21. Борисов, Р.А. Датчик аэрометрических давлений, использующий оптический метод преобразования информации / Р.А. Борисов, И.В. Антонец // Современное состояние, и перспективы развития авиационного радиоэлектронного оборудования: сб. науч. ст. по материалам VI международной науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения» 14-15 ноября 2018 г. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. – С. 50-52.

22. Борисов, Р.А. Алгоритм управления микроконтроллером Stm32f4, обеспечивающий измерение деформации чувствительных элементов аэрометрических датчиков давлений, использующих оптические преобразователи / Р.А. Борисов, И.В. Антонец // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации: сб. матер. III междунар. науч.-практ. конф. 22-23 мая 2019 г. – Минск : БГАА, 2019.– С. 123-125.

23. Борисов, Р.А. Аэрометрические датчики давления, использующие оптические вторичные преобразователи / Р.А. Борисов, И.В. Антонец // Авиация: история, современность, перспективы развития : сб. матер. IV междунар. науч.-практ. конф. 24 октября 2019 г. – Минск : БГАА, 2019.– С. 43-44.

24. Борисов, Р.А. Разработка и исследование новых методов и алгоритмов преобразования информации датчика статического и полного давлений на базе линеек фотоэлектронных элементов. /Р.А. Борисов, И.В. Антонец, А.В. Кротов, Э.Ю. Алексеев //22-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2020», Москва. – 2020. – С. 508-513.

25. Антонец, И.В. Оптоэлектронные датчики статического и полного давлений на базе упругих элементов и ПЗС-линеек / И.В. Антонец, Р.А. Борисов, А.А. Черторийский, Л.А. Нигматуллина, Н.В. Каштанов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : мат. 24-й Всероссийской молодеж. науч. конф. (г. Ульяновск, 26-28 октября 2021 г.), – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 215-217.

Борисов Руслан Андреевич

Датчики давлений на основе  
оптоэлектронных преобразователей для систем управления  
высотно-скоростными параметрами воздушного судна

Автореферат

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ .2022. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,17.

Тираж 130 экз. Заказ \_\_\_\_\_