

УТВЕРЖДАЮ



Ректор института

Н.Н. Африкантов

«Декабрь» 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени

Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

(полное официальное название организации в соответствии с уставом)

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

(название диссертации)

выполнена на кафедре «Авиационная техника» Ульяновского института
гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева

(наименование учебного или научного структурного подразделения)

В период подготовки диссертации соискатель Борисов Руслан Андреевич

(фамилия, имя, отчество – при наличии (полностью))

работал в филиале ФГКВБОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-

(полное официальное название организации в соответствии с уставом,

воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского

Наименование учебного или научного структурного подразделения, должность)

и Ю.А. Гагарина» МО РФ в г. Сызрани на кафедре конструкции и эксплуатации
вертолетов и двигателей в должности старшего преподавателя

В 2019 г. окончил аспирантуру ФГБОУ ВО «Ульяновский институт

гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

Направление подготовки 26.06.01 – Аэронавигация и эксплуатация
авиационной и ракетно-космической техники.

Квалификация Исследователь. Преподаватель-исследователь

Сдача кандидатских экзаменов Борисовым Р.А. подтверждается
соответствующими справками.

Научный руководитель

Антонец Иван Васильевич

(фамилия, имя, отчество – при наличии, основное место

ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени

работы, полное официальное название организации в соответствии с уставом, наименование структурного

Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»,

профессор кафедры «Авиационная техника»

подразделения, должность)

Актуальность темы диссертационного исследования. Система воздушных сигналов (СВС) предназначена для выдачи основной пилотажной информации на указатели контрольно-измерительных приборов в кабине воздушного судна (ВС) и на бортовые системы, при этом она объединила все датчики и указатели в единую

идеологию, исключив дублирование и несогласованность информации. СВС осуществляет вычисление высотно-скоростных параметров движения ВС, производя измерения во внешней среде. 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, обеспечивающую контроль температуры резонатора; скачкообразное изменение выходного сигнала по давлению при переходе через критические точки давления и погрешность, вызванную изменением температуры.

Датчики давления, основанные на оптическом методе преобразования 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.

Цель диссертационного исследования – разработка и исследование новых датчиков статического и полного давлений, использующих оптический метод преобразования информации 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 Keilu Vision 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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 опытно-конструкторской работы (НИОКР) ООО «МИП «МЭлКон». Так, полученные в процессе подготовки кандидатской диссертации результаты были использованы при разработке приспособления для автоматических выключателей ВА50-41, АЗ790 и ВА50-43 регулировки и контроля провалов между подвижными и малоподвижными контактами (договор №75 от 5 февраля 2018 г.). Результаты работы используются также при проведении экспериментальных исследований датчиков аэрометрических давлений, использующих оптический метод преобразования в филиале ВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Сызрани и в Ульяновском институте гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева.

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).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 6 статей в журналах из перечня ВАК, получено 5 патентов на изобретение, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, кроме того, получено положительное решение на выдачу патента по заявке на изобретение.

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 42-47.

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. 120-122.

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.

Краткая характеристика соискателя.

Борисов Р.А. с 2001 г. по 2019 г. проходил военную службу в МО РФ, последовательно занимая должности: курсант, бортовой авиационный техник, старший бортовой авиационный техник, преподаватель и старший преподаватель.

С 2019 г. по 2020 г. начальник конструкторского бюро АО «СПАРК», с 2020 г. заместитель начальника летно-испытательного комплекса по инженерно-авиационному обеспечению ООО «СТЦ».

Имеет ведомственные награды и почётное звание в Российской Федерации – «Ветеран труда».

За время работы Борисов Р. А. проявил себя как квалифицированный исследователь и разработчик датчиков давлений на основе линеек фотоэлектронных приемников.

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

(название диссертации)

Борисова Руслана Андреевича

(фамилия, имя, отчество – при наличии)

рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности технические науки

(отрасль науки)

05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

(шифр(ы) и наименование специальности(ей) научных работников)

Заключение принято на заседании кафедры «Авиационная техника»

(наименование структурного подразделения организации)

Присутствовали на заседании 14 чел.

Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел.,

«воздержались» - 0 чел., протокол № 5 от «21» декабря 2021 г.



(подпись лица, оформившего заключение)

Ефимов Александр Владимирович,
канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой
«Авиационная техника»

(фамилия, имя, отчество – при наличии, ученая степень,
ученое звание, наименование структурного подразделения,
должность)