

На правах рукописи



Лыу Конг Кием

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
ПРИЕМНИКОВ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ
ДОЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(информационные технологии и промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Ефимов Иван Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Официальные
оппоненты: **Солдаткин Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры электронного приборостроения и менеджмента качества ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», г. Казань

Сорокин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, начальник отдела по науке и инновационному развитию АО «АЭРОПРИБОР-ВОСХОД», г. Москва

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева - УИ ГА», г. Ульяновск

Защита состоится 14 сентября 2022 года в 12 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.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д212.277.04

д.т.н., доцент



А.М. Наместников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Для пилотирования летательных аппаратов (ЛА) необходима информация о высоте и скорости полета. Вычисление высотно-скоростных параметров основывается на информации о полном и статическом давлениях воздушного потока. Восприятие данных давлений осуществляется с помощью приемников воздушных давлений (ПВД). Наибольшую проблему представляет восприятие статического давления и разработка приемников статического давления – ПСД, что и является предметом исследования.

Разработкой авиационных ПСД занимаются отечественные и зарубежные фирмы: Ульяновское конструкторское бюро приборостроения (Россия), АО «Аэроприбор-Восход» (Россия); Rosemount Engineering (США), Jaeger (Франция), Vadin Crouzet (Франция) и другие.

Значительный вклад в разработку ПСД внесли: А.Н. Петунин, Е.С. Вождаев (ФГУП «ЦАГИ»), В.П. Бутов, А.И. Акимов (ЛИИ), Б.М. Абрамов, Г.Е. Бельфор, Б.В. Лебедев (НИИАО), Э.А. Петросян, В.В. Иванов, Ю.Г. Соковиков, В.Б. Альперович, О.Н. Варванин (УВЗ), А.Н. Птицын, А.Н. Иванов (МВЗ), А.Ю. Лисс, М.И. Мануйлов (КФ МВЗ), В.Г. Кравцов, А.К. Панкратов, Н.В. Алексеев, М.Ю. Сорокин (Аэроприбор-Восход), Р.Г. Чачикян (Аэроприбор-Восход), Г.И. Ключев, Н.Н. Макаров (АО «УКБП»), В.А. Ференец, В.М. Солдаткин, А.А. Поронов, В.В. Солдаткин (КГТУ-КАИ), Н.Г. Федоров, Г.В. Конюхов, И.П. Ефимов (УЛГТУ), D.F. Daw, T.A. Egolf, R.V. Grau, J. Kaletka, N.M. Komerach, S.G. Lion, P.E. Lorber, B. Miller, V.E. Neredka, W. Johnson, R.P. Smith, P.E. Sheridian, F.A. Summerling, T.L. Tompson, G. Yamauchi и другие отечественные и зарубежные ученые и специалисты.

Разработка новых и модернизация существующих ЛА обуславливает необходимость синтеза новых ПСД. При этом вопросы уменьшения девиации коэффициента давления данных устройств, а, следовательно, и погрешности в определении высотно-скоростных параметров постоянно находятся в поле зрения разработчиков.

Ограничениями существующего процесса синтеза ПСД являются: длительное время и высокая стоимость разработки, большая девиация коэффициента давления приемников.

Поэтому повышение эффективности процесса синтеза и уменьшение девиация коэффициента давления ПСД является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса синтеза приемников статического давления за счет разработки его математического обеспечения и рекомендаций разработчику по выбору геометрических параметров приемников, положенных в основу методики и системы автоматизированного параметрического синтеза приемников статического давления.

Поставленная цель достигается решением следующих задач.

1. Разработка структуры автоматизированного процесса параметрического синтеза приемника статического давления;

2. Разработка математического обеспечения процесса синтеза (математических моделей ПСД) с наружной и внутренней обтекаемыми поверхностями, включая модели для расчета коэффициента давления приемников и девиации этого коэффициента, обусловленной изменением параметров набегающего воздушного потока и высоты полета;

3. Теоретические исследования ПСД, в том числе и с использованием разработанных математических моделей, направленные на выявление связи геометрических параметров приемников и допустимых значений их отклонений от номинальных величин со значением девиации коэффициента давления;

4. Разработка рекомендаций по выбору геометрических параметров ПСД и допустимых их отклонений от номинальных значений, обладающих уменьшенным значением девиации коэффициента давления, обусловленной изменением скорости и скосами набегающего воздушного потока);

5. Разработка методики и системы автоматизированного параметрического синтеза ПСД, основанной на полученном математическом, алгоритмическом обеспечении и рекомендациях по выбору геометрических параметров ПСД и допустимых их отклонений от номинальных значений.

Объектом исследования в диссертационной работе является процесс синтеза ПСД.

Предметом исследования являются: математические модели приемников статического давления, девиация коэффициента давления ПСД и связанные с ней погрешности в измерении высотно-скоростных параметров ЛА; структура процесса синтеза ПСД.

Научная новизна работы

1. Подходы и методика моделирования ПСД с наружной и внутренней обтекаемыми поверхностями, позволяющие проводить средствами САПР ANSYS исследования приемников и получение их характеристик.

2. Предназначенные для синтеза и исследования характеристик приемников статического давления математические модели проточных ПСД, содержащих конфузорный и диффузорный участки с отбором статического давления с конфузора и ПСД с наружной профилированной поверхностью и двумя контурами компенсации, предназначенные для расчета коэффициента давления приемников и его девиации, обусловленной изменением параметров воздушного потока и высоты полета.

3. Скоростные и угловые характеристики ПСД с наружной и внутренней обтекаемыми поверхностями, полученные по результатам модельных исследований, которые позволяют проводить автоматизированный синтез и проектирование приемников с уменьшенными значениями девиации коэффициента давления.

Практическая значимость работы

Методика и система автоматизированного параметрического синтеза приемников статического давления с внутренней и наружной обтекаемыми поверхностями, разработанная на основе полученных математических моделей и рекомендаций по уменьшению девиации коэффициента давления ПСД, обеспечивающая повышение эффективности процесса синтеза приемников.

Методы исследования

Метод математического моделирования, теоретические исследования, метод планирования эксперимента, метод статистических испытаний, метод простого перебора, метод наилучшего случая, численное дифференцирование.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Структура автоматизированного процесса параметрического синтеза ПСД, основывающегося на активном использовании средств САПР для синтеза ПСД, позволяющая сократить время и стоимость разработки; уменьшить девиацию коэффициента давления приемников и погрешность в определении высотно-скоростных параметров ЛА.

2. Математические модели ПСД для расчета коэффициента давления приемников и его девиации, обусловленной изменением параметров набегающего воздушного потока, используемые для построения системы параметрического синтеза приемников и их теоретических исследований,

направленных на повышение эффективности процесса синтеза и уменьшение девиации коэффициента давления ПСД.

3. Рекомендации разработчику ПСД по выбору геометрических параметров проточных ПСД и приемников с наружной профилированной поверхностью, позволяющие повысить эффективность процесса синтеза приемников и уменьшить девиацию их коэффициента давления.

4. Методика и система автоматизированного параметрического синтеза ПСД, обеспечивающая возможность нахождения геометрических параметров приемников статического давления и допустимых отклонений этих параметров от номинальных значений, исходя из требований ТЗ.

Область исследования соответствует пункт 3 «Разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП» паспорта специальности 05.13.12 Системы автоматизации проектирования (информационные технологии и промышленность).

Реализация и внедрение работы

Полученные в работе научные и практические результаты внедрены в АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» и в учебный процесс подготовки бакалавров, магистров и аспирантов кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов базируется на построении адекватных математических моделей, сравнении полученных математических моделей с экспериментальными исследованиями, использовании экспериментально подтвержденных результатов математического моделирования, а также на опыте внедрения и использования полученных научно-технических результатов.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты исследований докладывались и обсуждались на:

- Научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях» (Ульяновск, 2019–2021);

- 12-й, 13-й Всероссийских научно-технических конференциях аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (ИВТ-2020, 2021);

- XII, XIII Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых "Информатика, моделирование, автоматизация проектирования" (ИМАП - 2020, 2021);

- XII, XIII Международных молодежных научных конференциях «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск, 2020–2021).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 15 статей, 5 из которых в журналах из списка ВАК, получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Также опубликована одна монография в соавторстве.

Сведения о личном вкладе автора

Постановка задачи исследования осуществлялась совместно с научным руководителем. Все основные теоретические и практические исследования проведены автором диссертационной работы самостоятельно.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и двух приложений, содержит 208 страниц машинописного текста вместе с приложениями, в том числе 51 рисунок и 33 таблицы. Список литературы включает в себя 150 наименований. В приложениях к диссертации представлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, а также копии актов внедрения результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна и практическая значимость результатов работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе показаны роль и место приемников статического давления в бортовых авиационных системах измерения высотно-скоростных параметров ЛА.

Представлены два вида приемников, рассматриваемых в диссертации: проточные приемники статического давления и ПСД с наружной

профилированной обтекаемой поверхностью и двумя контурами компенсации аэродинамической погрешности, рисунки 1 и 2.

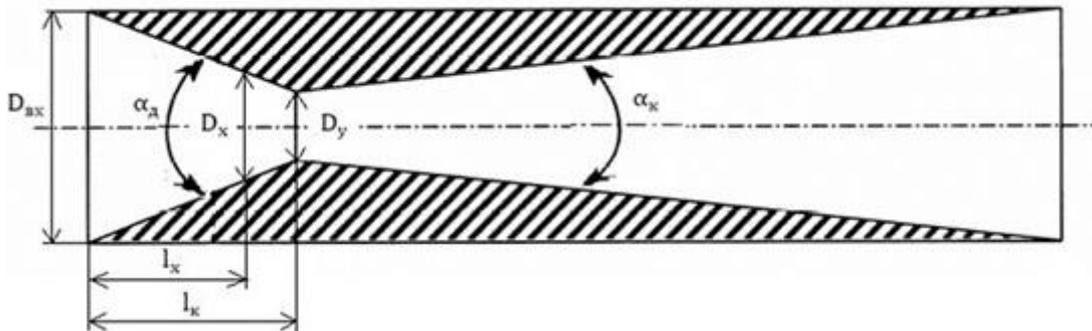


Рисунок 1 – Принципиальная схема проточного ПСД: α_k – угол сужение конфузора; α_d – угол раскрытия диффузора; $D_{вх}$, D_x , D_y – диаметры входной части, сечения отбора

давления и узкой части соответственно; $m = \left(\frac{D_y}{D_{вх}}\right)^2$ – коэффициент диафрагмы;

$\bar{l} = \frac{l_x}{l_k}$ – относительное удаление сечение отбора давления; l_k , l_x – длина конфузора и удаление сечения отбора давления P_x от начала конфузора

Описан существующий типовой процесс синтеза ПСД и основные составляющие, на которых базируется данный процесс: опыт предыдущих разработок ПСД; данные экспериментальных исследований серийных ПСД и их опытных макетов; база данных патентов и полезных моделей ПСД; математические модели ПСД и методики их моделирования; средства САПР, позволяющие рассчитывать статическое давление в произвольной области обтекаемой поверхности ПСД.

Приведен обзор известных математических моделей зондовых средств восприятия статического давления, результатов их исследования и методов проектирования ПСД.

Отмечены основные ограничения существующего процесса синтеза ПСД: длительное время проектирования; большие затраты материальных средств, обусловленные, главным образом, разработкой, изготовлением и аэродинамическими испытаниями промежуточных опытных макетов ПСД; большая девиация коэффициента давления приемников, что увеличивает погрешность в определении высотно-скоростных параметров ЛА.

Сформулирована цель диссертационного исследования и представлена его структура. Перечислены задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели – разработки автоматизированного процесса

параметрического синтеза ПСД: разработка математического обеспечения процесса синтеза (математических моделей для расчета коэффициента давления приемников и девиации этого коэффициента, обусловленной изменением параметров набегающего воздушного потока); получение рекомендаций разработчику по выбору геометрических параметров ПСД на первоначальном этапе разработки; разработка алгоритмического обеспечения и системы автоматизированного параметрического синтеза приемников.

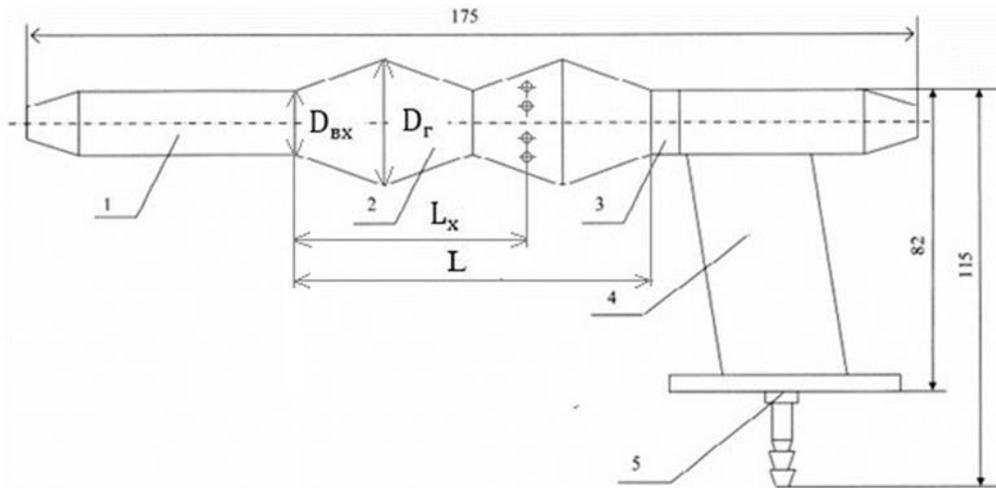


Рисунок 2 – Общий вид исследуемого ПСД наружной профилированной поверхностью:

1 – входной цилиндрической участок; 2 – профилированный участок; 3 – контрольная гайка; 4 – крепежный кронштейн; 5 – штуцер отбора «статики»; $\bar{l} = \frac{L_x}{L}$ – координата сечения

отбора давления; $\bar{d} = \frac{D_{вх}}{D_r}$ – амплитуда гофров

Показана необходимость разработки новых математических моделей, проведения теоретических исследований приемников и разработки системы автоматизированного параметрического синтеза для повышения эффективности процесса синтеза и уменьшения девиации коэффициента давления ПСД.

Постановлена задача исследования, заключающаяся в разработке математических моделей приемников статического давления, разработке методики и системы автоматизированного параметрического синтеза ПСД, проведении теоретических исследований приемников и получении рекомендаций разработчикам по уменьшению девиации коэффициента давления, обусловленной изменением скорости и скосами набегающего воздушного потока.

Во второй главе разработано математическое обеспечение автоматизированного параметрического синтеза приемников статического давления.

Разработана методика математического моделирования зондовых средств восприятия статического давления с наружной и внутренней поверхностями в системе автоматизированного проектирования ANSYS, рисунки 1 и 2. Проведено математическое моделирование вариационного ряда приемников статического давления в соответствии с разработанной методикой. Получены результаты сравнительного тестирования моделей турбулентности k-omega, k-omegaSST, k-epsilon на задаче внутреннего обтекания типового ПСД. А на задаче внешнего обтекания типового ПСД – модели турбулентности Standard k-epsilon, k-epsilonRND, k-epsilonREALIZABLE, k-omega, k-omegaSST, k-omegaBSL, Spalart-Allmaras. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными аэродинамических испытаний ПСД, полученными в аэродинамической лаборатории АО «УКБП». Показано, что использование модели турбулентности k-epsilon при моделировании проточных ПСД и модели турбулентности k-epsilonREALIZABLE при моделировании ПСД с наружной профилированной поверхностью в САПР ANSYS для всех скоростей набегающего воздушного потока дает значения коэффициента давления, отличающиеся от экспериментальных значений данного коэффициента не более, чем 0,04...0,06 (рисунок 3 и таблица 1). При этом интенсивность турбулентности должна быть равна 10%, а степень турбулентной вязкости – 10.

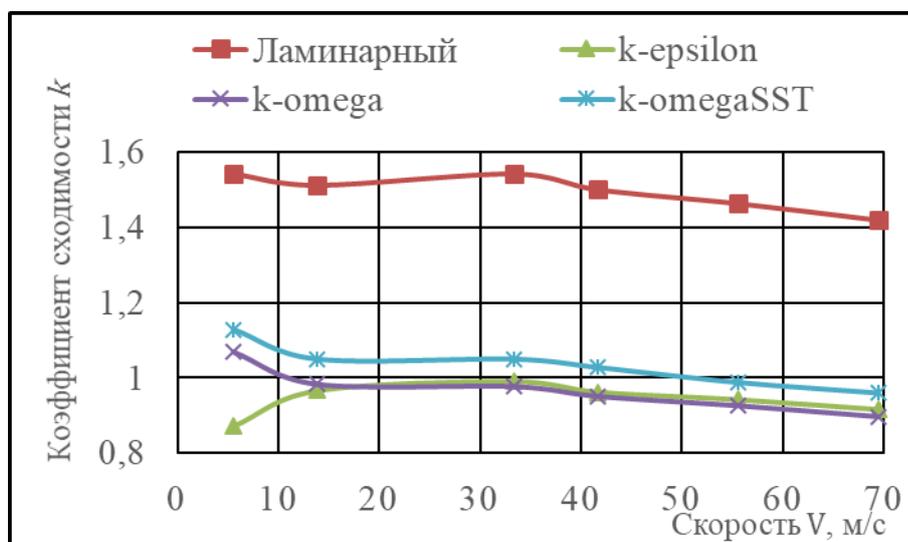


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента сходимости k проточного ПСД

($\alpha_k = 40^\circ$, $\alpha_d = 8^\circ$, $m = 0,2$) от скорости при интенсивности турбулентности $\varepsilon = 10\%$

Таблица 1 – Средние значения отклонения модуля коэффициента давления при моделировании вариационного ряда приемников в программе ANSYS от экспериментальных данных с различными моделями турбулентности (10^{-4})

Скорость V, м/с	Модель турбулентности						
	k-epsilon	k-epsilon RNG	k-epsilon REALI ZABLE	k-omega	k-omega SST	k-omega BSL	Spalart- Allmaras
13,89	471	472	470	511	510	510	513
22,22	447	448	445	465	467	466	480
27,78	433	433	432	450	450	450	467
33,33	419	418	417	433	433	433	451
41,67	394	393	393	406	406	407	430
50,50	357	356	356	366	366	366	394
55,56	373	373	372	388	388	388	419
61,11	360	358	358	374	374	374	411
69,44	338	340	341	353	353	353	389

Исходные данные для разработки математического обеспечения автоматизированного параметрического синтеза приемников статического давления были получены с помощью математического моделирования в программе ANSYS/FLUENT с учетом корректирующих коэффициентов для нахождения поправок к результатам моделирования.

Разработана математическая модель, связывающая коэффициент давления с геометрическими параметрами проточного ПСД, скоростью набегающего воздушного потока и высотой полета:

$$\begin{aligned}
 \bar{p} = & -1,857 + 0,062\alpha_K^* - 0,022\alpha_D^* + 0,044\alpha_K^*\alpha_D^* + 0,158D_{ВХ}^* + 0,011\alpha_K^*D_{ВХ}^* - \\
 & -0,046\alpha_D^*D_{ВХ}^* + 0,356m^* + 0,092\alpha_K^*m^* - 0,051\alpha_D^*m^* - 0,035\alpha_K^*D_{ВХ}^*m^* - \\
 & -3,739\bar{I}^* - 0,026\alpha_K^*\bar{I}^* + 0,342\alpha_D^*\bar{I}^* + 0,113D_{ВХ}^*\bar{I}^* + 0,330m^*\bar{I}^* + 0,012\alpha_K^*\alpha_D^*\bar{I}^* + \\
 & +0,057\alpha_K^*D_{ВХ}^*\bar{I}^* + 0,017\alpha_K^*m^*\bar{I}^* - 0,149\alpha_D^*m^*\bar{I}^* + 0,068D_{ВХ}^*m^*\bar{I}^* - \\
 & -0,011\alpha_K^*\alpha_D^*D_{ВХ}^*\bar{I}^* + 0,039\alpha_K^*\alpha_D^*m^*\bar{I}^* - 0,023\alpha_K^*D_{ВХ}^*m^*\bar{I}^* - 0,673V_0^* + \\
 & +0,133\alpha_K^*V_0^* + 0,058\alpha_D^*V_0^* + 0,041D_{ВХ}^*V_0^* + 0,226m^*V_0^* - 0,062\bar{I}^*V_0^* - \\
 & -0,013\alpha_K^*\alpha_D^*V_0^* - 0,041\alpha_K^*D_{ВХ}^*V_0^* - 0,063\alpha_K^*\bar{I}^*V_0^* - 0,072\alpha_D^*m^*V_0^* - 0,199\alpha_D^*\bar{I}^*V_0^* - \\
 & -0,018D_{ВХ}^*m^*V_0^* + 0,111D_{ВХ}^*\bar{I}^*V_0^* - 0,030m^*\bar{I}^*V_0^* + 0,034\alpha_K^*\alpha_D^*\bar{I}^*V_0^* - \\
 & -0,058\alpha_K^*D_{ВХ}^*\bar{I}^*V_0^* - 0,023\alpha_D^*m^*\bar{I}^*V_0^* - 0,027D_{ВХ}^*m^*\bar{I}^*V_0^* - \\
 & -0,023\alpha_K^*\alpha_D^*m^*\bar{I}^*V_0^* + 0,013\alpha_K^*D_{ВХ}^*m^*\bar{I}^*V_0^* + 0,011\alpha_D^*D_{ВХ}^*m^*\bar{I}^*V_0^* + 0,176H_0^* - \\
 & -0,044\alpha_K^*H_0^* - 0,073\alpha_D^*H_0^* + 0,060D_{ВХ}^*H_0^* - 0,098m^*H_0^* - 0,085\bar{I}^*H_0^* - \\
 & -0,135V_0^*H_0^* + 0,017\alpha_K^*\alpha_D^*H_0^* - 0,016\alpha_K^*D_{ВХ}^*H_0^* + 0,016\alpha_K^*\bar{I}^*H_0^* + 0,025\alpha_K^*V_0^*H_0^* - \\
 & -0,031\alpha_D^*D_{ВХ}^*H_0^* + 0,032\alpha_D^*m^*H_0^* + 0,012\alpha_D^*\bar{I}^*H_0^* + 0,064\alpha_D^*V_0^*H_0^* - \\
 & -0,052D_{ВХ}^*m^*H_0^* - 0,078D_{ВХ}^*\bar{I}^*H_0^* - 0,047D_{ВХ}^*V_0^*H_0^* + 0,020m^*\bar{I}^*H_0^* + \\
 & +0,079m^*V_0^*H_0^* + 0,098\bar{I}^*V_0^*H_0^* - 0,012\alpha_K^*\alpha_D^*V_0^*H_0^* + 0,022\alpha_K^*D_{ВХ}^*\bar{I}^*H_0^* +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +0,021\alpha_K^* D_{BX}^* V_0^* H_0^* - 0,011\alpha_K^* m^* \bar{I}^* H_0^* - 0,011\alpha_K^* \bar{I}^* V_0^* H_0^* + 0,011\alpha_D^* D_{BX}^* \bar{I}^* H_0^* + \\
& \quad + 0,029\alpha_D^* D_{BX}^* V_0^* H_0^* - 0,025\alpha_D^* m^* V_0^* H_0^* - 0,012\alpha_D^* \bar{I}^* V_0^* H_0^* + \\
& + 0,034D_{BX}^* m^* \bar{I}^* H_0^* + 0,050D_{BX}^* m^* V_0^* H_0^* + 0,096D_{BX}^* \bar{I}^* V_0^* H_0^* - 0,014\alpha_K^* D_{BX}^* m^* \bar{I}^* H_0^* - \\
& \quad - 0,020\alpha_K^* D_{BX}^* m^* V_0^* H_0^* - 0,014\alpha_K^* D_{BX}^* \bar{I}^* V_0^* H_0^* + 0,015\alpha_K^* m^* \bar{I}^* V_0^* H_0^* + \\
& \quad + b_{23467}\alpha_D^* D_{BX}^* m^* V_0^* H_0^* - 0,023\alpha_K^* \alpha_D^* D_{BX}^* m^* \bar{I}^* H_0^* + 0,055\alpha_D^* m^* \bar{I}^* V_0^* H_0^* - \\
& \quad - 0,019D_{BX}^* m^* \bar{I}^* V_0^* H_0^*, \tag{1}
\end{aligned}$$

$$\text{где } \alpha_K^* = \frac{\alpha_K - 50}{10}; \alpha_D^* = \frac{\alpha_D - 10}{2}; m^* = \frac{m - 0,3}{0,1}; D_{BX}^* = \frac{D_{BX} - 30}{10}; \bar{I}^* = \frac{\bar{I} - 0,6}{0,4};$$

$$V_0^* = \frac{V_0 - 37,5}{31,94}; H_0^* = \frac{H_0 - 5500}{5500}.$$

Получены математические модели для расчета девиации коэффициента давления проточных ПСД, обусловленной: изменением скорости набегающего воздушного потока

$$\Delta \bar{p}_V = \varphi_1(\alpha_K, \alpha_D, m, D_{BX}, \bar{I}, H_0, \alpha_c), \tag{2}$$

скосами набегающего воздушного потока

$$\Delta \bar{p}_c = \varphi_2(\alpha_K, \alpha_D, m, D_{BX}, \bar{I}, V_0, H_0), \tag{3}$$

изменением высоты полета

$$\Delta \bar{p}_H = \varphi_3(\alpha_K, \alpha_D, m, D_{BX}, \bar{I}, V_0, \alpha_c), \tag{4}$$

Разработанная математическая модель, позволяющая находить значение коэффициента давления \bar{p} в зависимости от геометрических параметров ПСД с наружной профилированной поверхностью, скорости воздушного потока и высоты полета при наличии скосов воздушного потока, имеет вид:

$$\bar{p} = b_0 + b_1 \bar{d}^* + b_2 \bar{I}^* + b_{12} \bar{d}^* \bar{I}^* + b_3 V_0^* + b_{13} \bar{d}^* V_0^* + b_{23} \bar{I}^* V_0^* + b_{123} \bar{d}^* \bar{I}^* V_0^* + b_4 H_0^* + b_{24} \bar{I}^* H_0^* + b_{124} \bar{d}^* \bar{I}^* H_0^* + b_{234} \bar{I}^* V_0^* H_0^* + b_5 \alpha_c^*, \tag{5}$$

Переменные H_0^* , V_0^* , \bar{d}^* , \bar{I}^* и α_c^* определяются по формулам (6).

$$\left\{ \begin{array}{l}
V_0^* = \frac{V_0 - 41,67}{27,78}, H_0^* = \frac{H_0 - 5500}{5500}, \alpha_c^* = \frac{\alpha_c - 15}{15}, \\
\bar{I}^* = \frac{\bar{I} - 0,1535}{0,0965} \text{ при } \bar{I} = 0,057 \dots 0,250, \bar{I}^* = \frac{\bar{I} - 0,3465}{0,0965} \text{ при } \bar{I} = 0,250 \dots 0,443 \\
\bar{I}^* = \frac{\bar{I} - 0,6335}{0,0965} \text{ при } \bar{I} = 0,557 \dots 0,750, \bar{I}^* = \frac{\bar{I} - 0,8465}{0,0965} \text{ при } \bar{I} = 0,750 \dots 0,943, \\
\bar{d}^* = \frac{\bar{d} - 0,6335}{0,0335} \text{ при } \bar{d} = 0,600 \dots 0,667, \bar{d}^* = \frac{\bar{d} - 0,7085}{0,0415} \text{ при } \bar{d} = 0,667 \dots 0,750, \\
\bar{d}^* = \frac{\bar{d} - 0,8035}{0,0535} \text{ при } \bar{d} = 0,750 \dots 0,857, \bar{d}^* = \frac{\bar{d} - 0,9285}{0,0715} \text{ при } \bar{d} = 0,857 \dots 1,000.
\end{array} \right. \tag{6}$$

Математическая модель для расчета девиации коэффициента давления ПСД с наружной профилированной поверхностью, обусловленной изменением скорости воздушного потока, имеет вид:

$$\Delta \bar{p}_V = b_0 + b_1 \bar{d}^* + b_2 \bar{l}^* + b_{12} \bar{d}^* \bar{l}^* + b_3 H_0^* + b_{13} \bar{d}^* H_0^* + b_{23} \bar{l}^* H_0^* + b_{123} \bar{d}^* \bar{l}^* H_0^* + b_4 \alpha_c^* + b_{14} \bar{d}^* \alpha_c^* + b_{24} \bar{l}^* \alpha_c^* + b_{124} \bar{d}^* \bar{l}^* \alpha_c^* + b_{134} \bar{d}^* H_0^* \alpha_c^* + b_{1234} \bar{d}^* \bar{l}^* H_0^* \alpha_c^*, \quad (7)$$

Переменные H_0^* , \bar{d}^* , \bar{l}^* и α_c^* определяются по формулам (6).

Математическая модель для расчета девиации коэффициента давления ПСД с наружной профилированной поверхностью, обусловленной углом скоса воздушного потока, имеет вид:

$$\Delta \bar{p}_c = b_0 + b_1 \bar{d}^* + b_2 \bar{l}^* + b_3 V_0^* + b_{13} \bar{d}^* V_0^* + b_{23} \bar{l}^* V_0^* + b_4 H_0^* + b_{14} \bar{d}^* H_0^* + b_{24} \bar{l}^* H_0^* + b_{34} V_0^* H_0^* + b_{134} \bar{d}^* V_0^* H_0^*, \quad (8)$$

Переменные H_0^* , V_0^* , \bar{d}^* и \bar{l}^* определяются по формулам (6).

Математическая модель для расчета девиации коэффициента давления ПСД с наружной профилированной поверхностью, обусловленной изменением высоты полета, имеет вид:

$$\Delta \bar{p}_H = b_0 + b_1 \bar{d}^* + b_2 \bar{l}^* + b_{12} \bar{d}^* \bar{l}^* + b_3 V_0^* + b_{13} \bar{d}^* V_0^* + b_{23} \bar{l}^* V_0^* + b_{123} \bar{d}^* \bar{l}^* V_0^* + b_4 \alpha_c^* + b_{24} \bar{l}^* \alpha_c^* + b_{34} V_0^* \alpha_c^* + b_{134} \bar{d}^* V_0^* \alpha_c^*, \quad (9)$$

Полученные математические модели ПСД (1), (2), (3), (4), (5), (7), (8) и (9) использованы в системе автоматизированного параметрического синтеза приемников, предоставляющей возможность оперативно подбирать приемники с требуемыми конструктивными параметрами для конкретного летательного аппарата на первоначальном этапе разработки, что существенно ускоряет и удешевляет процесс синтеза ПСД.

В третьей главе проведено исследование проточных приемников статического давления и ПСД с наружной обтекаемой поверхностью с целью разработки рекомендаций разработчику по выбору геометрических параметров ПСД.

Полученные в результате выполнения диссертационного исследования рекомендации разработчику по выбору геометрических параметров ПСД можно представить в следующем виде.

Для ПСД с внутренней обтекаемой поверхностью:

1. Диаметр отбора давления D_x должен иметь максимально возможное значение. Увеличение диаметра отбора давления на 1,00 мм уменьшает девиацию коэффициента давления примерно на 0,20.

2. Увеличение диаметра отбора давления, при заданном значении коэффициента давления ПСД, может быть достигнуто изменением величины коэффициента диафрагмы приемника m , диапазон значений которого у бортовых ПСД изменяется в пределах от 0,20 до 0,40...0,50.

3. При увеличении коэффициента диафрагмы ПСД девиация коэффициента давления уменьшается (около – 0,20 при увеличении коэффициента диафрагмы на 0,10).

4. Для оценки значения девиации коэффициента давления ПСД можно использовать разработанные математические модели (1), (2), (3) и (4).

5. Рекомендуемые значения:

- Относительное удушение сечения отбора давления $\bar{I} = 0,20 \dots 0,30$;
- Коэффициент диафрагмы $m = 0,30 \dots 0,40$.

6. Допустимое отклонение диаметра отбора давления от его номинального значения должно быть минимальным, так как его влияние на девиацию коэффициента давления ПСД практически в 2...3 раза превышает влияние диаметров входа и узкой части.

7. Допуски на угловые размеры могут быть менее жесткими, так как влияние углов сужения конфузора и раскрытия диффузора на девиацию коэффициента давления значительно меньше, чем диаметров отбора давления, входа и узкой части.

8. Допуск на изменение угла раскрытия диффузора должен быть минимальным, так как его влияние на девиацию коэффициента давления примерно на порядок превышает влияние отклонения угла сужения конфузора.

9. При проектировании проточных приемников статического давления приемлемыми могут быть следующие требования к допускам на отклонение геометрических параметров ПСД:

- + допуск на угол сужения конфузора α_k ПСД от 0,05 до 0,10°;
- + допуск на угол раскрытия диффузора α_d ПСД от 0,0014 до 0,0140°;
- + допуск на диаметры входной, узкой частей $D_{вх}$, D_y и сечения отбора давления D_x от 0,01 до 0,05 мм.

10. При изготовлении ПСД возможно использовать квалитет 12В, уровень точности 6, при этом погрешность в определении высотно-скоростных параметров не превышает допустимого уровня, оговоренного в нормах летной годности самолетов и вертолетов. Изготовление ПСД в соответствии с более высоким классом точности нецелесообразно из-за существенного увеличения стоимости приемника.

Для ПСД с наружной профилированной поверхностью:

1. Для обеспечения минимального значения девиации коэффициента давления рекомендуется выполнять отверстия отбора давления «статики» с координатами $\bar{l} = 0,071$, $\bar{l} = 0,414$, $\bar{l} = 0,586$ и $\bar{l} = 0,929$. В этом случае коэффициент давления ПСД равен нулю и практически инвариантен к скорости набегающего воздушного потока.

2. Для достижения минимальной величины девиации коэффициента давления, обусловленной изменением скорости потока, следует выбирать максимально большие значения амплитуды гофров ПСД \bar{d} . При значении амплитуды гофров $\bar{d} = 0,80 \dots 1,00$ значение девиации коэффициента давления практически не превышает погрешности экспериментального определения коэффициента давления приемника.

3. Для обеспечения минимальной девиации коэффициента давления, обусловленной углами скоса потока, необходимо выбирать как можно меньшие значения амплитуды гофров.

4. Так как в реальной практике разработки ПСД зачастую требуется учитывать одновременно и изменение скорости и угла скоса потока, то для уменьшения девиации коэффициента давления целесообразно увеличивать амплитуду гофров, так как ее влияние на девиацию коэффициента давления, обусловленную изменением скорости потока, в 4...6 раз превышает влияние амплитуды гофров на девиацию коэффициента давления, обусловленную скосам потока.

5. Для минимизации девиации коэффициента давления ПСД возможно суммирование давлений, отбираемых из двух сечений профилированного участка. Выбор координат соответствующих сечений отбора давления может быть произведен с помощью разработанных математической модели (5) и программы [10].

6. В большинстве случаев высоту полета (до 11000 м) можно не учитывать, так как ее влияние на коэффициент давления ПСД не превышает погрешности экспериментального определения коэффициента давления приемника.

7. При назначении допустимых отклонений геометрических параметров от их номинальных значений следует учитывать, что коэффициенты влияния этих параметров на девиацию коэффициента давления, в отличие от проточных ПСД, зависят в большей степени от номинальных значений этих параметров. Наибольшее влияние на коэффициент давления оказывают диаметр входного

участка и длина профилированного участка ПСД. Для назначения допусков на геометрические параметры ПСД рекомендуется использовать разработанные математические модели (7), (9) и (9) и программу [10].

8. При изготовлении ПСД возможно использовать квалитет 12В, при этом погрешность в определении высотно-скоростных параметров не превышает допустимого уровня, заданного в нормах летной годности соответствующих летательных аппаратов. Изготовление ПСД в соответствии с более высоким классом точности приводит к увеличению затрат на их производство.

В четвертой главе разработан автоматизированный процесс параметрического синтеза приемников статического давления.

Разработана методика синтеза приемника статического давления, включающая в себя:

1. Формирование вектора исходных данных.

1.1 Допустимые изменения геометрических параметров.

На основе требований к разрабатываемым приемникам и с учетом представленных рекомендаций разработчику по выбору геометрических параметров ПСД задаются следующие диапазоны изменения геометрических параметров для приемников проточного типа:

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{мин}} \dots \alpha_{\text{к}}^{\text{мак}}, \alpha_{\text{д}}^{\text{мин}} \dots \alpha_{\text{д}}^{\text{мак}}, D_{\text{вх}}^{\text{мин}} \dots D_{\text{вх}}^{\text{мак}}, D_{\text{у}}^{\text{мин}} \dots D_{\text{у}}^{\text{мак}}, D_{\text{х}}^{\text{мин}} \dots D_{\text{х}}^{\text{мак}}.$$

А для приемников с наружной профилированной поверхностью:

$$D_{\text{вх}}^{\text{мин}} \dots D_{\text{вх}}^{\text{мак}}, D_{\text{г}}^{\text{мин}} \dots D_{\text{г}}^{\text{мак}}, L^{\text{мин}} \dots L^{\text{мак}}.$$

При этом удаление сечения отбора давления от начала профилированного участка приемника с наружной профилированной поверхностью $L_{\text{х}}$ изменяется от 0 мм до L .

1.2 Шаг изменения геометрических параметров.

Исходя из требуемого допуска на отклонение статической характеристикой приемника задаются величины шагов изменения геометрических параметров ПСД.

Уменьшение шага расчета увеличивает число возможных сочетаний геометрических параметров ПСД, удовлетворяющих заданным требованиям к скоростной характеристике ПСД, но замедляет процесс поиска.

1.3 Скоростная характеристика, заданная или рассчитанная на основе ТЗ.

Задается требуемая скоростная характеристика ПСД: значения, коэффициента давления для заданных скоростей.

1.4 Допустимое отклонение скоростной характеристики.

Задается допустимая величина погрешности по коэффициенту давления (абсолютное или относительное значение).

1.5 Диапазон изменения высоты полета на основе требований ТЗ.

На основе требований ТЗ задается диапазон изменения высоты полета $H_{\text{мин}} \dots H_{\text{макс}}$.

2. Нахождение сочетаний геометрических параметров ПСД, удовлетворяющих требованию к заданной скоростной характеристике на основе разработанных математических моделей (1) для приемников проточного типа, а (5) для приемников с наружной профилированной поверхностью.

С помощью метода простого перебора осуществляется вычисление скоростной характеристики для всех возможных сочетаний геометрических параметров ПСД.

3. Анализ полученных результатов и выбор значений геометрических параметров синтезируемых ПСД.

4. Анализ погрешностей в определении значений высотно-скоростных параметров и коэффициента давления, обусловленных возможными отклонениями геометрических параметров ПСД от их номинальных значений (анализ уравнения точности, полученного с использованием разработанных математических моделей).

5. Назначение допусков на отклонения геометрических параметров ПСД исходя из требований ТЗ и при использовании программы синтеза ПСД [10], основанной на разработанных математических моделях.

В соответствии с данной методикой были разработаны алгоритмическое обеспечение и система автоматизированного параметрического синтеза ПСД [10], структурная схема которой показана на рисунке 4.

Система позволяет находить геометрические параметры ПСД и допустимые их отклонения от номинальных значений по заданной скоростной характеристике ПСД.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложениях к диссертации представлены свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, а также копии акта внедрения результатов работы.



Рисунок 4 – Структурная схема системы автоматизированного параметрического синтеза приемников статического давления

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ существующих математических моделей и процесса синтеза ПСД с наружной и внутренней обтекаемыми поверхностями и произведена постановка задачи диссертационного исследования.

2. Разработаны математические модели проточных ПСД, обеспечивающие повышение точности вычисления их коэффициента давления по сравнению с известными моделями и представляющие возможность вычисления девиации коэффициента давления, обусловленной изменением скорости и углами скола набегающего воздушного потока.

3. Получены математические модели ПСД с наружной профилированной поверхностью и двумя контурами компенсации, позволяющие рассчитывать коэффициент давления приемников и девиацию этого коэффициента, обусловленную изменением параметров набегающего воздушного потока.

4. Проведены теоретические исследования проточных и непроточных ПСД, направленные на выявление связей сочетаний геометрических параметров

приемников статического давления с их скоростными и угловыми характеристиками.

5. Получены рекомендации по выбору геометрических параметров ПСД, обладающих уменьшенным значением девиации коэффициента давления.

6. Установлено, что для исследуемых непроточных ПСД существуют 3 области, в которых девиации коэффициента давления значимо не отличаются от нуля ($\bar{I} = 0 \dots 0,100$, $\bar{I} = 0,390 \dots 0,650$ и $\bar{I} = 0,900 \dots 1,000$).

7. Получена связь допусков на изменение геометрических параметров ПСД с девиацией их коэффициента давления и разработаны уравнения точности, с помощью которых может быть произведено назначение допустимых значений отклонения геометрических параметров ПСД исходя из заданного максимального значения девиации коэффициента давления.

8. Разработаны методика и система автоматизированного параметрического синтеза, обеспечивающая повышение эффективности процесса синтеза ПСД за счет разработанных математических моделей, полученных рекомендаций по выбору областей изменения геометрических параметров приемников и алгоритмического и программного обеспечения синтеза проточных и непроточных ПСД.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, утвержденных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Лыу Конг Киём. Моделирование проточных приемников статического давления в ANSYS / Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов // Автоматизация процессов управления. – 2019. – № 4. – С. 97-104.

2. Лыу Конг Киём. К вопросу повышения точности измерения высотно-скоростных параметров в системах автоматизированного управления летательными аппаратами / Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 4. – С. 25-32.

3. Лыу Конг Киём. Назначение допусков на геометрические параметры проточных приемников воздушных давлений с применением метода

статистических испытаний / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 7. – С. 17-23.

4. Лыу Конг Кием. К вопросу о влиянии скоса потока на коэффициент давления проточного приемника статического давления / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 1. – С. 15-21.

5. Лыу Конг Кием. Математическая модель для расчета девиации коэффициента давления проточных приемников статического давления, обусловленной скосами набегающего воздушного потока / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2021. – № 7. – С. 55-60.

Монографии:

6. Лыу Конг Кием. Исследование проточных приемников статического давления / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов, Май Суан Дык, А. С. Кузнецов. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – 262 с.

Патенты и авторские свидетельства:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020663816. Программа для нахождения геометрических параметров проточных приемников статического давления, девиация коэффициента давления которых не превышает заданного значения // Лыу Конг Кием, И.П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; заявл. 28.10.2020; зарегистр. 02.11.2020. – М.: Роспатент, 2020.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617045. Программа для расчета коэффициента давления проточных приемников статического давления // Лыу Конг Кием, И.П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; заявл. 21.04.2021; зарегистр. 05.05.2021. – М.: Роспатент, 2021.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619053. Программа для расчета коэффициента давления приемников статического давления с наружной профилированной поверхностью // Лыу Конг Кием, И.П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; заявл. 25.05.2021; зарегистр. 03.06.2021. – М.: Роспатент, 2021.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667764. Программа функционального синтеза приемников статического давления // Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов; правообладатель: ФГБОУ ВО «УлГТУ»; заявл. 15.10.2021; зарегистр. 02.11.2021. – М.: Роспатент, 2021.

Работы, опубликованные в сборниках статей и научных трудов международных и всероссийских конференций:

11. Лыу Конг Кием. К вопросу влияния шага расчетной сетки на результаты моделирования проточных приемников воздушных давления в программе ANSYS / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр. XII Всероссийской. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых ИВТ-2020/ под общей ред. В. Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2020. – С. 119-124.

12. Лыу Конг Кием. К вопросу о связи точности изготовления проточного приемника статического давления с погрешностью в определении высотно-скоростных параметров / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр. XIII Всероссийской. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых ИВТ-2021/ под общей ред. В. Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 185-191.

13. Лыу Конг Кием. К вопросу выбора параметров для создания расчетной сетки при моделировании непроточных приемников воздушных давлений в программе ANSYS / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования: сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-пр. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых ИМАП-2020/ под ред. Н. Н. Войта. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 122-127.

14. Лыу Конг Кием. К вопросу о влиянии скоса набегающего воздушного потока на коэффициент давления приемника статического давления с наружной профилированной поверхностью / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования: сб. науч. тр. XIII Междунар. науч.-пр. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых ИМАП-2021 / под ред. Н. Н. Войта. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 157-163.

15. Лыу Конг Кием. К вопросу выбора геометрических параметров проточных приемников воздушных давлений, девиация коэффициента давления которых не превышает заданного значения / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов XII Международной молодежной научной конференции. – Ульяновск : УИГА, 2020. – С. 26-28.

16. Лыу Конг Кием. Уменьшение влияния скоса потока на коэффициент давления проточного приемника статического давления / Лыу Конг Кием, И. П. Ефимов // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов XIII

Международной молодежной научной конференции. – Ульяновск : УИГА, 2021. – С. 26-28.

Публикации в других изданиях:

17. Лыу Конг Киём. Исследование системы воздушных сигналов / Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 53-й науч. -техн. конф. в 3 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – С. 18-21.

18. Лыу Конг Киём. Моделирование проточных приемников статического давления с помощью средств САПР / Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 54-й науч.-техн. конф. в 3 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2020. – С. 126-129.

19. Лыу Конг Киём. К вопросу выбора модели турбулентности при моделировании непроточных приемников воздушных давлений в программе ANSYS / Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 55-й науч. -техн. конф. в 3 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 88-91.

20. Лыу Конг Киём. К вопросу уменьшения погрешности при измерении высотно-скоростных параметров ЛА / Лыу Конг Киём, И. П. Ефимов // Вузовская наука в современных условиях: сб. матер. 55-й науч.-техн. конф. в 3 ч. Ч. 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 91-94.

Лыу Конг Кием

Автоматизированный параметрический синтез приемников статического давления
для малых дозвуковых скоростей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 23.06.2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ ____.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.