

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: 24.2.327.03

Соискатель: Щербаков Александр Игоревич

Тема диссертации: Разработка адаптивной системы управления с идентификацией математической модели летательного аппарата в реальном масштабе времени

Специальность: 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:

На заседании «24» сентября 2026 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, установленным Положением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и принял решение присудить Щербакову Александру Игоревичу ученую степень кандидата технических наук.

Присутствовали: председатель диссертационного совета В.В. Малышев, заместитель председателя диссертационного совета М.Н. Красильщиков, ученый секретарь диссертационного совета А.В. Старков, члены диссертационного совета: А.И. Болкунов, В.А. Воронцов, В.Н. Евдокименков, А.В. Ефремов, С.Ю. Желтов, К.А. Занин, Д.А. Козорез, М.С. Константинов, М.М. Матюшин, А.В. Ненарокомов, С.Н. Падалко, В.В. Пасынков, В.Г. Петухов, Г.Г. Райкунов, В.В. Родченко, Ю.В. Тюменцев.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.327.03, д.т.н., доцент
Старков Александр Владимирович

Проректор по научной работе, д.т.н., доцент
Иванов Андрей Владимирович



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.03

созданного на базе Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский университет)»
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
(МАИ)

по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 24.09.2026 г., протокол № 19

О присуждении **Щербакову Александру Игоревичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка адаптивной системы управления с идентификацией математической модели летательного аппарата в реальном масштабе времени» по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки) принята к защите «18» июня 2026, протокол № 14, диссертационным советом 24.2.327.03 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ, Московский авиационный институт), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4, приказ о создании совета № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель, Щербаков Александр Игоревич, «08» апреля 1998 года рождения. В 2020 году окончил бакалавриат Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 24.03.03 «Баллистика и гидроаэродинамика» (диплом №107718 1177016). В 2022 году с отличием окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 24.04.03 «Баллистика и гидроаэродинамика» (диплом с отличием №107718 1276703). В 2026 году успешно освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (Московский авиационный институт, МАИ) по специальности 2.5.16. – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов» (технические науки). Справка о сдаче кандидатских экзаменов №31 от 03 апреля 2026 г. выдана Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

В период подготовки диссертации и в настоящее время соискатель Щербаков Александр Игоревич работает на кафедре «Аэродинамика, динамика и управление летательных аппаратов» МАИ в должности старшего преподавателя. В период обучения в аспирантуре соискатель являлся получателем стипендии Президента Российской Федерации, проводящим научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, определенных в стратегии научно-технологического развития Российской Федерации на основании приказа МАИ от 30 октября 2024 года №301001/СТ в соответствии с приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 3 июля 2024 года №428.

Диссертация выполнена в МАИ на кафедре «Аэродинамика, динамика и управление летательных аппаратов» института №1 «Авиационная техника».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Аэродинамика, динамика и управление летательных аппаратов» МАИ, Ефремов Александр Викторович.

Официальные оппоненты:

1. Гребенкин Александр Витальевич – гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, начальник отдела 901, Публичное акционерное общество «Московский институт электромеханики и автоматики».

2. Верещиков Дмитрий Викторович – гражданин Российской Федерации, кандидат технических наук, доцент, начальник 72 кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-Воздушная Академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации.

Все оппоненты дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ФАУ «ЦАГИ»), Московская область, г. Жуковский, в своем положительном отзыве, обсужденном на заседании научно-технического совета предприятия (протокол №93 от 2 августа 2026 г.), подписанным начальником НИО-15 НИЦ БП, доктором технических наук, доцентом С.Г. Баженовым (подпись С.Г. Баженова заверена заместителем начальника управления персоналом – начальником отдела кадров ФАУ «ЦАГИ») и утвержденным первым заместителем генерального директора ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», доктором физико-математических наук, профессором РАН А.Л. Медведским, указала, что диссертация Щербакова А.И. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научно-техническом уровне и имеющую новизну, теоретическую и практическую

значимость. Работа полностью отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ. Автор работы – Щербаков Александр Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.16. – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки)».

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 8 работ, включающих 4 статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки РФ, из которых 2 в соответствии с рекомендациями ВАК РФ отнесены к категории К1, 4 работы в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных SCOPUS.

Наиболее значимыми научными работами по теме диссертации являются:

Статьи в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, соответствующие специальности 2.5.16:

1. А. В. Ефремов, А. И. Щербаков, В.А. Проданик, Ф.А. Корзун, Перспективные средства подавления раскачки самолета летчиком // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т.29. – № 1. – С. 201-210. – DOI: 10.34759/vst-2022-1-201-210. – EDN ПНУУQ. (2,5 с. авт., категория К1, №570, перечень ВАК от 01.02.2022 г., «белый список» РЦНИ). Личный вклад автора заключается в синтезе префильтра, позволяющего не допустить возникновения явления раскачки самолета летчиком.

2. А. В. Ефремов, А. И. Щербаков, Сравнительный анализ современных подходов к синтезу систем управления летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. – 2025. – Т.32. – № 4. – С. 192-200. – EDN ZZTQZF. (4,5 с. авт., категория К1, №570, перечень ВАК от 01.02.2022 г., «белый список» РЦНИ). Личный вклад автора заключается в проведении сравнительного анализа регуляторов контуров управления ЛА, синтезированных с использованием современных подходов.

Статьи в отечественных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, которые считаются включенными в Перечень ВАК (Перечень МРБД ВАК):

1. А.В. Ефремов, А.И. Щербаков. Влияние порядка системы уравнений движения летательного аппарата при реализации адаптивной системы управления с онлайн-идентификацией параметров объекта управления // Известия вузов. Авиационная техника. - 2023. - №3. - с. 33-40. – EDN НУІQER. (4 с. авт., №238, перечень МБД от 31.12.2023 г., «белый список» РЦНИ). Личный вклад автора заключается в исследовании влияния структуры линеаризованной модели динамики ЛА на точность онлайн-идентификации.

2. А.В. Ефремов, Е.В. Ефремов, А.И. Щербаков. Подавление явления раскачки самолета летчиком различных категорий путем использования средств автоматизации // Известия вузов. Авиационная техника. - 2024. - №1. - с. 30-38. – EDN YILMKH. (4,5 с. авт., №238, перечень МБД от 31.12.2023 г., «белый список» РЦНИ). Личный вклад автора заключается в синтезе альтернативного варианта нелинейного корректирующего устройства, обеспечивающего снижение потребных скоростей отклонения рулевых поверхностей ЛА.

Статьи в журналах, индексируемых в иностранных библиографических и реферативных базах данных (SCOPUS, Web Of Science):

1. A.V. Efremov, E.V. Efremov, M.S. Tiaglik, I. Kh. Irgaleev, A.I. Shcherbakov, Z. Mbikayi, Adaptive flight control system for flight safety improvement in reentry and other high-velocity vehicles // Acta Astronautica, 2023. - Vol. 204. - March 2023. - pp. 900-911. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.056>. – EDN LTVHTN. (Статья Scopus, Q1).

2. Z.Mbikayi, F.Holzapfel, A.V. Efremov, A.Scherbakov, Human Pilot Interaction with Fast Adapting Flight Control System // IFAC - PapersOnLine, 2022. - Volume 55, Issue 41. – pp. 113-118. ISSN 2405-8963. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.01.112>. – EDN XGGNGG. (Статья Scopus).

3. A.V. Efremov, E.V. Efremov, A.I. Shcherbakov, Development of means for suppressing the negative effects of interaction between the pilot and reentry and other high-speed vehicles // Acta Astronautica, 2025. - Vol. 226. - January 2025. - pp. 230-238. -URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.10.028>. – EDN QVRFVF. (Статья Scopus, Q1).

4. A.V. Efremov, E.V. Efremov A.I. Scherbakov, Development of Means for Suppressing Negative Aircraft-Pilot Coupling Effects in Manual Control // IFAC-PapersOnLine, 2024. - Volume 58, Issue 30.- pp. 213-217. - ISSN 2405-8963. -URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.01.183>. – EDN DQPYYG. (Статья Scopus).

Соискатель имеет 1 патент на изобретение:

1. Патент RU2814931C1 «Нелинейный префильтр, обеспечивающий подавление явления раскачки самолета летчиком» / А.В. Ефремов, А.И. Щербаков, Е.В. Ефремов (RU); Правообладатель ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) (RU). – заявка №202313217 от 07.12.2023, опубл. 06.03.2024. – EDN CBSKNC.

В диссертационной работе отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты, представленные в диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

1) Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ФАУ «ЦАГИ»), ведущая организация. **Отзыв положительный.**

Кроме преимуществ в работе Щербакова А.И. имеется ряд недостатков:

- не описана используемая модель случайной составляющей сигналов с датчиков;
- в работе не рассматривается влияние интенсивной атмосферной турбулентности на процесс онлайн-идентификации;
- в тексте работы имеются досадные опечатки и стилистические погрешности.

2) Гребенкин Александр Витальевич, официальный оппонент, доктор технических наук. **Отзыв положительный**, заверен ученым секретарем ПАО «МИЭА», к.т.н., с.н.с., О.Б. Кербер.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1. В описании модели гидравлических рулевых приводов отсутствует неизбежное наличие зоны нечувствительности и оценка её влияния на качество управляющих воздействий при реализации предлагаемых законов управления.

2. В предоставленных материалах диссертации отсутствуют выводы по главам.

3. В нумерации рисунков встречаются ошибки.

3) Верещиков Дмитрий Викторович, официальный оппонент, кандидат технических наук, доцент. **Отзыв положительный**, заверен начальником отдела кадров ВУНЦ ВВС «ВВА», к.в.н., доц. И.Ю. Чужиновым.

В результате изучения диссертации и автореферата сформулирован следующий ряд замечаний:

1. Целью работы, по заявлению автора, в первую очередь является повышение безопасности полета, однако в содержании работы и в выводах по ней не упомянуто о критериальных показателях, позволяющих судить о достигнутом уровне безопасности полетов. Автор ограничился только тем, что в рассмотренных им случаях продемонстрировал то, что предложенный им нелинейный префильтр позволяет предотвратить раскачку самолета летчиком что, как следует полагать, действительно повышает уровень безопасности полета.

2. В диссертации применяется термин «желаемая динамика объекта управления», однако не приводятся количественные показатели параметров, характеризующих эту динамику за исключением того, что упоминается звено 1-го порядка.

4) Акционерное общество «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина», отзыв на автореферат. **Отзыв положительный,** подписан заместителем Главного конструктора по аэродинамике динамики полета и системе управления самолетом, к.т.н. О.В. Кругляковой, заверен заместителем управляющего директора по управлению персоналом АО «Ил» Н.Б. Сурковой, утвержден Главным конструктором С.В. Ганиным.

По автореферату имеются незначительные замечания, не снижающие ценность работы:

– в содержании не приведены исходные законы управления используемых в экспериментальных исследованиях моделей ЛА;

– непонятно, что означают цифры «1, 2, 3» на рисунке 12.

5) Акционерное общество «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.А. Камова», отзыв на автореферат. **Отзыв положительный,** подписан начальником КБ – главным конструктором функционального развития ВКЛА АО «НЦВ Миль и Камов» В.М. Чобаном, заверен директором службы кадров и развития персонала АО «НЦВ Миль и Камов» Г.И. Нырковой.

В качестве замечаний к автореферату можно отметить следующее:

1) в алгоритме параметрической идентификации коэффициентов системы уравнения движения ЛА не проверяется существование обратной матрицы $(E^T E)^{-1}$, а также из автореферата не ясно что происходит в случае $\det(E^T E)=0$, когда решений для неизвестной матрицы параметров динамической системы g бесконечно много.

2) в автореферате не приведены условия проведения экспериментов.

6) Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ФГУП ГосНИИГА), отзыв на автореферат. **Отзыв положительный,** подписан ученым секретарем Секретариата ученого совета ФГУП ГосНИИГА, к.т.н. А.Н. Городишениным, утвержден научным руководителем ФГУП ГосНИИГА, д.т.н., профессором В.С. Шапкиным.

К недостаткам работы можно отнести то, что анонсируемые изменения динамики моделируются исключительно путем изменения коэффициентов эффективности рулей. Структура системы уравнений при этом остается неизменной, но возможно это справедливо на начальном этапе решения задачи построения адаптивного управления.

7) ПАО «ОАК» филиал ОТА ОКБ Микояна, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан ученым секретарем Отделения НТС ПАО «ОАК» в ОКБ ОТА, заместителем Главного конструктора ОКБ по системам управления ПАО «ОАК» филиал ОТА ОКБ Микояна, Действительным членом академии Наук Авиации и воздухоплавания, Заслуженным машиностроителем РФ, д.т.н. Ю.Г. Оболенским, утвержден первым заместителем управляющего директора ОКБ ОТА – Директором ОКБ Микояна – Главным конструктором ОКБ А.И. Матвеевым.

К недостаткам автореферата следует отнести то, что не исследуются другие нелинейности, присущие приводам управляющих поверхностей летательных аппаратов, которые также проявляют свои свойства при реализации алгоритмов управления.

Также во второй главе автореферата в структурных схемах предлагаемого регулятора отсутствуют обратные связи по углу атаки и нормальной перегрузке, необходимые для реализации ограничителей предельных режимов (ОПР) летательных аппаратов, и ни слова не упоминается об этой необходимой составной части любой современной системы управления.

8) Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан заместителем начальника летно-исследовательского испытательного центра ГЛИЦ им. В.П. Чкалова по испытательно-методической и научно-исследовательской работе, д.т.н., доцентом С.В. Николаевым, утвержден Врио заместителя начальника ГЛИЦ им В.П. Чкалова по научной работе К. Хвостиконом.

Несмотря на безусловно положительное впечатление от работы следует отметить ряд недостатков.

1. Судя по автореферату, автором в 1 главе наиболее целесообразным признается использование метода синтеза регулятора на базе принципа обратной динамики (NDI), при этом приводится пример уравнений для самолета. Также, следует из автореферата, что в главе 3 приводится схема альтернативного префильтра применительно к самолетам, однако в главе 4 приведены результаты исследований в основном для вертолета (4 задачи пилотирования) в то время, как для самолета рассмотрены 2 задачи точного пилотирования. Для полной оценки эффективности альтернативного префильтра желательно было бы показать результаты оценки следующих задач пилотирования: облет рельефа местности на предельно малых высотах, полет сомкнутым строем, палубная посадка, дозаправка топливом в полете, заход на посадку с предельными параметрами бокового ветра, а также других целевых задач.

2) Так же, судя по автореферату, в главе 2 не отражен вопрос о граничных условиях, допустимых для выполнения онлайн-идентификации по параметрам движения летального аппарата. Неясен вопрос о допустимости онлайн-идентификации при активном маневрировании ($n_y > 2,5$), и в автореферате не отражен вопрос влияния длительности данных, загружаемых в буфер расчета на характеристики запаздывания в контуре «летчик-самолет-система управления».

9) Общество с ограниченной ответственностью «АУРУС-АЭРО», отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан заместителем генерального директора – Главным конструктором ООО «АУРУС-АЭРО», к.т.н. А.Г. Арутюновым, заместителем главного конструктора по КСУ ООО «АУРУС-АЭРО» С.В. Байковым и ведущим инженером-конструктором отдела устойчивости и управляемости, к.т.н. А.Н. Козьяйчевым, утвержден Генеральным директором ООО «АУРУС-АЭРО» А.В. Степиным.

В качестве замечаний можно отметить следующие:

- 1) Из содержания автореферата неясно, какие параметры объекта управления меняются при моделировании отказа.
- 2) В автореферате не указана размерность буфера данных необходимая для корректных вычислений, а также не дано пояснения к параметрам «n» и «m» приведенным в описании выражения (17).
- 3) Для осуществления сравнения разработанного адаптивного алгоритма управления с традиционными средствами улучшения устойчивости выбран устаревший интегральный алгоритм, основанный на управлении по угловой скорости тангажа.

10) Филиал публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация» - ОТА «ОКБ Сухого». **Отзыв положительный**, подписан главным конструктором по аэродинамике, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником А.З. Тарасовым, отзыв утвердил Первый заместитель директора филиала – управляющий директор ОКБ ОТА – директор ОКБ Сухого, кандидат технических наук М.Ю. Стрелец.

В качестве недостатков диссертационной работы Щербакова можно отметить следующее.

1. Нельзя согласиться с автором, что «... в отечественных источниках в целом крайне мало публикаций» по теме его диссертации, так, монография А.С. Галиуллина «Обратные задачи динамики вышла в издательстве «Наука» в 1981 году, позднее опубликовано большое количество работ Крутько П.Д., Харькова В.П и других авторов.

2. В автореферате недостаточно подробно поясняются математические выкладки, так, в формулах (7, 8) приводятся производные сил моментов по углу тангажа, не имеющие физического смысла, при этом какие-либо пояснения отсутствуют.
3. В автореферате не приводятся данных по технологическим аспектам онлайн-идентификации: частотам измерений, точностям датчиков, синхронизации измерительной информации и т.д. Не приводятся также данные реальных натурных экспериментов, подтверждающих достоверность результатов идентификации, не указаны прототипы или типы ЛА самолетного типа, характеристики которых использовались для проведения вычислительных экспериментов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием публикаций в соответствующей сфере исследования, компетентностью, имеющимся у них большим опытом в разработке алгоритмов ручного и автоматического управления летательными аппаратами, в том числе, в области соответствующей паспорту специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки) и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

ФАУ «ЦАГИ» является одной из ведущих организаций авиационной промышленности России в области разработки алгоритмов ручного и автоматического управления летательных аппаратов, аэродинамики, динамики полета и прочности авиационных конструкций. Заключение по диссертационной работе обсуждено и подписано учеными, которые непосредственно занимаются вопросами, связанными с разработкой алгоритмов управления летательных аппаратов различных классов. Баженов С.Г. – начальник НИО-15 НИЦ БП ФАУ «ЦАГИ», доктор технических наук, доцент, автор более чем 40 работ, включая монографию, в том числе по тематике систем управления летательных аппаратов.

Гребенкин Александр Витальевич – автор более 40 работ, имеет зарегистрированные права на результаты интеллектуальной деятельности. Под руководством А.В. Гребенкина проводятся исследования по ручному и автоматическому управлению самолётами транспортной категории, повышению безопасности полёта путём автоматизации управления, а также по анализу посадочных характеристик самолётов в сложных многофакторных условиях полёта.

Верещиков Дмитрий Викторович – автор более 70 научных работ. Под руководством Д.В. Верещикова проводятся исследования по разработке алгоритмов управления полетом самолетов и вертолетов, математическому и стендовому моделированию задач динамики полета.

В дискуссии приняли участие:

Фамилия, имя, отчество	Ученая степень, шифр специальности в совете
Евдокименков Вениамин Николаевич	д.т.н., проф., 2.3.1.
Красильщиков Михаил Наумович	д.т.н., проф., 2.3.1.
Желтов Сергей Юрьевич	д.т.н., Академик РАН, 2.3.1.
Козорез Дмитрий Александрович	д.т.н., проф., 1.2.2.
Константинов Михаил Сергеевич	д.т.н., проф., 2.5.16.
Малышев Вениамин Васильевич	д.т.н., проф., 2.5.16.
Тюменцев Юрий Владимирович	д.т.н., доц., 2.3.1.

Диссертационный совет отмечает, что диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, соответствует паспорту специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки), а **наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем**, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработан алгоритм онлайн-идентификации параметров модели движения ЛА, обеспечивающий получение параметров линеаризованной математической модели в режиме реального времени с проверкой выполнения условий идентифицируемости.

2. Сформированы законы управления регулятора, базирующиеся на принципе обратной динамики, показана целесообразность и эффективность использования упрощенных моделей движения ЛА для построения регулятора.

3. Разработан алгоритм функционирования нелинейного префильтра-гасителя колебаний, который позволяет обеспечивать работу приводов рулей в линейной области и не вводящий дополнительного фазового запаздывания в том случае, если потребные скорости отклонения рулей не превышают располагаемые.

Проведенные исследования являются **новыми**, выносимые автором на защиту результаты исследований получены впервые, а их **новизна** заключается в том, что:

1) Предложен новый алгоритм идентификации параметров линеаризованной модели движения ЛА, использующий обновляемый буфер данных;

2) Выполнен синтез новых законов управления регулятора на основе принципа обратной динамики с использованием существенно упрощенных моделей движения ЛА, которые за счет применения разработанного алгоритма идентификации параметров модели движения ЛА обладают малой чувствительностью к неточности знания математической модели объекта управления;

3) Произведен синтез нового алгоритма нелинейного префильтра-гасителя колебаний, позволяющий не допустить возникновения явления раскачки самолета летчиком за счет уменьшения потребных скоростей отклонения рулей, и не вводящий дополнительного фазового запаздывания в линейной области.

Теоретическая значимость заключается в том, что:

- 1) Предложена процедура онлайн-идентификации параметров линеаризованной модели движения ЛА;
- 2) Обоснована возможность использования упрощенных моделей движения ЛА для синтеза регулятора на основе принципа обратной динамики;
- 3) Совокупность регулятора и алгоритма вычисления параметров математической модели ЛА в режиме онлайн обеспечивает желаемую динамику объекта управления как в штатных условиях, так и при возникновении отказов;
- 4) Предложен вариант нелинейного префильтра, обеспечивающий подавление явления раскачки ЛА летчиком путем существенного уменьшения потребных скоростей отклонения рулей и не вводящий искажений динамики объекта управления в линейной области.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные алгоритмы позволяют обеспечить динамику летательного аппарата как объекта управления в заданных каналах управления, близкую к динамике звена первого порядка, путем синтеза адаптивного закона управления, базирующегося на принципе обратной динамики, тем самым существенно улучшить точность выполнения задач и повысить безопасность пилотирования; обеспечить адаптивные свойства регулятора с учетом действия неопределенностей, а также не допустить возникновения явления раскачки ЛА летчиком путем снижения потребных скоростей отклонения рулевых поверхностей за счет использования нелинейного префильтра.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанные подходы к синтезу алгоритмов управления прошли успешную апробацию при обсуждении на 14 научных конференциях различного уровня.

Основные результаты работы получены и использованы в научно-исследовательских работах, выполнявшихся в МАИ: «Разработка алгоритмов для комплексной системы управления, обеспечивающих заданные пилотажные характеристики» для АО «НЦВ Миль и Камов», «Создание и развитие научного центра мирового уровня «Сверхзвук» по приоритету научно-технического развития «Интеллектуальные транспортные и телекоммуникационные системы, исследование и эффективное освоение геосферы Земли и окружающей Вселенной (космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и

Антарктики)» в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Кроме того, значение полученных соискателем результатов диссертационного исследования для практики подтверждается актами о внедрении результатов диссертации, патентом на изобретение.

Акты о внедрении результатов диссертации:

- 1) Акт о внедрении в АО «НЦВ Миль и Камов» результатов диссертационной работы Щербакова Александра Игоревича.
- 2) Акт о внедрении результатов диссертационной работы Щербакова А.И. в учебную работу МАИ.

Патенты на изобретения:

1. Патент RU2814931C1 «Нелинейный префильтр, обеспечивающий подавление явления раскачки самолета летчиком» / А.В. Ефремов, А.И. Щербаков, Е.В. Ефремов (RU); Правообладатель ФГБОУ ВО МАИ (НИУ) (RU). – заявка №202313217 от 07.12.2023, опубл. 06.03.2024. – EDN CBSKNC.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в организациях, осуществляющих разработку систем управления летательных аппаратов различных классов, таких как АО «НЦВ Миль и Камов», организациях, входящих в состав ОАК, различных ОКБ и других предприятиях, занимающихся разработкой алгоритмов управления самолетов и вертолетов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что основные положения диссертации опираются на современный математический аппарат и согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации. Соискателем разработаны и используются корректные математические модели и алгоритмы. В рамках исследования автором грамотно применены общие и специальные методы теории управления, математического моделирования. Эффективность разработанных алгоритмов и достоверность результатов подтверждается путем проведения экспериментальных исследований на пилотажных стендах, в том числе с привлечением летчика-инструктора к выполнению экспериментов. В ходе исследований было подтверждено улучшение точности выполнения задач пилотирования и обеспечение I уровня пилотажных характеристик по шкале Купера-Харпера.

В диссертации научно обоснованы новые технические решения, имеющие существенное значение для развития авиационной отрасли страны

в части разработки алгоритмов систем управления летательными аппаратами различных классов, таких как самолеты и вертолеты, а именно:

1. Адаптивные законы управления ЛА, базирующиеся на принципе обратной динамики, параметры которых настраиваются с использованием алгоритмов вычисления коэффициентов линеаризованной модели динамики ЛА в режиме онлайн.

2. Алгоритм функционирования нелинейного префильтра-гасителя колебаний, позволяющий не допустить возникновения явления раскачки самолета летчиком путем уменьшения потребных скоростей отклонения рулей.

В ходе защиты были высказаны следующие критические замечания:

1. В алгоритме онлайн-идентификации не оценивается точность вычисляемых коэффициентов математической модели движения летательного аппарата на основе оценки значений элементов матрицы ковариаций и нельзя сделать вывод о том, насколько полученная модель достоверно описывает объект управления.

2. Неясен вопрос, как поведет себя алгоритм идентификации, если в обновляемый буфер данных поступят недостоверные данные с измерителей параметров движения объекта управления.

Соискатель Щербаков А.И. ответил на задаваемые вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Математическое моделирование, а также экспериментальные исследования на пилотажных стендах показали, что точность получаемых коэффициентов линеаризованной модели движения летательного аппарата является достаточной для синтеза адаптивного регулятора на базе принципа обратной динамики.

2. Алгоритм онлайн-идентификации учитывает проверку условий идентифицируемости, которая заключается в оценке определителя информационной матрицы, и в случае невозможности выполнить расчет оценки коэффициентов математической модели движения летательного аппарата замораживаются. Кроме того, поступление недостоверных данных повлияет не только на алгоритм онлайн-идентификации, но и на работу контура управления, что является случаем отказа и должно рассматриваться отдельно.

В диссертационной работе все заимствованные материалы представлены со ссылкой на автора или источник. Тем самым работа удовлетворяет п.14 Положения о присуждении ученых степеней.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 8 докторов наук по специальности 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки), участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Plan

PG

доцент

доцент