

На правах рукописи



Макарин Михаил Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ, ДИНАМИКИ И РАБОЧИХ
ПРОЦЕССОВ АКТИВНОЙ БОКОВОЙ РУЧКИ УПРАВЛЕНИЯ
САМОЛЕТОМ

Специальность: 05.02.02 - "Машиноведение, системы приводов и
детали машин"

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена на кафедре «Системы приводов авиационно-космической техники» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
профессор каф. 702 «Системы
приводов авиационно-космической
техники» МАИ
Самсонович Семён Львович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
зав. каф. «Системы автоматического
управления» ТулГУ
Горячев Олег Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
ФГУП «ЦАГИ»
Яшин Юрий Петрович.

Ведущая организация: ФГБОУ «Московский
технологический университет»
(МИРЭА)

Защита состоится 27 декабря 2017 в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 в Московском авиационном институте по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310)..

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте www.mai.ru

Автореферат разослан «__» _____. 2017

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07



Степанов В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Управление пилотируемыми ЛА невозможно без ручных органов управления. Современные тенденции развития ручных органов управления направлены на создание боковых ручек, взамен традиционных штурвалов и центральных ручек управления.

Боковая ручка управления (БРУ) представляет собой устройство, подобное джойстику, имеющему две степени свободы, которое размещается справа или слева от подлокотника кресла пилота в зависимости от компоновки кабины.

Боковые ручки управления применяются на таких самолетах как F-16 (введен в эксплуатацию в 1978 году), Airbus A-320 (введен в 1988 году), Dassault Rafale (введен в 2001 году), SSJ-100 (введен в 2011 году) и других. Они являются средством улучшения общей эргономики кабины, видимости панели приборов и индикаторов и упрощают доступ к рабочему месту летчика. Однако эти БРУ являются пассивными органами управления, построенными на основе механических пружин и демпферов, не содержат приводных элементов, поэтому, при наличии двух постов БРУ, не могут работать синхронно.

Эти и другие недостатки пассивных БРУ могут быть решены применением активных БРУ, в которых функции загрузчика, демпфера, ограничителя предельных режимов, синхронизации ручек командира и второго пилота будут решаться при помощи интеллектуальной системы управления со следящими приводами в каналах тангажа и крена. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию активных БРУ ведут ведущие зарубежные и отечественные производители органов управления самолетами.

В активных БРУ используются, как правило, электромеханические приводы, которые позволяют паре БРУ работать синхронно. Эта синхронность работы дает пилотам лучшую информационную осведомленность о работе пары БРУ и исключает путаницу при одновременном управлении двумя летчиками за счет того, что система управления БРУ позволяет имитировать наличие механической проводки и реализовать «пересиливание» при управлении. Сдерживают применение активных БРУ технические проблемы, связанные с разработкой приводов, алгоритмов и программного обеспечения, увеличенные по сравнению с пассивными БРУ габариты за счет необходимости резервирования приводов, а также проблемы сертификации, связанные с подтверждением требуемой

интенсивности отказов. Тем не менее, отечественный МС-21 – первый пассажирский самолет с активными БРУ фирмы Ratier Figeac (Франция) – находится на этапе летных испытаний. Перед отечественной промышленностью существует проблема создания активной БРУ для военной авиации, а также импортозамещения в гражданской.

Актуальность проблемы заключается в создании малогабаритных активных БРУ на основе электромеханических приводов.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на привлекательность использования БРУ в бортовых системах управления, пассивным и активным БРУ присущ ряд недостатков, среди которых наличие эффекта «присоединенной массы», заключающийся в том, что колебания самолета по каналу курса могут передаваться в канал крена через руку пилота, непосредственно управляющего самолетом. При этом существующие серийные образцы БРУ являются «пассивными», то есть отсутствует активное нагружение и синхронная работа пары ручек при отклонении одной из них, а также имеет место сложность и громоздкость конструкций используемых в ЛА.

В известных автору работах по активным БРУ не уделено специального внимания влиянию внешних силовых воздействий на ручку управления, наличие которых сказывается на частотных характеристиках приводов БРУ. Автор полагает, что решение проблемы улучшения динамических характеристик приводов и БРУ в целом следует искать в создании новых конструктивно-кинематических схем и способах коррекции управляющих воздействий, формируемых системой управления БРУ.

Перечисленные выше недостатки активных БРУ обусловлены их конструктивно-кинематическими особенностями и расположением в кабине. Кроме того, активные БРУ могут компенсировать «эффект присоединенной массы» за счет реализации специальных алгоритмов в системе управления БРУ.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является исследование кинематики, динамики и рабочих процессов активной БРУ самолетом и создание методики проектирования активной БРУ, которая включает в себя параметрический синтез электроприводов каналов тангажа и крена БРУ, выбор способа коррекции и определение параметров корректирующих устройств, обеспечивающих требуемые динамические характеристики в ручном и автоматическом режимах.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

- Разработать кинематическую схему малогабаритной активной БРУ с помощью морфологического анализа.
- Сформировать требования к приводной системе БРУ.
- Разработать математическую модель, учитывающую конструктивные и динамические особенности БРУ, а также «эффект присоединенной массы».
- Сформировать алгоритмы работы БРУ в различных режимах и переключения между режимами.
- Разработать макетные образцы пары активных БРУ и провести экспериментальные исследования на соответствие результатам математического моделирования.

Научная новизна

- Разработана методика проектирования активной БРУ, которая включает в себя параметрический синтез электроприводов каналов тангажа и крена БРУ, выбор способа коррекции и определение параметров корректирующих устройств, обеспечивающих требуемые динамические характеристики в ручном и автоматическом режимах.
- Предложена кинематическая схема активной БРУ самолета и ее конструктивная реализация с применением электроприводов с волновыми редукторами в каналах тангажа и крена, позволяющая обеспечить функционирование БРУ в ручном и автоматическом режимах, а также работу пары БРУ в режиме синхронизации.

Практическая значимость работы

- Математическая модель активной БРУ, которая позволяет исследовать физические процессы, протекающие в активной БРУ, оценивать динамику приводов БРУ и подбирать параметры корректирующих устройств для обеспечения требуемых динамических свойств.
- Изготовленные макетные образцы активной БРУ и блока управления используются в опытно-конструкторских работах и учебном процессе.

Положения, выносимые на защиту

- Конструктивно-кинематическая схема БРУ на основе электромеханических силовых мини-приводов с расположением их осей на скрещивающихся прямых.
- Математическая модель, учитывающая физические свойства объекта на основе трехмерной модели и адекватно описывающая характеристики в ручном и автоматическом режимах.
- Методика проектирования активных БРУ, основанная на использовании разработанной математической модели, позволяющая

определять параметры корректирующих устройств при различных режимах управления.

Анализ результатов исследования влияния параметров корректирующих и демпфирующих устройств на динамические характеристики приводов БРУ.

Методология и методы исследования

Основой исследования стал морфологический анализ конструктивно-кинематической схемы. В работе использованы результаты работ по силовому мини-приводу, методы твердотельного моделирования при конструировании и методы математического моделирования для исследования режимов работы системы приводов БРУ.

Достоверность полученных результатов

Основные положения и результаты, полученные в диссертационной работе, проверены путем сопоставления результатов, полученных с помощью компьютерного математического моделирования в среде MATLAB, с результатами экспериментов на макетном образце БРУ.

Реализация результатов

Материалы диссертационной работы использованы в курсе «Компьютерные технологии», курсовом и дипломном проектировании на кафедре 702 «Системы приводов авиационно-космической техники» московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Результаты диссертационной работы использовались в научно-исследовательских работах:

- 49270-07020 «Проведение вычислительных экспериментов и подготовка испытаний макетов и демонстраторов. Испытания макетов и демонстраторов и разработка технических предложений по архитектуре систем управления перспективных пассажирских летательных аппаратов» (заказчик – федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»);

- ТО-31 «Теоретические и экспериментальные исследования по созданию активной ручки управления самолетом для кабины с двумя постами управления» (заказчик – акционерное общество «Московский научно-производственный комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского»).

Внедрение результатов диссертационной работы в научно-исследовательские работы и в учебный процесс Московского авиационного института и МПНК «Авионика» подтверждено актами.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры №702 Московского авиационного института, конференциях и симпозиумах:

XXII, XXIII, XXIV Международных научно-технических семинарах «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». г. Алушта, сентябрь 2013, 2014, 2015 гг.

XIX, XX, XXI, XXII, XXIII Ежегодных научных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, г. Москва, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.

XIII, XV Международных научно-технических конференциях «Авиация и космонавтика» МАИ, г. Москва, 2014, 2016 гг.

X Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», МАИ, г. Москва, 2015 г.

XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань 20-24 августа 2015 г.

Международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения». «АПИР-2015», СевГУ, г. Севастополь, 2015 г.

XLII, XLIII Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения», МАИ, г. Москва 2016, 2017 гг.

III Всероссийской научно-технической конференции «Мехатронные системы» ТулГУ, г. Тула, 2016 г.

XXXIII Международной конференции «More electric aircraft» г. Тулуза, 3-5 февраля 2015 г.

VII международной научно-технической конференции «Recent advances in aerospace actuation systems and components» INSA, г. Тулуза, 16-18 марта 2016 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 патента Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 110 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 44 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, поставлены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость работы.

В первой главе проводится обзор и анализ схем и конструкций современных авиационных боковых ручек управления, показаны направления развития БРУ как для гражданских, так и для военных самолетов. Впервые БРУ появились на военных самолетах с электродистанционной системой управления (ЭДСУ), в которых посадка пилота в кресле близка к горизонтальной для того, чтобы уменьшить разность высоты сердца и головного мозга и тем самым улучшить переносимость больших перегрузок. По этой причине конструкторам пришлось отказаться от центральной ручки управления самолетом (РУС) в пользу БРУ. Проведенный обзор показывает, что в настоящее время перспективными решениями являются активные БРУ. Схемы типов БРУ показаны на Рисунке 1.

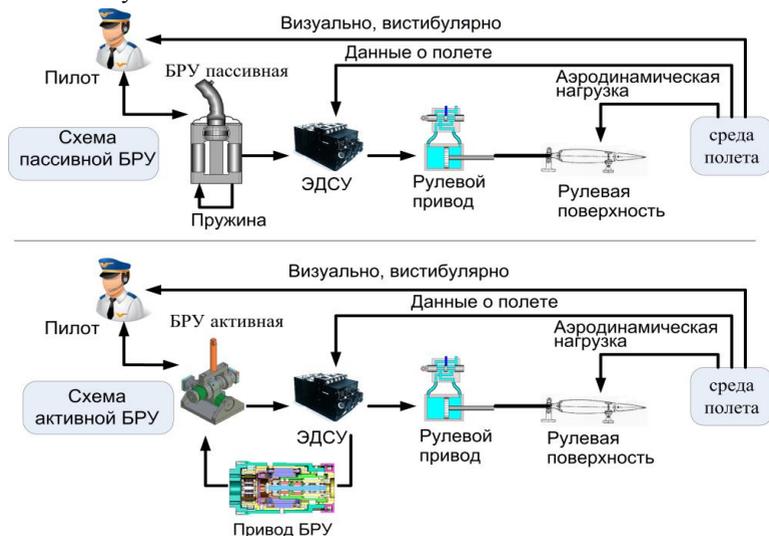


Рисунок 1 – Функциональные схемы БРУ

Из обзора существующих схемотехнических решений следует, что организация обратной связи по усилию имеет преимущество перед обратной связью по положению, т.к. имеет более высокое быстродействие. Описано появление "эффекта присоединенной массы", который заключается в том, что колебания в канале курса могут предаваться в канал крена, и показана необходимость введения ограничителя опасных режимов.

В результате анализа опубликованных работ и существующих образцов активных БРУ фирм "Stirling dynamics", "BAE Systems", "Safran", "Ratier-Figeac", сделан вывод о том, что применение активных БРУ возможно на самолетах с ЭДСУ при условии жесткого ограничения опасных режимов, позволит повысить уровень информационной осведомленности летчика и улучшить эргономические свойства кабины.

Во второй главе диссертационной работы представлен морфологический анализ схемных и конструктивных решений образцов БРУ, конструктивно-кинематические схемы которых показаны на Рисунке 2.

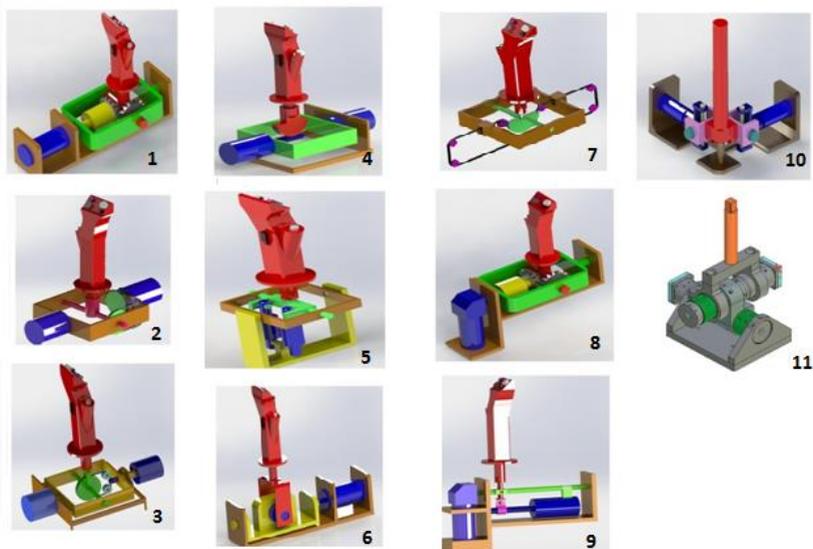


Рисунок 2 – конструктивно-кинематические схемы вариантов исполнения БРУ

Каждая БРУ содержит рамку с двумя перпендикулярными осями, образующими шарнир относительно корпуса. В схемах 1, 6, 8, 9 – один привод размещен внутри рамки, другой снаружи, в схемах 2, 3, 4, 7 приводы размещены снаружи рамки, в схемах 5, 10 оба привода размещены снаружи рамки. В схеме 11 корпуса приводов расположены на скрещивающихся осях и их корпуса образуют шарнир с двумя степенями свободы без вспомогательной рамки. Достоинства компоновки №11 послужили основой для ее конструктивной проработки.

Построение исполнительных механизмов по принципу силового мини-привода, дает наилучшие массогабаритные показатели в силу достоинств

волновых передач с телами качения, кроме того, в конструкции силового мини-привода используются бесколлекторные электромоторы на основе редкоземельных элементов, что дает большие крутящие моменты и увеличивает ресурс, а бесконтактные датчики положения, которые встроены в полость передачи, дают выигрыш в габаритах при компоновке.

Исходя из функционального назначения разрабатываемого образца БРУ, были описаны следующие алгоритмы и режимы работы:

1. Алгоритм "Пружина с демпфером". Применяется к ведущей ручке, то есть к той, с помощью которой пилот осуществляет управление самолетом. Приводная система БРУ создает противодействующий крутящий момент на ручке в зависимости от величины угла, вектора и скорости ее отклонения. При снятии воздействия руки пилота ручка возвращается в нейтральное положение с определенной максимально разрешенной скоростью.

2. Алгоритм «Автоматическое управление». Применяется к ведомой ручке (ручкам), то есть к той, которая не принимает участия в управлении самолетом, например, при работе автопилота. Алгоритм обеспечивает перемещение БРУ в заданное положение с установкой в этом положении без участия летчиков. Управляющим сигналом для обеих БРУ является требуемый угол отклонения, поступающий из внешней системы.

3. Алгоритм «Синхронизация», Предназначен для повторения одной БРУ перемещения другой БРУ. Управляющим сигналом для ведомой БРУ является измеренный угол отклонения ведущей БРУ. Режим «Синхронизация» может быть активен только на неприоритетной ручке. Для неприоритетной ручки режим «синхронизация» схож с режимом «автоматическое управление» с установкой в виде текущего положения отклонения приоритетной ручки.

Алгоритмическая схема переключения режимов представлена на Рисунке 3.

Данные режимы управления реализуются при отсутствии датчиков усилия (момента) на рукоятке, а требуемый момент ведущей БРУ вычисляется как функция угла отклонения рукоятки, исходя из заданных требований жесткости «виртуальной пружины».

При наличии датчиков усилия (момента) обе БРУ могут работать в режиме постоянного «пересиливания». То есть, если управляют одновременно оба пилота, а один прикладывает большее усилие, чем другой, то обе БРУ отклоняются на угол, пропорциональный сумме усилий. Режим пересиливания предназначен для имитации наличия механической проводки между органами управления для исключения возможной путаницы с приоритетами «ведущая-ведомая».

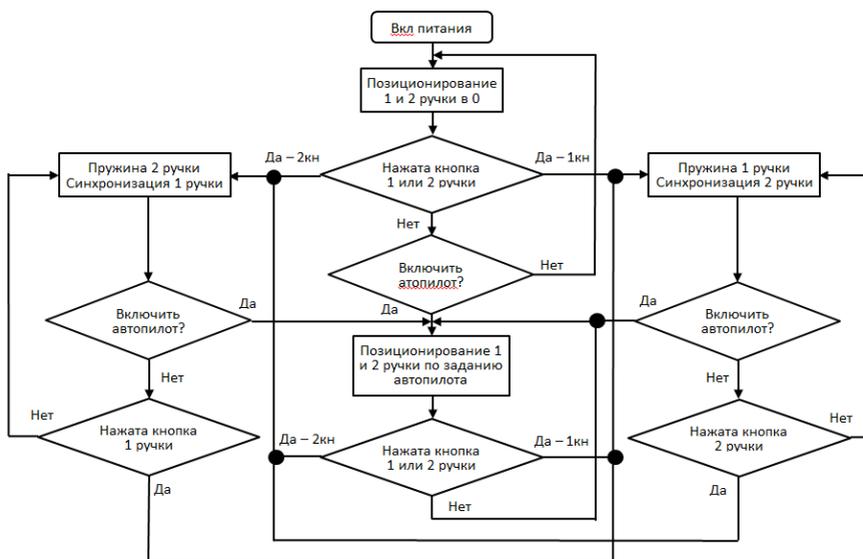


Рисунок 3 – Алгоритмическая схема переключения режимов работы БРУ

Исходя из требований эргономики при кистевом управлении были сформулированы требования приводной системе макета БРУ:

- Ход ручки составляет $\pm 15^\circ$ для обоих каналов
- Максимальная скорость отклонения $\pm 30^\circ/\text{с}$
- Максимальные развиваемые крутящие моменты, при длине рычага 0,1 м, длительные: 2,4 Н·м в канале крена, 3,5 Н·м – в канале тангажа
- усилие страгивания (предварительная затяжка) 0,3 кгс для канала крена, 0,5 кгс для канала тангажа
- коэффициент жесткости лежит в диапазоне от 0,14 Нм/ $^\circ$ до 0,2 Нм/ $^\circ$ для каналов крена и тангажа соответственно.

Проведен параметрический синтез исполнительных приводов, определена их мощность и диапазон передаточных чисел. Параметрический синтез стал основой для конструкторской проработки и создания трехмерной модели, показанной на рисунке 4, по которой был определен ряд конструктивных параметров, таких как моменты инерции приводов и жесткость валов. Разработана конструкторская документация для изготовления макетного образца.

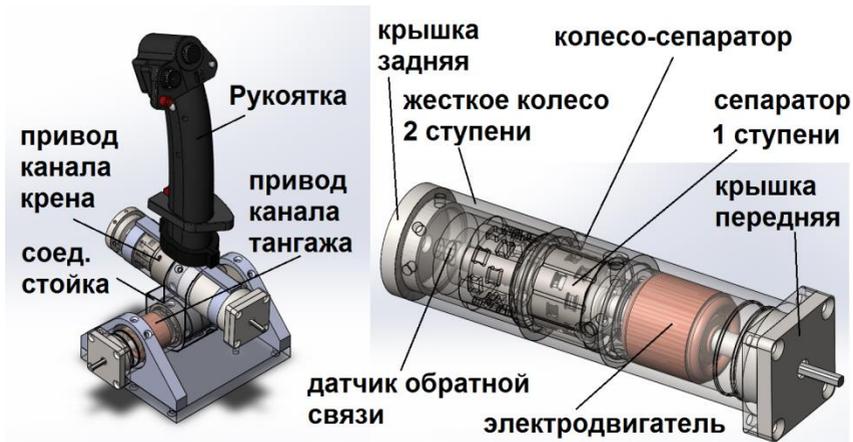


Рисунок 4 – Вид модели макета БРУ (слева) и привода БРУ (справа)

В третьей главе описывается разработка комплексной математической модели привода БРУ, управление которым может осуществляться двумя способами: в автоматическом режиме, замыкая контур управления по положению выходного звена и в режиме "ручного" управления, замыкая контур управления по усилию (крутящему моменту), приложенному к выходному звену.

Модель привода описана с применением пакета прикладных программ MATLAB и включает в себя модель вентильного электродвигателя, реализованную средствами SimPowerSystems, "физическую" модель, отражающую взаимосвязи между деталями, реализованную средствами Simscape и систему управления и контроля, реализованную средствами Simulink. Общая структура модели привода показана на Рисунке 5.

Модель электродвигателя приведена на Рисунке 6.

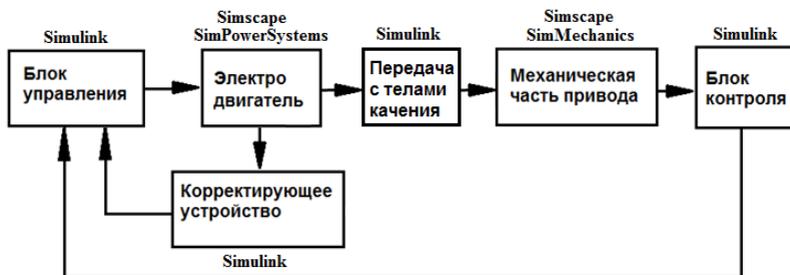


Рисунок 5 – Структура модели электромеханического привода

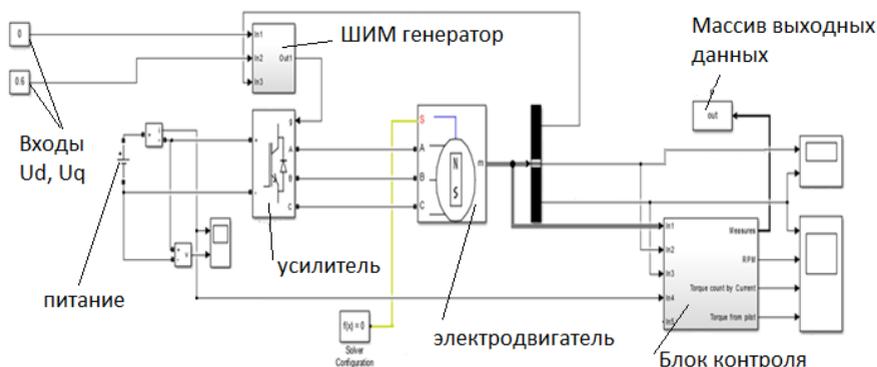


Рисунок 6 - модель вентильного электродвигателя.

При разработке модели электродвигателя приняты следующие допущения:

- отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали;
- обмотки статора абсолютно симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Блок контроля параметров электродвигателя формирует массив данных, содержащий угол поворота ротора, скорость вращения, токи на фазах и развиваемый крутящий момент. Данные величины передаются в блок корректирующего устройства и в блок передачи с телами качения, математическая модель которой описывается с помощью дифференциальных уравнений, реализованных средствами Simulink.

Модель механической части привода реализована в среде Simscape и представляет собой отображение деталей привода полученных из твердотельной модели с сохранением их физических параметров и сопряжений между деталями привода.

Для деталей сохраняются свойства такие, как масса, момент инерции, геометрические размеры. В блоки механических сопряжений могут вводиться значения трения, состояние в начальный момент времени и управляющие сигналы от внешних источников: угол или крутящий момент. Каждая деталь имеет свою систему координат, в которой она построена. Совокупность отдельных деталей объединяется локальной системой координат объекта моделирования (механического редуктора), которая в свою очередь связана с общей системой координат привода.

Анализ частотных характеристик, полученных в результате

моделирования, позволил скорректировать контуры управления, как при автоматическом, так и при ручном управлении. Для автоматического управления исследовались способы коррекции с помощью аperiodического и колебательного звеньев с различными параметрами, и был разработан инвариантный компенсатор. Для ручного управления исследовались способы восстановления устойчивости системы без потери быстродействия. Установлено, что введение демпфирования при ручном управлении является ограничителем частот, эквивалентным корректирующему устройству при автоматическом управлении.

В результате математического моделирования выявлено, что для работы системы в режиме автоматического управления необходимо уменьшение ширины полосы пропускания с помощью корректирующего устройства - частотного фильтра, а для устойчивой работы без потери быстродействия в «ручном» режиме необходимо демпфирование пропорциональное скорости.

Для решения указанной задачи был разработан компенсатор с использованием принципа инвариантности, который был описан академиком Б.Н. Петровым в 1961 г, а в 2008 г. принцип был успешно реализован на новом технологическом уровне профессором каф.702 Ермаковым С.А.

В основе решения лежит использование модельного канала электродвигателя со структурой, которая показана на Рисунке 7.

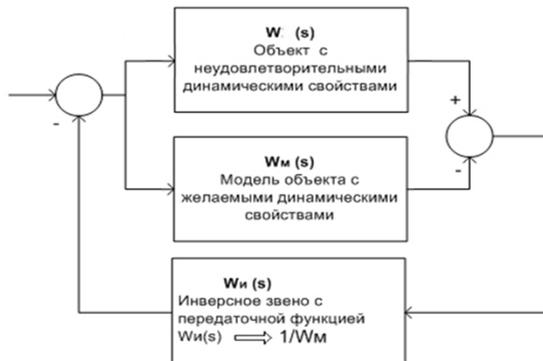


Рисунок 7 - структура модельного канала

Физический смысл работы компенсатора заключается в следующем: задавая желаемые динамические свойства модели электродвигателя, и производя корректировку параметров инверсного звена можно влиять на частотные характеристики привода, а также увеличивать стабильность работы при изменении внутренних и внешних его параметров. То есть модель модель "навязывает" свои динамические свойства объекту.

В четвертой главе получена комплексная математическая модель БРУ и проведено моделирование работы как одной, так и пары БРУ в различных режимах. Общий вид комплексной математической модели показан на Рисунке 8.

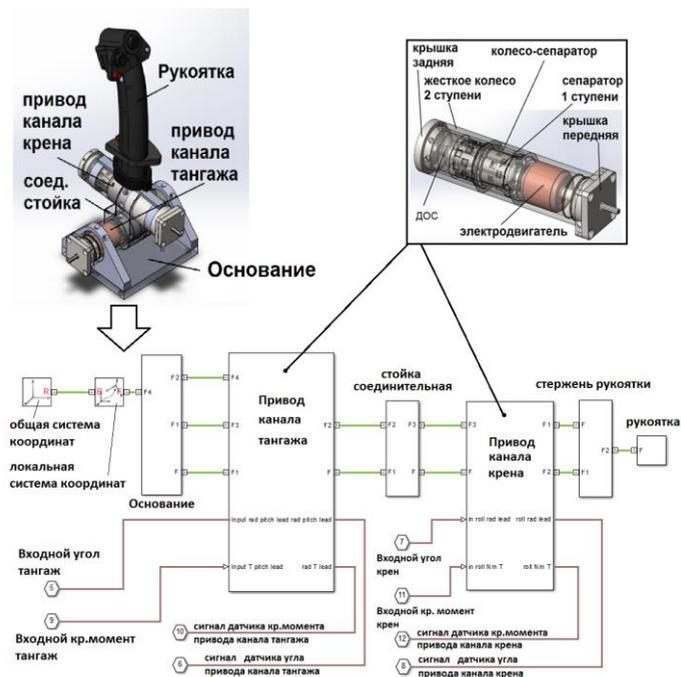


Рисунок 8 – Общий вид комплексной математической модели БРУ

Путем анализа динамических свойств БРУ с помощью частотных характеристик было выявлено, что для обеспечения требуемой динамики БРУ при работе в режиме автоматического управления, необходимо корректирующее устройство, параметры которого были подобраны таким образом, чтобы ширина полосы пропускания системы была не более 2 Гц. Ширина полосы пропускания выбрана равной 2 Гц, т.к. превышение этого значения соответствует угловой скорости движения рукоятки при резком рывке летчиком. Таким образом, с помощью корректирующего устройства была получена устойчивая система, способная отработать резкое изменение угла поворота рукоятки. Моделирование выявило, что ограничивать полосу пропускания лучше с использованием инвариантного компенсатора, т.к. его влияние вносит меньшие амплитудно-фазовые искажения.

В режиме ручного управления было исследовано влияние "эффекта присоединенной массы" на динамические свойства БРУ и определены

коэффициенты демпфирования и вид характеристики демпфера. Установлено, что для отсутствия колебательности и соответствия требованиям по быстродействию необходимо введение демпфера с линейной характеристикой и коэффициентами демпфирования равными $6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{рад}/\text{с}$ для канала тангажа и $5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{рад}/\text{с}$ для канала крена, что показано на Рисунке 9.

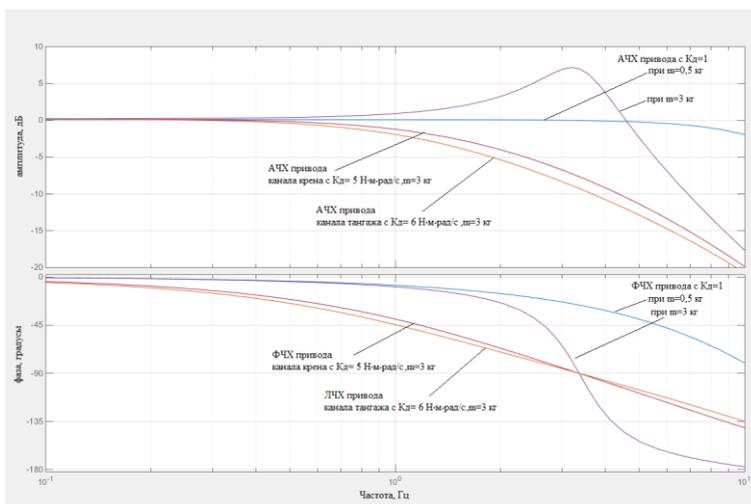


Рисунок 9 – Частотные характеристики приводов БРУ с учетом влияния "эффекта присоединенной массы"

В результате проведенной работы была создана методика проектирования БРУ, включающая в себя основные этапы при проектировании, и рекомендации по выбору типа и параметров корректирующих устройств для обеспечения требуемых динамических характеристик в ручном и автоматическом режимах.

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям изготовленных макетов БРУ. Цель испытаний макетного образца БРУ состоит в определении соответствия статических и динамических характеристик изделия результатам математического моделирования. Внешний вид макетов БРУ представлен на Рисунке 10. Каждый пост управления БРУ имеет габариты $220 \times 260 \times 200 \text{ мм}$, массу 4 кг и диапазон рабочих углов $\pm 15^\circ$ для каждого канала.

Для проведения испытаний и управления макетами БРУ был разработан электронный блок управления (ЭБУ) на основе 32 разрядного микроконтроллера STM32F405RG фирмы ST microelectronics. Для отработки взаимодействия ЭБУ и моделирующего стенда, разработано специальное программное обеспечение для персонального компьютера – далее ПО «монитор-автопилот». ПО позволяет отображать на стрелочных индикаторах в реальном

времени основные параметры работы, телеметрии БРУ, управлять перемещением каждой из осей ручек в режиме автоматического управления как по законам движения с заданными параметрами: синусоидальный, пилообразный, ступенчатый, так и по произвольному потоковому заданию. Также ПО «монитор-автопилот» позволяет устанавливать значения коэффициентов и параметров имеющихся алгоритмов управления БРУ. Интерфейс указанного ПО показан на Рисунке 11.

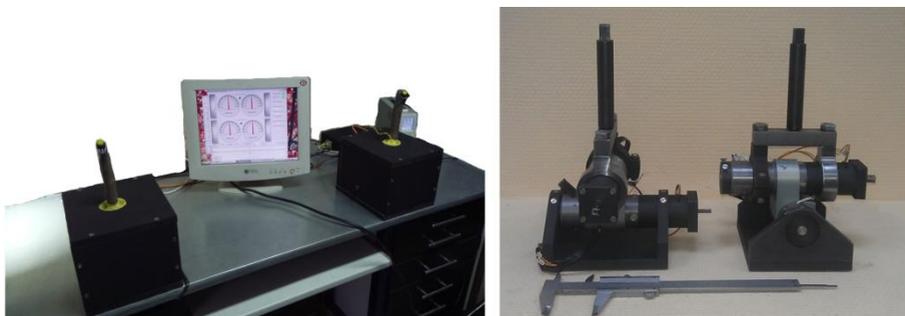


Рисунок 10 – Фото макета БРУ (слева), со снятыми защитными кожухами (справа)



Рисунок 11 – Интерфейс ПО "Монитор-автопилот"

ПО «монитор-автопилот» совместно с прототипами ЭБУ и БРУ позволяют моделировать автономную или совместную работу двух БРУ в заданных режимах, разрабатывать и отлаживать различные алгоритмы и логику работы, разрабатывать принципы парирования возможных отказов (электрических и механических).

Передача управляющих команд от внешней системы к ЭБУ происходит по мере необходимости в одностороннем порядке без подтверждения приема от ЭБУ. Результат выполнения команды анализируется по данным телеметрии

В испытательный стенд входит нагрузочатель, используемый для снятия характеристик приводов БРУ, который включает в себя привод, порошковую муфту и датчик момента. Порошковая муфта регулирует передаваемый момент.

Блок питания предназначен для обеспечения электропитанием элементов стенда. Блок управления осуществляет контроль и управление приводами БРУ, контроль и управление нагрузочателем, и осуществляет обмен данными с персональным компьютером (ПК).

Макет БРУ механически соединяется с нагрузочателем через качалку, при этом макет БРУ может располагаться по отношению к нагрузочателю таким образом, чтобы снимать характеристики приводов соответствующих каналов.

В результате экспериментальных исследований были получены характеристики жесткости "пружины", и характеристики демпфирования, показанные на Рисунках 12 и 13 соответственно

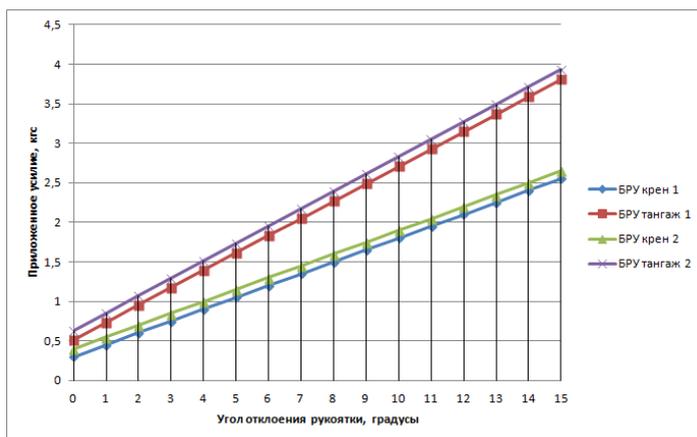


Рисунок 12 – Характеристики демпфирования БРУ

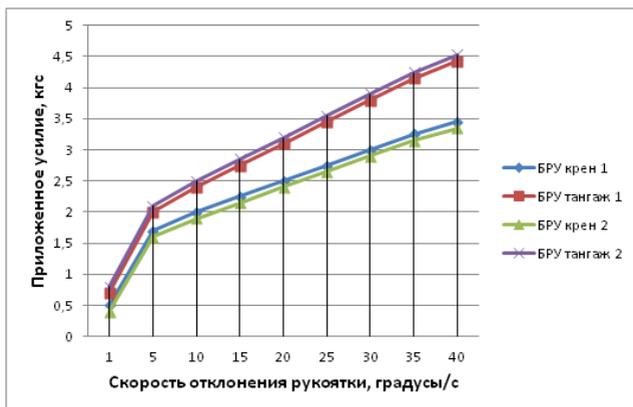


Рисунок 13 – Характеристики демпфирования БРУ

Эксперименты показали, что макеты БРУ в режиме «пружина с демпфером» развивают противодействующие усилия, соответствующие результатам математического моделирования.

Частотные характеристики получены для каждого канала управления методом осциллографирования. На вход приводов БРУ подавался сигнал с фиксированной амплитудой, а частота менялась в диапазоне 0,3-5 Гц. Характеристики представлены на Рисунке 14.

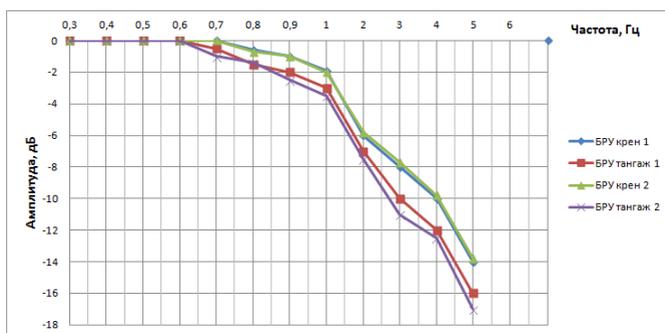


Рисунок 14 – Частотные характеристики приводов БРУ

Из частотных характеристик видно, что ширина полосы пропускания приводов составляет частоты $2 \pm 0,1$ Гц, что соответствует результатам математического моделирования.

Таким образом проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что разработанная комплексная модель является информативным способом исследования динамики БРУ методом

математического моделирования и позволяет существенно сократить затрачиваемое время на разработку макетного образца.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ,

В итоге проведенного исследования получены следующие результаты:

- Предложена и запатентована конструкция активной БРУ с исполнительными механизмами, построенными на основе силовых мини-приводов, которые расположены так, что их продольные оси образуют карданный шарнир.
- Сформированы требования к режимам работы БРУ и алгоритм переключения между режимами работы.
- Проведен анализ требований к приводной системе БРУ. На основании физиологических особенностей ручного управления рассчитаны требуемые энергетические параметры приводной системы БРУ, определяющие облик и габаритные параметры исполнительных механизмов БРУ.
- Разработана математическая модель активной БРУ на основе электромеханических приводов с волновыми передачами с телами качения. Модель позволяет исследовать динамику работы БРУ при различных значениях параметрах элементов БРУ в двух режимах работы (ручном или автоматическом), исследовать влияние корректирующих устройств и исследовать совместную работу пары активных БРУ.
- Создана методика проектирования БРУ, включающая в себя поэтапное решение задач проектирования.
- Проведены экспериментальные исследования макетных образцов БРУ в ручном и автоматическом режимах работы. Сравнение экспериментальных данных и результатов математического моделирования подтверждает адекватность разработанной математической модели задачам настоящего исследования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные труды, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Ларин А.П. Разработка боковой ручки управления самолетом на основе электромеханических силовых мини-приводов // Вестник Московского авиационного института, том 22 №4, 2015 - С. 7-20.
2. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Огольцов И.И., Степанов В.С., Рожнин Н.Б., Крылов Н.В. Повышение безопасности полета и посадки самолета в

экстремальных ситуациях за счет использования электромеханического силового мини-привода с разнородным резервированием управления // *Авиационная промышленность* №1, 2016 г - С. 19-24.

3. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Лалабеков В.И., Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Степанов В.С., Крылов Н.В., Борисов М.В., Красковский Н.В. Перспективные методы уменьшения массогабаритных параметров приводных систем при проектировании // *Вестник машиностроения* №8, 2016. - С.35-42.

Другие научные труды по теме диссертации:

4. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Огольцов И.И., Крылов Н.В., Ларин А.П., Рожнин Н.Б., Степанов В.С., Оболенский Ю.Г., Кривко В.А., Дмитриев А.В. Боковая ручка управления самолетом. Патент РФ №2571992 Оpubл. 27.12.2015, Бюл. №36

5. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Огольцов И.И., Крылов Н.В., Ларин А.П., Рожнин Н.Б., Степанов В.С., Оболенский Ю.Г., Кривко В.А., Дмитриев А.В. Система управления жизненно важными рулевыми поверхностями самолета. Патент РФ №2572011 Оpubл. 27.12.2015, Бюл. №36.

6. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Оболенский Ю.Г., Кривко В.А. Тенденции развития приводов боковых ручек управления самолетом. Сборник «Материалы XXII международного научно-технического семинара Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», г. Алушта - М.: Издательский дом МЭИ, 2013 г.

7. Макарин М.А. Самсонович С.Л., Оболенский Ю.Г., Кривко В.А. О построении кинематических схем боковых ручек управления самолетом. Сборник «Материалы XIX ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, - М.: ООО «ТРП», 2013 г.

8. Макарин М.А., Самсонович С.Л. Схемные и конструктивные особенности построения боковых ручек управления летательными аппаратами. Сборник «Материалы XX ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, - М.: ООО «ТРП», 2014 г.

9. Макарин М.А. Самсонович С.Л., Лалабеков В.И., Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Степанов В.С., Борисов М.В., Красковский Н.В., Крылов Н.В. Комплексный подход к проектированию приводных систем для обеспечения наименьших массогабаритных показателей. Труды XII всероссийского совещания по проблемам управления ИПУ РАН, г. Москва, 2014 Электронный ресурс, ВСПУ ИПУ РАН им. Трапезникова, 2014 URL:<http://vspu2014.ipu.ru/prcdngs>

10. Макарин М.А. Самсонович С.Л., Ларин А.П. Сравнение кинематических схем боковых ручек управления самолетом // *Материалы XXIII международного*

научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», г Алушта, - М.: Издательский дом МЭИ, 2014г.

11. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Огольцов И.И. Повышение надежности полета самолета за счет использования электромеханических силовых мини-приводов для управления аэродинамическими поверхностями и в боковых ручках управления // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Авиация и космонавтика» МАИ, г. Москва, СПб.: ООО «Принт-салон», 2014 С.509-511

12. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Шошин М.П. О выборе кинематической схемы боковой ручки управления самолетом // Материалы XXI ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, - М.: ООО «ТРП», 2015 г.

13. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Огольцов И.И., Степанов В.С., Рожнин Н.Б., Крылов Н.В. Design of embedded electromechanical power hinge mini actuator for electric aircraft concept) Сборник трудов международной конференции «More electric aircraft XXXIII», MEA, Toulouse 2015 г.

14. Макарин М.А., Самсонович С.Л. О разработке активной боковой ручки управления самолетом // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», МАИ Москва, - М.: МАИ, 2015 С. 201-203.

15. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Борисов М.В., Крылов Н.В., Степанов В.С. О передачах с телами качения для электромеханических приводов «более электрического самолета» // Сборник трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань, Изд-во казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 2420-2422.

16. Макарин М.А., Ларин А.П., Самсонович С.Л., Оболенский Ю.Г. Сравнение алгоритмов управления боковыми ручками управления самолетом при задании приоритета управления // Материалы XXIV Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» г Алушта, -М.: Издательский дом МЭИ, 2015 г.

17. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Крылов Н.В., Степанов В.С., Борисов М.В., Красковский Н.В. Электромеханические силовые мини-приводы для более электрического самолета // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения». «АПИР-2015», г. Севастополь Изд-во СевГУ, 2015, С.28-30.

18. Макарин М.А., Самсонович С.Л. Повышение отказобезопасности системы рулевых приводов за счет разнородных каналов управления // Материалы XXII ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические

проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, ООО «ТРП», 2016 г. С.155-166.

19. Макарин М.А., Самсонович С.Л. Обоснование целесообразности применения боковых ручек управления на перспективных самолетах. Сборник тезисов докладов XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» Том 2, МАИ, Москва, 2016, С. 25-26.

20. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Огольцов И.И., Степанов В.С., Рожнин Н.Б., Крылов Н.В. Possibility of increasing flight safety level by using actuators with dual control: electrical and mechanical // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Recent advances in aerospace actuation systems and components» INSA, Institut National des Sciences Appliquees de Toulouse, г. Тулуза, 2016.

21. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Степанов В.С., Крылов Н.В., Борисов М.В. Электромеханические силовые мини-приводы вращательного действия для «более электрифицированного самолета» // Труды научно-технической конференции «Электрификация летательных аппаратов», -М.: ИД Академии Жуковского, 2016. С. 162-168.

22. Макарин М.А., Самсонович С.Л., Формулирование требований к приводной системе боковых ручек управления самолетом // Тезисы 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика», г. Москва, типография «Люксор», 2016 г, С.458-460.

23. Макарин М.А. Самсонович С.Л. Ларин А.П. Рожнин Н.Б. Расчет основных параметров активных ручек управления летательного аппарата // Вестник Тульского государственного университета, Выпуск 1, г. Тула, Издательство ТулГУ, 2016, С122-125.

24. Макарин М.А., Самсонович С.Л. Математическая модель электромеханического привода боковой ручки управления на основе твердотельной модели и пакета Matlab SimMechanics // Материалы XXIII ежегодного научного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, - М.: ООО «ТРП», 2017 г. С 168-171.

