



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ»

Россия, 125319, Москва, ул. Викторенко, 7
Тел.: (499) 157-70-47
Факс: (499) 943-86-05

Дата 16.01.18

г. Исх. № 0000-мск/91

Ученому секретарю
Диссертационного совета Д212.125.12

А.В. Старокову

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4,
Ученый совет МАИ

Уважаемый Александр Владимирович!

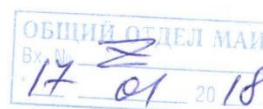
Направляю Вам отзыв официального оппонента на диссертацию Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов.

Приложение:

- отзыв официального оппонента на диссертацию Баженова С.Г. на 6 листах (2 экз.).

Ученый секретарь
д.т.н., профессор

С.М. Мужичек



ОТЗЫВ

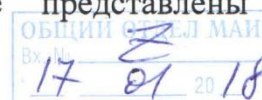
официального оппонента
на диссертацию Баженова Сергея Георгиевича
на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов»,
представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Актуальность. Этапными самолетами для развития отечественной авиации были Ту-204 и Ил-96-300, где впервые были широко применены системы цифровой авионики. Начиная с них, и по настоящее время практически все современные самолеты оборудованы цифровыми электродистанционными системами управления (СДУ) и цифровым пилотажно-навигационным оборудованием (комплекс стандартного пилотажного навигационного оборудования – КСПНО-204/96 и далее интегрированный комплекс бортового оборудования – ИКБО-95). При их разработке возникло много проблем, связанных с цифровой реализацией системы управления, особенности которой влияют, в том числе, и на устойчивость и управляемость самолета. Необходимо учитывать временные запаздывания в каналах системы управления, дискретность по времени и уровню, многоканальность, асинхронность выполнения операций между каналами резервированной СДУ и внутри каждого канала, многотактность, т.е. использование различных частот обновления сигналов, выравнивание интегралов и фильтров для предотвращения «разбегания» процессов в разных каналах СДУ. Оценка запасов устойчивости и характеристик управляемости, расчет эталонных характеристик для стендовой отработки должны учитывать эти особенности и в точной постановке являются чрезвычайно сложными задачами. Кроме того, необходимо согласование состояний каналов СДУ и обеспечение эффективной работы системы контроля для предотвращения ее ложных срабатываний и несрабатываний. Для этого требуется разработать принципы и алгоритмы синхронизации состояний каналов, а также правильно выбирать пороги срабатывания, основываясь на оценке рассогласований между контролируемыми сигналами, что также требует учета вышеупомянутых особенностей СДУ.

Объектом исследования являются сложные цифровые системы дистанционного управления современных неманевренных самолетов с высоким уровнем автоматизации управления.

Предметом исследования являются методы теоретического анализа и экспериментального тестирования СДУ высокоавтоматизированных современных самолетов, особенности динамики СДУ и устойчивость системы «самолет-СДУ», методы синхронизации состояний и выравнивания значений интегралов и фильтров разных каналов СДУ, оценка их влияния на динамические свойства и на устойчивость системы «самолет-СДУ».

Общая характеристика диссертации. В работе представлены



основные полученные автором результаты анализа цифровых СДУ современных самолетов, причем особое внимание уделено учету влияния многоканальности, асинхронности, многотактности и выравнивания информации между каналами на динамические характеристики как самой СДУ, так и замкнутой системы «самолет-СДУ». Также большое внимание уделено вопросам построения системы контроля, получению и анализу распределений контролируемых сигналов, их использованию для выбора параметров системы контроля, методам оценки вероятности несрабатывания и ложного срабатывания алгоритмов контроля.

Цели работы. Работа направлена на создание и совершенствование теоретического аппарата для исследования цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления и научного сопровождения создания систем дистанционного управления высокоавтоматизированных самолетов транспортной категории.

Основное содержание работы. Работа включает введение, пять глав, заключение и два приложения.

В первой главе сделан обзор текущего технического уровня цифровых систем управления самолетов транспортной категории, определены основные особенности их построения и функционирования. Описан современный подход к разработке высокоинтегрированных цифровых систем, рассмотрены основные требования, предъявляемые к динамике самолета с СДУ, и реализация которых возможна только с помощью цифровых дистанционных систем управления. Детально описан функционал систем авионики, относящихся к ручному управлению современных транспортных самолетов, в числе которых обеспечение заданных характеристик управляемости, автобалансировка, ограничение ряда параметров движения, парирование возмущений при реконфигурации и отказах, совмещенное управление.

Во второй главе рассмотрена динамика асинхронной одноканальной системы управления с учетом реальных временных циклограмм работы основных каналов информационных потоков. Обоснованы максимальные величины допустимых запаздываний в информационно-управляющих трактах. Эти предельные запаздывания для каналов обратной связи по угловым скоростям и перегрузкам определены исходя из требования устойчивости системы «самолет-СДУ» и обеспечения заданных характеристик переходных процессов. Для других сигналов предельные запаздывания выбираются исходя из необходимости построения эффективной системы контроля. Для этого проведена оценка распределений рассогласований между каналами резервированной СДУ с учетом составляющей, обусловленной асинхронной работой каналов системы, что позволило провести оценку максимальных допустимых периодов обновления информации.

В третьей главе приведена наиболее содержательная часть работы, а именно, рассмотрено влияние асинхронности, выравнивания информации

между каналами и многотактности на устойчивость и динамические характеристики многоканальной цифровой системы управления. Показано, что, в общем случае, из-за асинхронности каналов СДУ система «самолет-СДУ» не может рассматриваться как одноканальная система, и требует применения методов многосвязных систем (ММО – Multiple Input Multiple Output). Вследствие этого передаточная функция, определяющая устойчивость замкнутой системы «самолет-СДУ» отличается от передаточной функцией системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части. Выявлен факт нелинейной зависимости передаточной функции, определяющая устойчивость замкнутой системы «самолет-СДУ» от коэффициентов усиления, что ведет к искажению понятий запасов устойчивости по амплитуде и фазе. Также доказано, что линейная часть передаточной функции, определяющая устойчивость замкнутой системы «самолет-СДУ», совпадает с передаточной функцией системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части, что может быть использовано для расчета эталонных частотных характеристик при квалификационных испытаниях реальных СДУ. Исследовано влияние выравнивания сигналов типовых звеньев на их эквивалентные характеристики. Так, осреднение выходных управляющих сигналов эквивалентно дополнительному запаздыванию, выравнивание интегральных сигналов ведет к изменению коэффициента при интеграле, а выравнивание выходного сигнала апериодического фильтра меняет постоянную времени фильтра. Для двухканальной системы для описания этих эффектов получены аналитические выражения.

В четвертой главе рассмотрены вопросы динамики для более сложного случая многотактных систем. Показано, что важной особенностью таких систем является наличие большого количества возможных циклограмм работы, причем для каждой реализуемой циклограммы работы справедлива своя передаточная функция системы. Выделено два вида многотактности, при которых разные сигналы рассчитываются с разными частотами, либо для расчета одного и того же сигнала в разные моменты времени используются разные алгоритмы. Разработаны универсальные методы расчета динамических характеристик цифровых систем, позволяющие учесть оба вида многотактности. Разработан подход к анализу многосвязных цифровых систем управления с помощью расчета собственных значений матрицы передаточных функций системы, разомкнутой по границе цифровой и непрерывной частей. Разработанные расчетные методы демонстрируются на ряде примеров типовых систем управления, включая отказные ситуации и реконфигурацию управления.

В пятой главе рассмотрены проблемы построения эффективной системы мониторинга и обеспечения согласованной работы каналов СДУ. Разработаны алгоритмы выравнивания значений интегральных звеньев и синхронизации дискретных сигналов, определяющих состояние каналов цифровой резервированной системы управления. Для наиболее сложных случаев переключений, когда включение элемента производится по одному логическому условию, а выключение по другому признаку, применены

конечные автоматы. Проведено математическое моделирование, которое подтвердило их эффективность. Результаты стендовых экспериментов и летных испытаний использованы для построения двумерных функций распределения рассогласований между каналами, что позволило обосновать параметры алгоритмов контроля для обеспечения их эффективности.

В Заключении приведены ключевые результаты работы, отражающие ее научную новизну и практическую ценность.

В процессе выполнения работы получены **новые научные результаты**, связанные, прежде всего, с анализом влияния асинхронности, многотактности и выравнивания информации на устойчивость и управляемость самолетов со сложными цифровыми резервированными системами управления. Показано, что применение выравнивания сигналов приводит к искажению динамических характеристик цифровых СДУ (ЦСДУ), оценено влияние наиболее распространенных видов многотактности на передаточные функции ЦСДУ и области устойчивости замкнутой системы «самолет – цифровая система управления». Разработаны методы оценки рассогласований вычислительных процессов между каналами резервированной ЦСДУ, учитывающие асинхронность работы ее каналов.

Научная новизна. Разработаны универсальные, практически применимые методы исследования самолетов со сложными современными цифровыми системами управления, позволяющие учесть основные особенности их построения и функционирования. Результаты работы раскрывают сложные процессы, происходящие в цифровых резервированных системах, и их влияние на динамику как системы управления, так и замкнутой системы «самолет-СДУ». Определена структура передаточной функции, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет- СДУ», выявлено принципиальное наличие нелинейной зависимости запасов устойчивости замкнутой системы от коэффициентов усиления СДУ, проведена количественная оценка этого нелинейного влияния. Выявлено влияние выравнивания информации между каналами на динамические свойства системы и получены как аналитические выражения, так и количественные оценки этого влияния. Проведен анализ динамических характеристик практически важного случая последовательного соединения двух систем с разными частотами обновления информации, выявлен факт заметного влияния циклограммы работы систем на частотные характеристики лишь при ярко выраженном рациональном соотношении частот обновления информации. Проведено исследование влияние циклограммы работы на динамические характеристики двухтактной двухканальной системы, обнаружен факт влияния реализуемой циклограммы на структуру эквивалентной передаточной функции системы. Предложена модификация метода гармонического баланса с учетом транспонирования комбинированных на нелинейных элементах гармоник, проведена оценка их вклада в частотную характеристику. Предложен подход к выбору параметров системы контроля, обеспечивающий максимальную эффективность контроля и выполнение требований к вероятности ее ложного срабатывания.

Теоретическая значимость. На основе частотных методов и теории дискретных систем развита методика расчета устойчивости и динамики цифровых систем управления с учетом резервирования, реализованной циклограммы работы, асинхронности, многотактности и выравнивания информации. С помощью методов теории многосвязных систем выявлена нелинейная зависимость запасов устойчивости системы «самолет-СДУ» от коэффициентов усиления системы управления. Исследована связь между частотными характеристиками, определяющими устойчивость системы «самолет-СДУ» и частотными характеристиками этой системы разомкнутой в общей точке непрерывной части. Предложен метод структурной декомпозиции многосвязных систем для анализа многоконтурных систем управления самолета, который продемонстрирован на примере анализа устойчивости системы «самолет-СДУ» в боковом канале.

Проведен анализ влияния выравнивания информации на динамические характеристики элементов цифровой резервированной системы управления и на устойчивость системы «самолет-СДУ». Обнаружены эффекты изменения коэффициента при интеграле и постоянной времени фильтра вследствие выравнивания, соответственно, значений интегралов и апериодических фильтров разных каналами с использованием линий межмашинной связи.

Практическая значимость и достоверность. Результаты работы широко применялись при разработке цифровых систем управления отечественных магистральных самолетов (Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет-100, МС-21). С помощью разработанных методов анализа сложных цифровых систем и соответствующих программных средств выполнен расчет областей устойчивости замкнутой системы «самолет – резервированная СДУ» и эталонных частотных характеристик, которые были использованы при квалификационных испытаниях реальных БЦВМ самолетов Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет-100. Предложены методы обеспечения согласованной работы каналов системы управления, разработаны алгоритмы выравнивания информации и синхронизации состояний. Использование полученных двумерных распределений рассогласований между каналами позволило выбрать параметры системы контроля СДУ самолета Сухой Суперджет-100 для обеспечения эффективности ее работы. Достоверность результатов подтверждается данными обширного набора вычислительных экспериментов, а также сопоставлением с имеющимися данными физических экспериментов по стендовой отработке ЦСДУ самолетов Ту-204, Сухой Суперджет 100, МС-21.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12 статьях, опубликованных в журнале «Ученые записки ЦАГИ», рекомендованном ВАК. Всего по теме диссертации опубликована 21 статья. Кроме того, результаты диссертационной работы отражены в монографии «Системы дистанционного управления магистральных самолетов», опубликованной издательством «Наука», авторы Б.С. Алешин, С.Г. Баженов, Ю.И. Диденко и Ю.Ф. Шелюхин.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю необходимым сделать следующие **замечания** по содержанию диссертационной работы.

1. Взаимодействие цифровой системы управления и систем авионики, обеспечивающих необходимую информацию для функционирования ЦСДУ, рассмотрено очень скупо лишь на уровне временных циклограмм, причем решаются только проблемы расчетов устойчивости и управляемости, тогда как вопросам интерфейса, протоколов обмена, комплексного контроля не уделено должного внимания.

2. Не рассмотрено влияние асинхронности, многоканальности, многотактности цифровой системы управления на системы авионики, получающие информацию от ЦСДУ, такие как системы отображения информации, бортовые регистраторы и др.

3. Не рассмотрены вопросы интеграции разработанных методов оценки вероятности ложного срабатывания системы контроля ЦСДУ с традиционными методами оценки надежности систем управления (деревья отказов, диаграммы зависимостей, цепи Маркова).

Указанные замечания не влияют на общий высокий уровень диссертации, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение. Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что автор Баженов Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов (Авиационная и ракетно-космическая техника)».

Официальный оппонент
Заместитель Генерального директора
ФГУП «ГосНИИАС»,
доктор технических наук,
профессор РАН



Косьянчук Владислав Викторович

Адрес: г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, ФГУП «ГосНИИАС»,
E-mail: vvk@gosniias.ru, тел. +7-499-157-75-46

16 января 2018 г.

Подпись Косьянчука В.В. заверяю

Ученый секретарь ФГУП «ГосНИИАС»
доктор технических наук, профессор



С.М. Мужичек