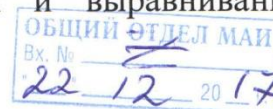


ОТЗЫВ

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

В настоящее время мы являемся свидетелями интенсивной цифровизации всех областей человеческой деятельности. Одним из аспектов этого процесса является широкое внедрение цифровых информационно-управляющих систем управления движущимися объектами различного назначения. Так практически во всех современных самолетах с цифровыми системами дистанционного управления (ЦСДУ) имеются на борту различные системы цифровой авионики. Также цифровые вычислители используются для управления и мониторинга различных подсистем и элементов самолета, таких как силовая система управления, электрогидравлические приводы и др. Важнейшее значение имеет обеспечение их высокой надежности, что обусловлено требованиями безопасности полета. Традиционным средством обеспечения высокой надежности является резервирование систем. Кроме резервирования должны быть предусмотрены средства для обнаружения, локализации и изоляции отказов для своевременного переключения с отказавшего элемента на исправный. Для цифровых систем управления необходимо обеспечивать не только аппаратное, но и программное резервирование, поскольку наличие программной ошибки может привести к одновременному отказу всех каналов, а именно к отказу типа «общая точка». Также к отказам типа общая точка может привести использование единых часов для синхронизации работы вычислителей. Кроме того, бортовые цифровые системы решают задачи управления множеством процессов, которые отличаются по динамике, т.е. имеют разные характерные времена. Так для управления приводами требуется наиболее быстрое регулирование с характерными частотами ~ 300 Гц, в системе ручного управления используются частоты 50-100 Гц, автоматическое управление можно реализовать на частотах 10-20 Гц. Соответственно, требуются новые подходы к разработке цифровых систем управления самолетов, для которых характерны многоканальность, применение разнородного резервирования, асинхронность работы и использование целого набора частот обновления информации для вычислений и управления. Создание и отработка таких систем требует решения целого ряда новых проблем, которые не свойственны аналоговым и механическим системам. Этим определяется **актуальность диссертационной работы**, в которой разработаны методы анализа устойчивости и динамики самолетов с учетом резервирования, асинхронности и многотактности выполнения операций ЦСДУ, а также использования межмашинного обмена для контроля и выравнивания информации.



Объектом исследования являются цифровые резервированные системы управления современных самолетов с высокой степенью автоматизации. **Целью исследования** является разработка методов и средств анализа сложных резервированных асинхронных многотактных ЦСДУ самолетов, расчета их характеристик, исследование особенностей их динамики, синтез алгоритмов синхронизации работы каналов.

Научная новизна диссертации. На основе частотного подхода развиты методы анализа устойчивости и расчета динамических характеристик самолетов с цифровыми резервированными асинхронными многотактными системами управления, обеспечивающими высокий уровень автоматизации.

Изучено влияние выравнивания информации на динамические характеристики цифровой резервированной системы управления. Показано, что выравнивание сигналов прямой цепи, интегрального звена и апериодического фильтра приводит, соответственно, к дополнительному запаздыванию, изменению коэффициента при интеграле и постоянной времени фильтра.

Предложен метод анализа устойчивости резервированных цифровых систем управления на основе теории многосвязных систем (MIMO – Multiple Input, Multiple Output). Эффективность метода продемонстрирована на примере анализа многоконтурных систем управления самолета в боковом канале.

Практическая значимость. Сформулирован подход к тестированию цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления с помощью аналитических моделей в среде MatLab в аналоговом и дискретном вариантах. Подход отработан на практике для расчета эталонных частотных характеристик, необходимых квалификационных испытаний реальной системы управления.

Предложены методы выравнивания интегралов и фильтров в различных каналах системы управления, синтезированы алгоритмы синхронизации логических элементов в виде конечных автоматов.

Предложена методика предварительного выбора параметров алгоритмов контроля на базе двумерных функций распределения рассогласований между каналами с учетом уровня рассогласования и времени превышения этого уровня.

Основные результаты работы использованы при разработке и отработке цифровых систем управления отечественных магистральных самолетов (Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет – 100, МС-21).

Теоретическая новизна. Показано, что в общем случае анализ устойчивости и динамики самолета с цифровой резервированной асинхронной системой управления невозможно свести к одноканальному варианту. Выявлено различие между передаточной функцией, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет - многоканальная асинхронная цифровая СДУ», и передаточной функцией разомкнутой системы при размыкании в общей

точке непрерывной части. Показано, что передаточная функция, определяющая устойчивость замкнутой системы «самолет - многоканальная асинхронная цифровая СДУ», является линейной частью передаточной функции разомкнутой системы при размыкании в общей точке непрерывной части.

Замечания по содержанию и оформлению работы.

1. Несмотря на то, что силовая система управления является неотъемлемой частью системы управления самолета, в работе не уделено достаточного внимания проблеме цифрового управления приводами. Данный контур является наиболее быстрым, требования к его динамике наиболее жесткие, частоты обновления информации наиболее высокие. Выбор рациональной циклограммы работы в контуре управления приводами с различными частотами обновления информации представляет большой интерес и может рассматриваться как одно из направлений дальнейшего развития работы.
2. Недостаточно внимания уделено проблеме высокочастотных случайных составляющих, неизбежно присутствующих во входных сигналах системы управления. Расчет спектрального состава управляющих сигналов на исполнительные элементы играет большую роль при оценке ресурса приводов. Учет асинхронности, многотактности и выравнивания информации представляет, с этой точки зрения, большой интерес.

Отмеченные замечания не снижают общий высокий уровень работы. Автореферат позволяет заключить, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор **Баженов Сергей Георгиевич** заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Заведующий кафедрой
"Гидромеханика, гидромашинны
и гидропневмоавтоматика"
МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

Семенов С.Е.



ВЕРНО:
КАФЕДРА ДИНАМИКА УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
МГТУ ИМ Н Э БАУМАНА
А Г МАТВЕЕВ

22.12.2017г. *Г.Матвеев*



**Публичное акционерное общество
«Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина»
(Группа компаний ОАК)**

Ленинградский пр-т, д. 45 «Г», Москва, 125190
тел.: +7 499 943 81 21
факс: +7 495 612 21 32
<http://www.ilyushin.org>

Ученому секретарю
диссертационного совета
Д 212.125.12
Старкову А.В.
125993 г.Москва, А-80, ГСП-3
Волоколамское шоссе, д.4

26.12.17 г. № 113-0.9/21785
На № _____ от _____

Направляю Вам отзыв на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Приложение: указанное в тексте 2 экз. по 4 листа каждый

Зам. Главного конструктора


26.12.17

Круглякова О.В.



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый зам. Генерального директора

ПАО «Ил»

Черенков П.Г.

2017 г.

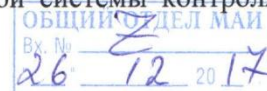


ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09

«Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Актуальность работы. Создание гражданской авиационной техники охватывает множество видов деятельности, включая научный поиск и разработку новых технологий, проектирование, стендовые и летные испытания, производство, сертификацию и сопровождение эксплуатации авиационной техники. Этапным моментом в развитии магистральных самолетов можно считать переход на цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ). Первым отечественным самолетом с элементами цифрового управления был Ил-96, оборудованный, в том числе, системой активного демпфирования (САД). За Ил-96 последовал Ту-204 с полностью цифровой основной системой управления и другие самолеты. В настоящее время цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ) применяются для ручного и автоматического управления на практически всех современных самолетах. Их создание и отработка связаны с рядом новых проблем, которые не свойственны аналоговым и механическим системам. На начальном этапе формируются требования к характеристикам ЦСДУ, для чего проводится оценка влияния цифровой реализации на динамические характеристики самолета, что требует разработки новых методов исследования и моделирования сложных цифровых систем управления. При этом следует учитывать асинхронность выполнения операций в разных каналах резервированной ЦСДУ, использование межмашинного обмена для выравнивания информации и многотактность, т.е. использование различных периодов обновления информации и выполнения операций в вычислителях. Все это оказывает влияние на динамику системы. Построение эффективной системы контроля



требует знания распределений рассогласований между контролируемыми сигналами, которые зависят от вышеупомянутых особенностей построения и функционирования ЦСДУ.

Объектом исследования являются цифровые системы дистанционного управления современных пассажирских и транспортных самолетов.

Предметом исследования являются методы и средства исследования сложных резервированных асинхронных, многотактных ЦСДУ самолетов, особенности их динамики, методы синхронизации работы каналов ЦСДУ и оценка их влияния на динамические свойства элементов ЦСДУ, на устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ» и на эффективность системы контроля.

Научная значимость. Изучено влияние асинхронности, выравнивания информации между каналами и многотактности на динамические характеристики многоканальной цифровой системы управления. Исследована структура передаточной функции, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ». Проведена оценка влияния нелинейной части этой передаточной функции, показано, что в большинстве случаев ей можно пренебречь. Определено влияние выравнивания информации на динамические свойства типовых звеньев, которое заключается в дополнительном запаздывании для прямой цепи, изменении коэффициента при интеграле и увеличении постоянной времени фильтра. Для двухканального случая получены аналитические выражения.

Проведена оценка рассогласований между каналами цифровой СДУ, вызванных асинхронностью системы, наличием постоянного смещения и случайной составляющей показаний датчиков и сбоями информации.

Проведен анализ особенностей динамики многотактных систем. Выделены два случая многотактности. Во-первых, разные сигналы могут рассчитываться с разными частотами. Во-вторых, для расчета одного и того же сигнала в разные моменты используются разные алгоритмы. Разработаны методы расчета динамических характеристик цифровых систем с обоими видами многотактности.

Теоретическая новизна. Определена связь между передаточной функцией, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет - многоканальная асинхронная цифровая СДУ» и передаточной функцией разомкнутой системы, при размыкании в общей точке непрерывной части. Показано, что в общем случае передаточная функция, определяющая устойчивость является нелинейной функцией коэффициентов усиления, что затрудняет анализ устойчивости с помощью понятий запасов устойчивости по амплитуде и фазе. В то же время, линейная часть передаточной функции, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет - ЦСДУ» является передаточной функцией

системы, размыкании в общей точке непрерывной части. Для многотактных систем отмечено влияние реализуемой циклограммы работы на передаточную функцию системы. Сформулирован подход к анализу многосвязных цифровых систем управления с помощью структурной декомпозиции системы путем расчета собственных значений матрицы передаточных функций разомкнутой системы. Проведен анализ устойчивости системы «самолет-СДУ» для ряда расчетных случаев, включая отказные ситуации и реконфигурацию управления.

Практическое значение работы. Разработаны методы расчета динамических характеристик ЦСДУ с учетом резервирования, асинхронности, многотактности и выравнивания информации, а также устойчивости замкнутой системы «самолет-ЦСДУ». На основании разработанных методов анализа сложных цифровых систем создано программное обеспечение, позволяющее произвести расчет областей устойчивости, частотных характеристик, определяющих устойчивость замкнутой системы «самолет - резервированная цифровая СДУ» и эталонных частотных характеристик, которые были использованы при стендовых исследованиях реальных БЦВМ. Сформированы требования к динамическим характеристикам основных трактов управления и обратных связей с точки зрения устойчивости, управляемости и построения эффективной системы контроля и на их основе обоснованы частоты обновления информации этих сигналов. На основе стендовых экспериментов и летных испытаний получены двумерные функции распределения рассогласований между контролируемыми сигналами в зависимости от уровня рассогласования и времени превышения этого уровня и на их основе сделаны рекомендации к порогам срабатывания алгоритмов контроля. Предложены алгоритмы выравнивания интегральных звеньев и синхронизации дискретных сигналов цифровой резервированной системы управления и оценена их эффективность.


Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Следует отметить следующие **замечания**.

1. Недостаточно подробно рассмотрен вопрос взаимодействия цифровой асинхронной многотактной ЦСДУ и тонов аэроупругих колебаний, что оказывают влияние на устойчивость системы «самолет-ЦСДУ».
2. Не рассмотрен случай гибридной системы, когда часть обратных связей и сигналов управления реализованы в аналоговом виде, что также встречается среди архитектур систем управления.

Замечания не снижают общий высокий уровень диссертации где поставлены и решены научные задачи, имеющие большое значение для решения важных народно-хозяйственных задач. Диссертационная работа представляет собой законченную 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

Заместитель Главного конструктора по аэродинамике,
динамике полёта и системам управления,
кандидат технических наук.


25.12.17

Круглякова Ольга Валентиновна

ПАО «Ил»

Адрес: 125190, г. Москва, Ленинградский пр., д. 45 "Г"

Телефон: +7 (499) 943-81-85

e-mail: KruglyakovaOV@ilyushin.net

Подпись О.В. Кругляковой заверяю.

ВРИО зам. Генерального директора по персоналу
и административному управлению ПАО «Ил»



Бычков И.В.

26.12.2017
Бычков



Набережная Академика Туполева, д. 17,
Москва, а/я 20, 105005
тел. (499) 263-75-00
факс: (499) 263-77-01, (499) 263-77-02
ОКПО 18982156 ОГРН 1027739263056
ИНН 7705313252 / КПП 997850001

на № 09.01.2018 № 84-04
604-10-266 от 07.12.2014

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

Ученому секретарю
диссертационного совета МАИ
к.т.н., доценту

А.В. Старкову

Уважаемый Александр Владимирович!

Направляю Вам отзыв на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов».

Приложение: отзыв на 4-х листах в 2-х экземплярах.

Заместитель генерального директора по
проектированию, НИР и ОКР

В.И. Солозобов



Утверждаю
Заместитель Генерального
директора ИАО «Туполев»
по проектированию, НИР и ОКР



Солозобов В.И.
2017г.

ОТЗЫВ

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

Актуальность работы.

Переломным моментом в развитии систем управления магистральных пассажирских самолетов стал переход на цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ). При этом аналоговое и/или механическое управление сохраняется как резервное или аварийное на случай полного отказа основного цифрового управления. По этому принципу построены системы управления магистральных самолетов А320 – А350, Boeing777/787, первого отечественного магистрального самолета Ту-204, который оборудован полностью цифровой основной системой управления, и более поздних российских самолетов.

Следующим этапом был переход на полностью дистанционное управление без механического резерва. Это стало возможным благодаря накопленному опыту разработки и эксплуатации ЦСДУ и существенному повышению надежности бортовой цифровой техники.

Необходимым условием высокой безопасности полета является обеспечение устойчивости и управляемости самолета при реализованном наборе функций по предупреждению экипажа и ограничению предельных параметров полета. Большое значение имеет отказобезопасность и надежность системы управления летательного аппарата, что определяется их архитектурным построением, уровнем резервирования, надежностью элементов, а также возможностями обнаружения отказов и логикой реконфигурации.

Внедрение цифровых систем управления позволили сделать знаковый шаг вперед в расширении набора функций, выполняемых системой управления, и достичь высокого уровня характеристик устойчивости, управляемости и безопасности, которым обладают современные самолеты. Высокая функциональность ведет к большой сложности законов управления, требует использования многочисленных

и разнообразных источников информации. При этом требуется уделять повышенное внимание вопросам обеспечения отказобезопасности системы управления, построению эффективной системы контроля, рассмотрению различных вариантов реконфигурации алгоритмов СДУ.

Большой проблемой является обеспечение функционирования СДУ как многомашинного комплекса. В силу асинхронности, использования разных источников информации и т. д. исходная информация в цифровых каналах СДУ отличается, т.е. должны быть предусмотрены специальные меры по обеспечению идентичности состояний и вычислительных процессов в разных каналах для предотвращения каскадного отключения резервированной СДУ. В свою очередь, применение таких средств синхронизации состояний и выравнивания сигналов приводит к искажению динамических характеристик СДУ. Необходимо оценить степень этого искажения и подтвердить приемлемость получившихся в результате динамических характеристик, для чего требуются соответствующие математические методы и программные средства. Особенности архитектурного построения, а также организация приема данных и вычислительного процесса делают систему управления многотактной, значительно усложняют ее анализ и требуют разработки специальных методов анализа и расчета характеристик.

Объект исследования.

В работе исследуются цифровые асинхронные многотактные системы управления современных маневренных самолетов.

Предмет исследования.

В работе рассматриваются методы и средства исследования сложных резервированных асинхронных, многотактных ЦСДУ самолетов, изучаются особенности их динамики, разрабатываются методы синхронизации работы каналов ЦСДУ и проводится оценка их влияния на динамические свойства элементов ЦСДУ, на устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ» и на эффективность системы контроля.

Научная значимость и теоретическая новизна.

Определено влияние асинхронности, выравнивания информации между каналами и многотактности на динамические характеристики многоканальной цифровой системы управления. Обнаружено влияние выравнивания сигналов на динамические свойства звеньев ЦСДУ, которое заключается в дополнительном запаздывании для прямой цепи, изменении коэффициента при интеграле и увеличении постоянной времени фильтра. Для двухканального случая выведены аналитические зависимости. Исследована структура передаточной функции, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ», показано, что она является нелинейной функцией коэффициентов усиления, что усложняет анализ устойчивости с помощью запасов устойчивости по амплитуде и фазе. Проведена оценка влияния нелинейной части передаточной функции, показано, что в большинстве случаев ей можно пренебречь. Также показано, что линейная часть передаточной функции, определяющая устойчивость замкнутой системы

«самолет - ЦСДУ» является передаточной функцией системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части, что чрезвычайно важно для экспериментального исследования ЦСДУ.

Изучены особенности динамики многотактных систем для случая обновления разных сигналов с разными частотами, а также для случая, когда для расчета одного и того же сигнала в разные моменты используются разные алгоритмы. Разработаны методы расчета динамических характеристик цифровых систем с обоими видами многотактности. Для многотактных резервированных систем обнаружено влияние реализуемой циклограммы работы на динамику системы.

Исследованы рассогласования между каналами цифровой СДУ, которые определяются асинхронностью системы, наличием случайных сигналов и сбоями информации, предложены алгоритмы синхронизации состояний на основе теории конечных автоматов.

Предложен метод оценки устойчивости системы «самолет - многосвязная цифровая система управления» с помощью структурной декомпозиции путем расчета собственных значений матрицы передаточных функций разомкнутой системы. Проведен анализ устойчивости системы «самолет-ЦСДУ» для бокового канала с двумя органами управления.

Практическое значение работы. Изучено влияние резервирования, асинхронности, многотактности и выравнивания информации на динамические характеристики ЦСДУ и устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ». Создано программное обеспечение для вычисления областей устойчивости, расчета частотных характеристик, определяющих устойчивость замкнутой системы «самолет - ЦСДУ» и частотных характеристик для стендовых исследований и испытаний. Определены требования к временным циклограммам информационных потоков основных трактов управления и обратных связей для обеспечения устойчивости, хороших переходных процессов и эффективной работы системы контроля. Разработаны алгоритмы и определены коэффициенты выравнивания интегральных звеньев и синхронизации переключателей и проведено моделирование для оценки их эффективности. Получены двумерные распределения рассогласований между контролируемыми сигналами в зависимости от уровня рассогласования и времени превышения этого уровня и сделаны рекомендации к параметрам системы контроля.

Автореферат отражает содержание диссертации полно и достоверно.

В результате изучения автореферата появилось **замечание:**

Не представлена процедура получения трехмерных функций распределения рассогласований для трехканальной цифровой системы управления, что требуется для оценки вероятности ложного срабатывания системы контроля и выбора ее параметров.

Указанное замечание не снижает общий высокий уровень диссертации, в которой поставлены и решены научные задачи, имеющие большое значение для решения важных народно-хозяйственных задач. Диссертационная работа представляет

собой законченную работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Баженов Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Заместитель начальника ПКЦ «Аэродинамика» по НИР,
доктор технических наук



А.Б. Кошеев

Подпись Кошеева А.Б. заверяю

Заместитель директора дирекции по управлению
персоналом - начальник отдела по работе с персоналом



О.П. Кондрашов

Информация о сотруднике, подписавшем отзыв:

Фамилия имя отчество: Кошеев Анатолий Борисович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор

Должность: заместитель начальника ПКЦ по НИР, заместитель председателя НТС ПАО «Туполев».

Подразделение: Проектно-конструкторский центр «Аэродинамика»

Место работы: ПАО «Туполев»

Адрес: Россия, 105005, г. Москва, набережная Академика Туполева, д. 17

e-mail: koscheev@tupolev.ru

телефон: +7 916 977-7858



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
“ПИЛОТАЖНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР”

ОКПО 45049009, ОГРН 1035002603052, ИНН/КПП 5013030788/504001001

Исх. № 451 от 28 декабря 2017г.

Экз. № 1

Ученому секретарю
Диссертационного Совета
Д 212.125.12
А.В. Старкову

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

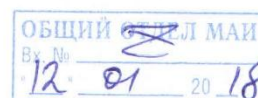
Направляю Вам отзыв на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика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

Приложение: Указанный отзыв - 2 экз. на 3л. каждый

Первый заместитель
главного конструктора

В.П. Остапенко

21/15-0-1737
03.01.18



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель директора -
Главный конструктор
ФГУП «Пилотажно-исследовательский
центр»

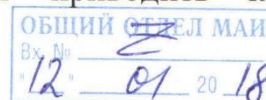
А.Н.Квочур

2017г.

ОТЗЫВ

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

Актуальность работы. На современном этапе развития авиации практически все новые самолеты используют цифровую авионику, включая цифровые дистанционные системы управления (ЦСДУ). Электродистанционное управление самолетами получило распространение в конце 70-х, начале 80-х годов прошлого столетия, вначале в виде аналоговых систем (Су-27), а затем пришло время цифровой техники (Ил-96 и Ту-204). В настоящее время немислимо представить магистральный самолет или авиационный боевой комплекс без цифрового управления. Преимущества цифровой техники позволяют реализовать на борту законы управления практически неограниченной сложности, что привело к резкому увеличению количества выполняемых функций ЦСДУ, использованию полного набора источников информации (датчиков и информационных систем), кардинальным изменениям в построении и принципах человеко-машинного интерфейса. Вместе с преимуществами, внедрение цифровой техники привело к ряду проблем с решением, казалось бы, известных проблем. Так, требуемая надежность ЦСДУ не обеспечивается путем простого резервирования из-за наличия программно-математического обеспечения (ПМО), которое может приводить к отказам типа «общая точка», и, следовательно, требуется применение разнородного резервирования и новых подходов к разработке и сертификации интегрированных систем авионики. Наличие дискретности по времени, построение ЦСДУ в виде многомашинного комплекса, работающего в асинхронном режиме, применение цифровых линий связи для реализации информационных потоков, использование различных частот обновления информации требует новых подходов к обеспечению устойчивости системы «самолет-ЦСДУ» и хороших характеристик управляемости. Также, вследствие упомянутых особенностей в цифровой ЦСДУ возникают существенные рассогласования между каналами ЦСДУ, накопление которых может приводить к



лавинообразному проявлению отказов. Это требует реализации средств «стягивания» сигналов и обеспечения одинаковых состояний разных каналов ЦСДУ, а также построения и выбора параметров системы контроля с учетом асинхронности, многотактности и выравнивания информации.

Объект исследования. В работе рассматриваются самолеты с цифровыми резервированными системами управления и высоким уровнем автоматизации.

Предмет исследования. В работе исследуются особенности устойчивости системы «самолет-ЦСДУ», динамические характеристики резервированных асинхронных многотактных систем управления, разрабатываются математические методы и программные средства для анализа устойчивости, управляемости и динамики самолетов с ЦСДУ.

Научная значимость и теоретическая новизна работы. Разработаны новые и усовершенствованы существующие методы исследования цифровых систем управления самолетов с учетом дискретности, резервирования, асинхронности, многотактности и обеспечения идентичности данных и вычислительных процессов в разных каналах ЦСДУ. Показано, что резервирование системы управления вкуче с асинхронностью работы каналов приводит к отличию динамики и устойчивости многоканальной системы от одноканальной. Обеспечение идентичности процессов в разных каналах путем кворумирования данных с использованием цифровых линий межканальной связи еще более усугубляет ситуацию. Предложено оценивать устойчивость с помощью специальным образом сформированной передаточной функции, обеспечивающей сохранение традиционного подхода. Показаны сложности использования этой функции, связанные с ее нелинейной зависимостью от коэффициентов законов управления. Оценен уровень этой нелинейной составляющей и показано, что он пренебрежимо мал за исключением некоторых случаев, которые редко встречаются на практике. Обнаружен неожиданный эффект влияния выравнивания выходных сигналов звеньев ЦСДУ на их динамические свойства, который заключается в изменении коэффициента при интеграле и постоянной времени для, соответственно, интегрального звена и апериодического фильтра. Рассмотрены различные виды многотактности ЦСДУ и разработаны методы и средства исследования таких систем. На основе теории цепей Маркова разработан метод оценки вероятности отключения ЦСДУ по причине сбоев информации.

Практическое значение работы.

Показано, что, в общем случае, линейная часть передаточной функции, определяющей устойчивость замкнутой системы, совпадает с передаточной функцией системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части, что позволяет рассчитать эталонные частотные характеристики, необходимые для тестирования реальных ЦСДУ. Предложены методы выравнивания непрерывных и дискретных сигналов между каналами резервированной

ЦСДУ, что обеспечивает устойчивую работу ЦСДУ как многомашинного комплекса. Для согласования состояний каналов разработаны алгоритмы синхронизации в виде конечных автоматов и проведено математическое моделирование для типовых сценариев, которое подтвердило их эффективность. Разработанная структура и процедура получения двумерных распределений рассогласований между каналами позволяет обосновать выбор параметров системы контроля.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По содержанию автореферата можно сделать ряд **замечаний**.

1. В работе не уделено внимания постановке задач для летных испытаний, их видам и возможным результатам, которые позволили бы на практике оценить влияние исследуемых в работе эффектов.

2. Не рассмотрены аналогичные результаты для маневренных самолетов, что, по-видимому, объясняется открытым характером диссертационной работы.

Сделанные замечания не влияют на общий уровень диссертации, который достаточно высок, и где представлено решение научных задач, имеющих большое значение для решения важных народно-хозяйственных задач. Диссертационная работа представляет собой законченную работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаем, что автор Баженов Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Начальник службы эксплуатации ВС
КТН, старший научный сотрудник

С.И. Петриченко

Ведущий инженер по летным испытаниям ВС
КТН

В.Д. Курбесов

Подписи С.И. Петриченко и В.Д. Курбесова заверяю

Начальник бюро по обеспечению документооборота и кадрам



М.Л. Маричева



Акционерное общество
«Гражданские самолеты Сухого» (АО «ГСС»)
ул. Поликарпова, 23Б корпус 2, Москва 125284, РФ
тел: +7 (495) 727 1988, факс: +7 (495) 727 1983
e-mail: info@scac.ru, http: www.scac.ru
ИНН 7714175986 КПП 997850001 ОГРН 1027739155180

« 28 » декабря 2017г. № 008/6532

на № _____

Ответ на письмо № 604-10-258 от 07.12.2017

Учёному секретарю
диссертационного совета
Д 212.125.12 федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования
«МАИ НИУ»

Старкову А.В.

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4,
ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт
(национальный
исследовательский университет)»,
Ученый совет МАИ.

Уважаемый Александр Владимирович!

В ответ на Ваше письмо № 604-10-258 от 07.12.2017 направляю отзыв на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов».

Приложение: Отзыв на автореферат диссертации – 2 экз. на 4 листах каждый.

Старший вице-президент -
главный конструктор

А.О. Недосекин

Исп.: М.В. Сторожук
Тел.: +7 (495) 727-19-88 (доб.13-68)



«Утверждаю»
Старший вице-президент –
главный конструктор
АО «Гражданские самолеты Сухого»



А.О. Недосекин

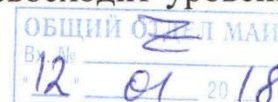
« _____ 2017г.

ОТЗЫВ

**АО «Гражданские самолеты Сухого» на автореферат диссертации
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 работы. В конце 80-х – начале 90-х годов были созданы авиалайнеры Ту-204, Ту-334 и Ил-96, относящиеся к новому поколению авиалайнеров, для которых характерно применение революционных технологий цифрового электродистанционного управления и цифрового бортового оборудования. В конце первого десятилетия нынешнего века был создан региональный лайнер Сухой-Суперджет-100, находящийся на переднем краю достижений мировой авиации. Его система управления имеет современную архитектуру, реализован обширный набор функций управления, ограничения параметров и комфортности управления. Цифровая система управления создавалась в соответствии с современными процедурами разработки и сертификации высокоинтегрированных систем авионики и удовлетворяет всем международным нормам по устойчивости, управляемости, надежности и отказобезопасности. В настоящее время разрабатываются его модификации, а также другие лайнеры, которые должны обеспечить достойное место России на мировом авиационном рынке.

Современный уровень систем управления самолетом подразумевает реализацию высокой степени автоматизации самолета, включая обеспечение желаемых характеристик устойчивости и управляемости, автобалансировку, предупреждение о приближении и предотвращение превышения предельных значений параметров движения и т.д. Достигнутый на самолете Сухой Суперджет-100 уровень функционального наполнения, характеристик устойчивости, управляемости и надежности систем управления соответствует передовому уровню самолетов Airbus и превосходит уровень самолетов Boeing.



Создания конкурентоспособных гражданских самолетов невозможно сделать без проведения большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Это вызвано тем, что при разработке, отработке и испытаниях самолетов с современной архитектурой и организацией работы СДУ, высоким уровнем функциональности, обеспечением надежности и отказобезопасности возникает большое число проблем нетипичных для аналоговых и механических систем управления. В частности, использование цифровых датчиков и информационных систем, реализация ЦСДУ в виде многомашинного комплекса, работающего в асинхронном режиме, наличие межмашинного обмена, развитой системы контроля приводит к появлению временных задержек в трактах управления и обратных связей, которые оказывают негативное воздействие на динамические характеристики ЦСДУ и как следствие на устойчивость и управляемость самолета в замкнутом контуре Самолет-СДУ и Самолет-СДУ-Летчик.

Наличие интегралов и дискретных ключей в структуре алгоритмов управления приводит к проблеме обеспечения их одинаковых значений в разных каналах ЦСДУ. Для решения этой проблемы используются линии межканальной связи и специально разработанные алгоритмы синхронизации. Вторичным эффектом использования этих алгоритмов является искажение характеристик динамических звеньев системы управления. Оценка этого искажения является весьма сложной задачей и требует разработки специальных методов исследования.

Многотактность является еще одной особенностью современных управляющих комплексов, которая вызывает проблемы для исследователей и разработчиков. В точной постановке исследование динамики самолета с многотактной системой управления приводит к значительному увеличению размерности задачи и сложностям в интерпретации полученных результатов. Для этого требуется разработка методов и программных средств автоматизации процедур исследования и представления результатов, что является сложной, но важной задачей.

Проблема синхронизации неразрывно связана с проблемой эффективного контроля. Отсутствие выравнивания динамических звеньев и синхронизации ключей приводит к ложным срабатываниям системы контроля и каскадному отключению каналов ЦСДУ, чрезмерно интенсивное выравнивание приведет к существенному искажению динамики и, возможно, к несрабатыванию системы контроля. Поэтому задача согласования коэффициентов выравнивания и синхронизации каналов с логикой и параметрами системы контроля также является весьма важной.

Объектом исследования диссертационной работы являются современные цифровые системы управления самолетов транспортной категории с высоким уровнем автоматизации.

Предметом исследования являются методы и средства исследования сложных цифровых систем управления с учетом резервирования,

дискретности, асинхронности, многотактности и выравнивания информации, особенности динамики таких систем, процедуры тестирования, а также методы синхронизации работы каналов ЦСДУ

Научная значимость и новизна работы заключается в создании универсальных, применимых на практике методов и соответствующего инструментария для исследования самолетов со сложными современными цифровыми системами управления. Эти методы и средства позволяют учесть основные особенности построения и функционирования современных ЦСДУ, а именно асинхронность, многотактность, выравнивание информации по каналам межмашинной связи. Результаты работы раскрывают особенности сложных процессов, происходящих 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. Проведенная количественная оценка этого нелинейного влияния показала, что в большинстве практически значимых случаев им можно пренебречь. Выявлено влияние выравнивания информации между каналами на динамические свойства системы, получены аналитические выражения для эквивалентной передаточной функции двухканальной цифровой системы управления с прямой цепью, интегралом и апериодическим фильтром. Проведен детальный анализ динамики многотактных систем. Выделены два практически важных вида многотактности и проанализированы динамические характеристики для случая последовательного соединения двух систем с разными частотами обновления информации. Показано, что заметное влияние циклограммы работы систем на частотные характеристики имеют место 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.

Практическая значимость работы и ее апробация.

Разработан общий подход и создано программное обеспечение для частотного анализа цифровых резервированных, асинхронных, многотактных систем с выравниванием информации по линиям межмашинного обмена. Данные методы и средства позволяют оценить запасы устойчивости замкнутой системы «самолет - ЦСДУ», а также рассчитать эталонные частотные характеристики для тестирования реальных ЦСДУ. Эти методы и средства были использованы при стендовых исследованиях и квалификации

реальной ЦСДУ самолета Сухой Суперджет-100. Предложены методы обеспечения согласованной работы каналов системы управления, разработаны алгоритмы выравнивания информации и синхронизации состояний. Полученные из данных стендовых экспериментов и летных испытаний двумерные распределения рассогласований между каналами позволяют обоснованно выбрать параметры системы контроля для выполнения требований к вероятности ложного срабатывания и обеспечить ее эффективную работу.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По содержанию работы следует сделать ряд **замечаний**.

1. В работе сформулирован лишь общий подход, но вопрос взаимодействия асинхронной многотактной ЦСДУ с тонами упругих колебаний конструкции и оценки устойчивости замкнутой системы «упругий самолет-ЦСДУ» рассмотрен недостаточно детально.

2. В работе не представлены результаты исследований важного случая цифрового управления приводами, когда блок управления расположен непосредственно на приводе и связь с ЦСДУ осуществляется по цифровым линиям межмашинной связи.

Выявленные недостатки не снижают общий высокий научный уровень и практическую значимость работы, направленной на создание научно-технического задела для решения важных народно-хозяйственных задач. Тщательное рассмотрение автореферата позволяет заключить, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор **Баженов Сергей Георгиевич** заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Главный специалист департамента
аэродинамических характеристик
АО «Гражданские самолеты Сухого»,
к.т.н.



Поляков Владимир Моисеевич

Телефон рабочий: +7 (495) 727-19-88

Почтовый адрес: 125284, Российская Федерация, г. Москва, ул. Поликарпова, 23Б, стр. 2

Адрес электронной почты: VI.Polyakov@scac.ru

Подпись Полякова В.М. заверяю



Начальник ОТДЕЛА
КАДРОВ ЕГОРОВА Т.А.

000471



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
МОСКОВСКИЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС
“АВИОНИКА” ИМЕНИ О.В. УСПЕНСКОГО

АО МНПК “Авионика”

Joint Stock Company “AVIONICA” 

ул. Образцова, д. 7, г. Москва, Россия, 127055
тел.: (495) 771-66-09, факс: (495) 775-36-79

E-mail: avionika@mnpk.ru
http://www.mnpk.ru

7, Obraztsova. st, 127055, Moscow, Russia
Phone/Fax: +7 (495) 771-66-09 / (495) 775-36-79

28 декабря 2018 г. № 17-05-72

НА № _____ ОТ _____

Председателю диссертационного
совета Д 212.125.12 на базе
Московского Авиационного
Института (национального
исследовательского университета)»

В.В. Малышеву

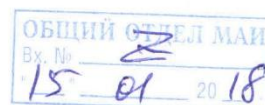
Волоколамское ш., д.4, Москва, А-80,
ГСП-3, 125993

Уважаемый Вениамин Васильевич!

Направляем Вам отзыв АО МНПК «Авионика» на автореферат диссертационной работы Баженова Сергея Георгиевича «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Управляющий директор АО МНПК «Авионика»

Заец В.Ф.



УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор
АО МНПК «Авионика»



Заец В.Ф.

М.П.

_____ 2017 г.

ОТЗЫВ

**Акционерного общества Московский научно-производственный
комплекс «Авионика» имени О.В. Успенского
(АО МНПК «Авионика»)**

на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича «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»

В диссертационной работе исследуются методы и средства анализа сложных резервированных асинхронных многотактных ЦСДУ самолетов, особенности их динамики, методы синхронизации работы каналов ЦСДУ и оценка их влияния на динамические свойства элементов ЦСДУ, на устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ» и на эффективность системы контроля. Работа является актуальной и практически важной.

Полученные результаты изложены во введении, пяти главах и заключении. Достоверность полученных в работе результатов подтверждается данными вычислительных экспериментов, а также сопоставлением с имеющимися данными физических экспериментов по стендовой отработке ЦСДУ ряда самолетов.



Основное содержание работы достаточно полно отражено в монографии, в 20 публикациях в рецензируемых журналах и сборниках научных трудов, а также в сборниках тезисов конференций. Из них 12 статей в журналах из перечня ВАК. Полученные автором основные результаты прошли апробацию на конференциях.

Автореферат отражает основные положения и выводы диссертации. Содержание исследования соответствует паспорту специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Отмечая актуальность, научную обоснованность, практическую значимость работы, необходимо отметить и следующие недостатки.

1. В работе встречаются оценочные высказывания. Например: самолет должен обладать отличными динамическими характеристиками (стр.9).
2. Некоторые данные/утверждения в автореферате приведены без пояснений/обоснований. Например:
 - в табл.2 на стр.13 отсутствует источник рекомендаций по степени резервирования и наличию внутреннего резервирования;
 - на стр.14 не пояснена природа неустойчивости при малой частоте обновления информации: постоянная времени объекта управления мала или мало сглаживание при дифференциальном члене регулятора или др.;
 - на стр.15 автор не поясняет, почему сильное возмущение переходного процесса вызвано именно запаздыванием;
 - на стр.19 неясен смысл утверждения о неопределенности физического смысла частотной характеристики. Исследователь знает, какой физический сигнал был на входе системы (одноканальной, как ранее указывалось) и на ее выходе;
 - стр.28 нет вывода из сравнения двух циклограмм на предыдущей странице.
3. Из автореферата не ясно, к какому именно объекту управления (Ту-204, Ту-334, SSJ-100) относятся графики и утверждения.
4. Сравнение параметров из табл.3 на стр.17 и утверждения на стр.14 не подтверждает критичности для устойчивости системы именно трактов угловой скорости тангажа и перегрузки.
5. Из текста не ясно, зачем на рис.12 на стр.24 приведены графики для Ассемблера, Модула-2, Паскаля.

Указанные недостатки не являются определяющими при общей положительной оценке представленного диссертационного исследования.

Таким образом, по рассматриваемой работе можно сделать следующее **заключение**.

Диссертационная работа Баженова Сергея Георгиевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные подходы к методам и средствам анализа сложных резервированных асинхронных многотактных ЦСДУ самолетов, особенностям их динамики, методам синхронизации работы каналов ЦСДУ и оценке их влияния на динамические свойства элементов ЦСДУ, на устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ» и на эффективность системы контроля. Диссертация имеет существенное значение для развития отрасли знаний, соответствующей специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Считаем, что диссертация Баженова Сергея Георгиевича соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Отзыв обсужден и утвержден на НТС предприятия «25» декабря 2017 г., протокол № 7.

Отзыв составили:

кандидат технических наук

Абдулин Рашид Раисович

Заместитель управляющего директора – Главный конструктор АО МНПК «Авионика», Председатель НТС

Тел. 495-514-19-73

кандидат технических наук, доцент

Кулабухов Владимир Сергеевич



Главный конструктор ТН-17 АО МНПК «Авионика»,

заместитель председателя НТС

Тел. 965-119-40-38,

e-mail: nit@mnpk.ru

кандидат технических наук

Булгаков Валерий Валерьевич



Начальник сектора ТН-17 АО МНПК «Авионика», член НТС

e-mail: nit@mnpk.ru

Секретарь НТС АО МНПК «Авионика»,

Каравашкина Елена Олеговна



Начальник отдела

Тел. (495) 771-66-07 доб.10-04

127055, г. Москва, ул. Образцова, д. 7



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ
ВОЕННО-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)

394064, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, д. 54а

«27» 12 2017 г. № 1/1480

На № _____

Ученому секретарю
диссертационного совета Д 212.125.12
кандидату технических наук Старкову А.В.
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
125993 г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4, МАИ

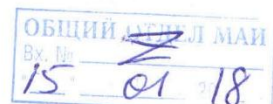
Направляем в Ваш адрес отзыв на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича, выполненной на тему: «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09. – «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Приложение: отзыв на автореферат - 2 экз. (оба в адрес).

Заместитель начальника ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» по учебной и научной работе

кандидат военных наук, доцент

В. Казаков



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Военного
учебно-научного центра Военно-воздушных
сил «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
по учебной и научной работе
кандидат военных наук, доцент



В. Казаков
В. Казаков

В. Казаков

2017 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича, выполненной 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»

Цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ) позволяют повысить эффективность применения и безопасность полетов магистральных самолетов за счет оптимизации характеристик управляемости самолета и реализации ограничений. Однако практическое применение ЦСДУ на борту самолета выявило ряд особенностей, не свойственных механическим и дистанционным аналоговым системам управления. К таким особенностям относятся многоканальность, асинхронность выполнения операций между каналами резервированной ЦСДУ и внутри каждого канала, многотактность, необходимость выравнивания информации между каналами для обеспечения идентичности вычислительных процессов в различных каналах ЦСДУ, а также рассогласование каналов, оценка которого необходима при выборе параметров системы контроля. Эти особенности существенно влияют на устойчивость и динамические характеристики самолета с ЦСДУ. В этой связи **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Существующие методы исследования и моделирования систем управления не учитывают влияния особенностей цифровой реализации процесса формирования управляющего сигнала на динамические характеристики магистральных высокоавтоматизированных самолетов с ЦСДУ. Это представляет очевидное **противоречие** в научном плане. Для его разрешения, как следует из текста автореферата, автором решена **научно-техническая проблема** разработки



научно-методологического аппарата исследования динамики цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов, имеющая важное значение при создании ЦСДУ магистральных самолетов.

Целью работы явилось формирование теоретического задела и создание прикладных методов и средств для исследования и разработки цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления и научного сопровождения создания ЦСДУ современных магистральных самолетов.

Научной новизной, что следует из автореферата, являются новая методология исследования сложных ЦСДУ с учетом особенностей их построения и функционирования, теоретический анализ влияния особенностей цифровой реализации на устойчивость, динамические свойства сложной системы «самолет-ЦСДУ», а также методики выбора рациональных параметров системы контроля ЦСДУ.

Теоретическая значимость диссертации обусловлена:

1. Формированием требований к динамическим характеристикам основных трактов управления и обратных связей с точки зрения устойчивости, управляемости и построения эффективной системы контроля и, тем самым, обоснованием частот обновления используемых сигналов.

2. Разработкой методов обеспечения согласованной работы каналов системы управления, алгоритмов выравнивания информации и синхронизации состояний.

Практическая значимость работы обусловлена реализацией основных ее результатов при разработке ЦСДУ самолетов Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет-100, МС-21.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации научных результатов обеспечивается корректностью выбора методов исследования, использованием фундаментальных положений динамики полета, теории автоматического управления, сходимостью теоретически полученных результатов с данными, полученными в процессе стендовой отработки ЦСДУ самолетов Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет-100, МС-21.

Апробация результатов исследования проводилась в ходе проведения российских и международных конференций, в том числе 8-го Международного аэрокосмического конгресса и 7-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика».

Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, **опубликованы** в монографии, а также в 20 публикациях, из которых 12 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Судя по автореферату, диссертация представляется содержательной, объективно значимой, а результаты представляют несомненный интерес для авиационных специалистов. Материал автореферата изложен последовательно и аргументированно.

При изучении материала, представленного в автореферате, целесообразно выделить два вопроса:

1. В работе не рассмотрены резервированные системы дистанционного управления маневренных самолетов у которых собственные частоты колебаний конструкции выше, чем у магистральных, а, следовательно проблемы, поднятые в диссертации, стоят существенно острее.

2. Автором не анализируется поведение резервированной системы управления при реализации в ЦСДУ адаптивных алгоритмов и, в частности, не рассматривается проблема обеспечения идентичности процессов формирования адаптации и самонастройки в разных каналах.

Указанные вопросы не снижают ценности проведенного исследования. Диссертационная работа Баженова Сергея Георгиевича представляет законченное научное исследование, в котором содержится решение актуальной научно-технической проблемы. Диссертация удовлетворяет требования ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09. – «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов. Протокол № 12 от 25 декабря 2017 года.

Начальник кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), кандидат технических наук, доцент

Верещиков Дмитрий Викторович

Профессор кафедры общевойсковых дисциплин Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), доктор технических наук, профессор

Бородин Алексей Алексеевич

394064, г. Воронеж-64, ул. Старых большевиков, д. 54а, ВУНЦ ВВС «ВВА»
Телефон: 8(473)226-47-52, факс: 8(473)244-76-10
E-mail: vaiu@mil.ru

ОТЗЫВ

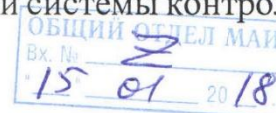
на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление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

Актуальность работы.

Развитие авиации немыслимо без фундаментальной научной и технологической базы. Ключевым приоритетом при создании магистральных самолетов является обеспечение безопасности полетов. Безопасность полётов - это интегральная характеристика системы «лётчик – воздушное судно – эксплуатационная среда», определяющая эффективность и ограничения применения авиационной техники. Во многом безопасность полета определяется техническим совершенством воздушного судна, прежде всего, уровнем его системы управления и бортового оборудования. В настоящее время цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ) достигли высокой степени совершенства и применяются для ручного и автоматического управления на практически всех современных самолетах. Алгоритмы ЦСДУ реализуют большой объем функций для обеспечения устойчивости и управляемости, предупреждения экипажа и ограничения важнейших параметров движения, повышения комфорта управления. Эти функции реализуются на основе интегральных законов управления и детальной настройки коэффициентов управления по параметрам полета и конфигурации самолета. Для успешного применения этих алгоритмов на реальных самолетах требуется решить множество проблем реализации функций управления, логики включения режимов и логики перехода от одного режима к другому.

Реализовать такие сложные законы управления возможно только с использованием цифровых вычислителей, что порождает множество специфических задач построения цифровых систем, оценки их динамики, реализации эффективной системы контроля и обеспечения синхронной работы многомашинного комплекса. Их создание и отработка требуют разработки новых методов исследования и моделирования сложных цифровых систем управления. В частности, следует учитывать асинхронность выполнения операций в разных каналах резервированной ЦСДУ, что в общем случае ведет к отличию динамики многоканальной системы от одноканальной.

Другой важной особенностью является многотактность, т.е. использование различных периодов обновления информации и выполнения операций в вычислителях, что также оказывает влияние на динамику системы. И, наконец, в цифровых вычислительных системах используется выравнивание информации между каналами для обеспечения идентичности вычислительных процессов в различных каналах ЦСДУ, которое также влияет на динамические характеристики. Построение эффективной системы контроля



требует знания распределений рассогласований между контролируемыми сигналами, которые зависят от вышеупомянутых особенностей построения и функционирования ЦСДУ.

Объектом исследования в диссертации являются цифровые резервированные системы управления современных высокоавтоматизированных самолетов.

Предметом исследования являются методы и средства исследования сложных резервированных асинхронных, многотактных ЦСДУ самолетов, особенности их динамики, методы синхронизации работы каналов ЦСДУ и оценка их влияния на динамические свойства элементов ЦСДУ, на устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ» и на эффективность системы контроля.

Научная значимость и теоретическая новизна работы.

Развиты методы исследования устойчивости и динамики цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления самолетов с широким набором функций автоматизации управления, которые базируются на частотных методах анализа и учитывают основные особенности построения и функционирования цифровых систем управления.

Проведен анализ влияния выравнивания информации на динамические характеристики цифровой резервированной системы управления. Показано, что в области низких частот выравнивание сигнала прямой цепи эквивалентно дополнительному запаздыванию, выравнивание сигнала интеграла – изменению коэффициента при интеграле, а выравнивание выходного сигнала апериодического фильтра – изменению постоянной времени. Для двухканального случая получены аналитические выражения, описывающие эти эффекты. Выделены два случая многотактности. В первом случае разные сигналы рассчитываются с разными частотами, во втором для расчета одного и того же сигнала в разные моменты используются разные алгоритмы. Разработанные методы расчета динамических характеристик цифровых систем учитывают оба вида многотактности.

Определена связь между передаточной функцией, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет - многоканальная асинхронная цифровая СДУ», и передаточной функцией системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части. Показано, что в общем случае передаточная функция, определяющая устойчивость, является нелинейной функцией коэффициентов усиления, что затрудняет анализ устойчивости с помощью понятий запасов устойчивости по амплитуде и фазе. В то же время, линейная часть передаточной функции, определяющей устойчивость, совпадает с передаточной функцией системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части. Проведена оценка влияния нелинейной части передаточной функции и показано, что в большинстве случаев ею можно пренебречь.

Предложен подход к анализу устойчивости резервированных цифровых систем управления на основе методов многосвязных систем, с помощью

структурной декомпозиции, т.е. путем расчета собственных значений матрицы передаточных функций разомкнутой системы. Проведен анализ устойчивости системы «самолет-СДУ» в боковом канале для ряда репрезентативных случаев, включая отказы и реконфигурацию управления.

Рассмотрен ряд вопросов, связанных с построением эффективной системы контроля СДУ. Предложен метод расчета вероятности ложного срабатывания системы управления в результате сбоев с помощью цепей Маркова и определены требования к параметрам системы контроля.

На основе теории конечных автоматов синтезированы алгоритмы синхронизации логических элементов разных каналов системы управления и проведен анализ эффективности их работы при различных сценариях.

Практическое значение работы.

Определен подход к экспериментальному исследованию многоканальных асинхронных цифровых систем, разработана методика и создано программное обеспечение для расчета эталонных частотных характеристик ЦСДУ. Сформированы требования к динамическим характеристикам основных трактов управления и обратных связей с точки зрения устойчивости, управляемости и построения эффективной системы контроля и на их основе обоснованы частоты обновления информации этих сигналов.

Предложены методы обеспечения согласованной работы каналов системы управления, разработаны алгоритмы выравнивания информации и синхронизации состояний различных каналов ЦСДУ.

Разработана методика предварительного выбора порогов срабатывания алгоритмов контроля на основе требований к вероятности ложного срабатывания системы контроля и данных стендовых и летных испытаний. Проведенный анализ процессов в резервированной системе управления и полученные двумерные распределения рассогласований позволили обоснованно выбрать параметры системы контроля сигналов ЦСДУ самолета Сухой Суперджет–100, что обеспечило ее эффективную работу.

Замечания.

1. Выявлена чувствительность динамических характеристик цифровой системы управления к особенностям ее реализации в виде многоканального вычислительного комплекса, работающего в асинхронном режиме, использующем разные частоты обновления информации и ее выравнивание через каналы межмашинной связи, но не сделаны рекомендации по снижению этой чувствительности, т.е. обеспечению робастности.

2. При анализе нелинейных систем управления не исследована возможность появления особых точек равновесия, специфических только для цифровых систем.

Указанные замечания не влияют на общий высокий уровень диссертации, в которой решены научные задачи, имеющие большое значение

для решения важных народно-хозяйственных задач. Диссертационная работа представляет собой законченную работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что автор Баженов Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института проблем
управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
академик РАН

С.Н. Васильев

117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 65.
Тел. (495)330-55-01. E-mail: vassilyev_sn@mail.ru



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации 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 работы. Современный этап развития авиации характеризуется интенсивным внедрением цифровой авионики на борту самолета для управления, навигации, связи, самолетовождения, в информационных системах (СВС, БИНС и др.), системах наблюдения и предупреждения и многих других. Также, цифровая авионика является основой спутниковых систем навигации и связи, наземных радиотехнических средств, систем организации и управления воздушным движением, и многих других. Бортовые цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ) реализуют ручное и автоматическое управление абсолютного большинства современных самолетов. Их создание и отработка связаны с рядом новых проблем, которые носят научный, технический, организационный, а также правовой характер, поскольку их разработка, отработка, сертификация и эксплуатация требуют разработки новой нормативной базы. Начальный этап определения требований к характеристикам ЦСДУ, оценки влияния цифровой реализации, формирования архитектуры, функционального состава и принципов мониторинга ЦСДУ требует использования новых методов исследования и моделирования сложных высокоинтегрированных цифровых систем управления. Эти методы должны учитывать асинхронность выполнения операций в разных каналах резервированной ЦСДУ, многотактность, т.е. использование различных периодов обновления информации и выполнения операций в вычислителях а также использование межмашинного обмена для контроля и обеспечения согласованной работы многомашинного комплекса.

Объект исследования. В работе изучаются современные цифровые системы дистанционного управления высокоавтоматизированных самолетов транспортной категории.

Предмет исследования. В работе предложены методы и разработаны средства исследования сложных цифровых систем управления с учетом резервирования, дискретности, асинхронности, многотактности и выравнивания информации, рассмотрены особенности динамики таких систем, предложены и промоделированы методы синхронизации работы каналов ЦСДУ

Научная новизна и теоретическая значимость диссертации.

Проведен анализ структурного построения и функционального наполнения современных ЦСДУ, представлены базовые алгоритмы, реализующие эти функции, определено необходимое информационное обеспечение для функций и алгоритмов, которые позволили достичь высокого уровня



характеристик устойчивости, управляемости и безопасности, характерного для современных самолетов.

Разработаны методы анализа устойчивости и динамических характеристик цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления. Показано, что при асинхронной работе резервированных вычислителей устойчивость и динамические свойства замкнутой системы «самолет – СДУ» для случая резервированных систем отличаются от одноканального варианта и это требует разработки специальных методов анализа.

Изучена структура передаточной функцией, определяющей устойчивость замкнутой системы «самолет - многоканальная асинхронная цифровая СДУ». Выявлено, что она является нелинейной функцией коэффициентов усиления, что затрудняет расчет запасов устойчивости.

Проведена оценка влияния асинхронности и выравнивания информации на динамические характеристики резервированных систем. Показано, что применение выравнивания сигналов приводит к дополнительным запаздываниям, изменению коэффициентов при интегралах и постоянных времени фильтров.

Исследовано влияния наиболее распространенных видов многотактности, т.е. использование различных частот для обновления информации, на динамические свойства системы управления, прежде всего на ее частотные характеристики и области устойчивости замкнутой системы «самолет – цифровая система управления».

Разработаны методы оценки межканальных рассогласований вычислительных процессов в цифровых системах управления, вследствие дискретности, асинхронности, многотактности и наличия сбоев информации. Разработаны методы оценки вероятности ложного срабатывания системы контроля цифровой СДУ вследствие асинхронности системы и наличия сбоев информации.

Практическая значимость.

Оценены максимальные допустимые запаздывания в трактах передачи информации и управления для обеспечения запасов устойчивости, высоких динамических характеристик и эффективной работы системы контроля.

Проведена оценка степени искажения динамики элементов ЦСДУ вследствие выравнивания информации и сформулированы рекомендации по реализации динамических звеньев.

Предложен подход к тестированию реальных ЦСДУ с помощью частотного подхода. Разработан метод расчета эталонных частотных характеристик системы и сформулированы критерии успеха при сравнении реальных и эталонных частотных характеристик.

Разработан ряд методов обеспечения устойчивого функционирования СДУ как многомашинного комплекса. Необходимый уровень надежности можно достичь только через резервирование каналов СДУ. Обновление информации в разные моменты времени, использование разных датчиков и т. д. приводит к тому, что исходная информация в цифровых каналах СДУ слегка отличается. При использовании интегралов и дискретных логических

переключателей, небольшая разница в исходной информации приводит к «разбеганию» вычислительных процессов, что ведет к каскадному отключению системы. Для цифровых систем рассогласование между каналами включает случайную и асинхронную составляющие. В работе предложены специальные меры по обеспечению идентичности состояний и вычислительных процессов в каналах резервированной СДУ. Проведена оценка распределений как самих контролируемых сигналов, так и их производных, что позволяет обоснованно выбрать параметры системы контроля.

Результаты работы нашли применение при разработке цифровых систем управления самолетов Ту-204, Ту-334, RRJ – 100 и МС-21.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечания.

1. При анализе устойчивости замкнутой системы «самолет-ЦСДУ» используются только частотные методы, но не изучено влияние рассмотренных особенностей построения и функционирования ЦСДУ на расположение нулей и полюсов разомкнутой системы и корней замкнутой системы.

2. В работе не рассмотрено влияние атмосферной турбулентности, которая является источником высокочастотных случайных возмущений на функционирование резервированной цифровой СДУ и эффективность ее системы контроля.

Выявленные недостатки не снижают общий высокий уровень оценки работы. Детальное рассмотрение автореферата позволяет заключить, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор **Баженов Сергей Георгиевич** заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Исполнительный директор
АО «Концерн «Международные аэронавигационные системы»
профессор, доктор технических наук

М.И.Каневский

Подпись Каневского М.И. заверяю

Начальник отдела кадров
АО «Концерн «Международные аэронавигационные системы»



Тимофеева

О.Ю.Тимофеева

Ученому секретарю диссертационного
совета Д 212.125.12

Старкову А.В.

125993 г.Москва, А-80, ГСП-3

Волоколамское шоссе, д.4

15.01.18 № 8-10-069

На № 604-10-259 от 7 декабря 2017 г.

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

Приложение: указанное в тексте в 2 экз. по 3 листа каждый

Генеральный директор



Хвостанцев В.В.

Утверждаю
Генеральный директор

АО «ЦНТУ Динамика»

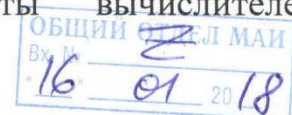
Хвостанцев В.В.

2017г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации 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 работы. Современные самолеты оборудованы совершенными системами цифровой авионики, реализующими большое количество функций управления, навигации, информирования и предупреждения экипажа и других. Новые структурные построения, функции и алгоритмы систем управления позволили достичь беспрецедентно высокого уровня характеристик устойчивости, пилотажных характеристик и безопасности полета. Соответственно, требуется создание новых тренажеров для обучения и тренинга экипажей, которые сами по себе являются весьма сложными техническими системами, поскольку должны реализовывать те же бортовые функции, как и на реальном самолете. Важнейшей частью бортовой авионики являются бортовые цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ), которые реализуют управление от рычагов в кабине экипажа до отклонения аэродинамических поверхностей. Их проектирование, отработка, производство и эксплуатация связаны с решением ряда новых научных, технических и нормативно-правовых проблем. На начальном этапе создания ЦСДУ формируется архитектура, формулируются требования к ее динамическим характеристикам, оценивается влияние цифровой реализации, определяется функциональное и алгоритмическое наполнение, выбираются принципы мониторинга ЦСДУ. Точное решение этих задач должно учитывать ключевые особенности современных систем управления, включая резервирование ЦСДУ и асинхронность разных каналов, применение многих тактов обновления информации и выполнения операций и использование межмашинного обмена для согласования работы вычислителей



многомашинного комплекса. Для этого требуется разработка новых методов анализа устойчивости, управляемости, оценки динамических характеристик и моделирования сложных цифровых систем управления, что определяет актуальность работы.

Объектом исследования являются цифровые системы управления современных пассажирских и транспортных самолетов.

Предметом исследования являются методы исследования резервированных цифровых систем управления с учетом асинхронности каналов управления, многотактности обновления информации, согласования работы многомашинного комплекса, а также особенности устойчивости, управляемости и динамики самолетов с ЦСДУ

Научная новизна и теоретическая значимость диссертации.

Изучены современные тенденции построения современных ЦСДУ, включая их структурное построение, номенклатуру реализованных функций, алгоритмическое обеспечение и определено необходимое информационное обеспечение. Предложены новые и усовершенствованы существующие методы анализа устойчивости и динамических характеристик цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления. Выявлено отличие анализа устойчивости самолета с резервированной асинхронной системой от случая одноканальной ЦСДУ. Обнаружено, что передаточная функция, определяющей устойчивость нелинейным образом зависит от коэффициентов усиления, что создает сложности при расчете запасов устойчивости. Исследовано влияние выравнивания сигналов с помощью межканального обмена, показано, что выравнивание приводит к дополнительным запаздываниям, изменению коэффициента при интеграле и постоянной времени фильтра.

Проанализировано влияние практически важных разновидностей многотактности на передаточные функции ЦСДУ и области устойчивости замкнутой системы «самолет – цифровая система управления».

Разработаны методы оценки уровня рассогласований между каналами цифровых систем управления, вследствие дискретности, асинхронности, многотактности и наличия выравнивания информации. На базе методов теории цепей Маркова предложен метод оценки межканальных рассогласований, вызванных случайными изменениями сигналов интегралов и фильтров. Методы теории конечных автоматов развиты для синтеза алгоритмов согласования дискретных значений реле и гистерезиса.

Практическая значимость.

Сформированы требования к максимально допустимым запаздываниям в каналах угловых скоростей, перегрузок и других сигналов, по условиям обеспечения устойчивости, хороших переходных процессов и эффективного контроля.

Исходя из полученных результатов по анализу динамики элементов ЦСДУ вследствие выравнивания информации, сформулированы рекомендации по реализации динамических звеньев.

Предложена модификация частотного подхода к тестированию реальных ЦСДУ, разработана методика расчета эталонных частотных характеристик системы.

Разработаны методы обеспечения устойчивого функционирования СДУ как многомашинного комплекса путем обеспечения идентичности состояний и вычислительных процессов в каналах резервированной СДУ и исключения ложных срабатываний системы контроля. Проведенная оценка вероятностных характеристик рассогласований контролируемых сигналов позволяет обоснованно выбрать пороги срабатывания и время подтверждения их алгоритмов контроля.

Результаты использовались в процессе создания ЦСДУ самолетов Ту-204, Ту-334, RRJ – 100 и МС-21.

Автореферат позволяет судить о содержании диссертации с достаточной полнотой.

Замечания.

1. Не приведена оценка влияния выявленных особенностей построения и режима работы ЦСДУ на динамику и устойчивость других летательных аппаратов, включая маневренные самолеты и вертолеты.

2. Не проведен анализ необходимости воспроизведения анализируемых особенностей построения и работы цифровых систем управления на тренажерах современных самолетов.

Сделанные замечания не снижают уровень диссертационной работы. Рассмотрение автореферата позволяет заключить, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК МинобрНауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор **Баженов Сергей Георгиевич** заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Исполнительный директор АО «ЦНТУ Динамика»,
Первый заместитель генерального директора
кандидат технических наук



Островой А.В.

Подпись Острового А.В. заверяю
Заместитель исполнительного директора
по работе с персоналом



Наливайко Т.В.

Адрес АО ЦНТУ «Динамика»: Россия, 140184, Московская область,
г.Жуковский, д. 9/18. Тел./факс: +7(495) 276 00 09.

Министерство образования и науки
Российской Федерации

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»
(МФТИ)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1 А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9
Тел.: 408-57-00, факс: 408-68-69

15.01.2018 № 6.06-03/106
на № _____ от _____

Учёному секретарю
диссертационного совета
Д 212.125.12
Старкову А.В.
125993 г. Москва, А-80, ГСП-3
Волоколамское шоссе, д. 4

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

Приложение: отзыв 2 экз., 5 листов в каждом

С уважением,

Учёный секретарь МФТИ

к.ф.-м.н., доцент



Ю.И. Скалько

_____/Ю.И. Скалько/

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 16 01 2018

ОТЗЫВ

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

Актуальность и общая характеристика работы. Основной целью и главным содержанием работы является исследование особенностей динамики современных самолетов транспортной категории. Большинство этих самолетов оборудованы цифровыми системами дистанционного управления (ЦСДУ) с высоким уровнем функционала управления, что определяет актуальность работы.

Внедрение бортовых цифровых систем для управления самолетами привело к лавинообразному увеличению количества функций, выполняемых ЦСДУ, значительному повышению сложности алгоритмов, реализующих эти функции. Это потребовало использования большого количества источников разнообразной информации, включая цифровые датчики и информационные системы, принципиально новой организации информационных потоков с помощью цифровых линий высокой пропускной способности и реализации сложных вычислительных процессов в реальном времени.

Протоколы информационного обмена, асинхронность, многотактность определяют временную циклограмму информационно-вычислительной части ЦСДУ и приводят к запаздываниям в трактах управления. Запаздывания приводят к ухудшению динамических характеристик системы и устойчивости замкнутой системы «самолет-ЦСДУ», что требует формирования требований к максимальным допустимым запаздываниям в трактах передачи информации и управления.

Наличие таких характерных особенностей построения и работы современных цифровых систем управления самолетом, как резервирование, в том числе разнородное, асинхронность каналов, многотактность, т.е.

использование многих частот опроса датчиков и выполнения вычислений, применение линий межмашинного обмена для контроля и синхронизации вычислительных процессов различных каналов ЦСДУ значительно усложняет анализ устойчивости и управляемости самолетов.

Главное внимание в работе уделено представлению разработанных автором методов исследования динамики самолетов со сложными системами управления с учетом таких особенностей как асинхронность, многотактность, наличие временных запаздываний при передаче и обработке информации, резервирование, выравнивание информации между каналами системы управления и наличие развитой системы контроля.

Объектом исследования являются самолеты транспортной категории, оборудованные цифровыми резервированными системами дистанционного управления с высоким уровнем функционала управления.

Предметом исследования являются методы и средства исследования сложных резервированных асинхронных, многотактных ЦСДУ самолетов, особенности их динамики, методы синхронизации работы каналов ЦСДУ и их влияние на динамические свойства элементов ЦСДУ, на устойчивость замкнутой системы «самолет – ЦСДУ» и на эффективность системы контроля.

Научная значимость и теоретическая новизна работы. Развита методика анализа динамических характеристик цифровых резервированных асинхронных систем управления и устойчивости системы «самолет – ЦСДУ». Показано, что вследствие асинхронности работы резервированных вычислителей устойчивость системы «самолет – ЦСДУ» для случая резервированной системы отличается от одноканального варианта, что требует разработки специальных методов анализа.

Модифицированы частотные методы анализа цифровых систем для учета таких особенностей их архитектурного построения и функционирования как наличие временных запаздываний при передаче информации по цифровым линиям связи, при выполнении операций и

вследствие асинхронной работы системы; резервирование; асинхронность; многотактность; выравнивание информации между каналами.

Проведено исследование влияния асинхронности и выравнивания информации на динамические характеристики типовых звеньев резервированных систем. Показано, что применение средств синхронизации состояний и выравнивания сигналов приводит к искажению динамических характеристик ЦСДУ, а именно дополнительному запаздыванию, изменению коэффициента при интеграле и увеличению постоянной времени апериодических фильтров. Получены аналитические оценки этих искажений для случая двухканальной системы.

Выделены наиболее распространенные виды многотактности и оценено их влияние на динамические свойства системы управления, прежде всего на ее частотные характеристики и области устойчивости замкнутой системы «самолет – цифровая система управления».

На основе методов теории процессов Маркова разработан метод оценки рассогласований между вычислительными процессами в разных каналах цифровых систем управления, вызванных случайными изменениями значений сигналов.

Предложено использовать конечные автоматы для согласования дискретных значений переключателей в алгоритмах управления, что обеспечивает согласование состояний каналов системы управления.

Практическое значение работы. Разработаны методы и создано программное обеспечение для частотного анализа и тестирования цифровых резервированных, асинхронных, многотактных систем с выравниванием информации по линиям межмашинного обмена.

Разработан подход к оценке рассогласований между вычислительными процессами в разных каналах цифровой системы управления, вследствие асинхронности, многотактности и наличия сбоев информации. Полученные двумерные распределения рассогласований позволили обосновать выбор параметров системы контроля и обеспечить ее эффективную работу.

По тексту автореферата могут быть сделаны следующие замечания:

1. Не рассмотрен случай работы системы при наличии в сигналах перегрузки, угловой скорости и угла атаки высокочастотных случайных составляющих, вызванных атмосферной турбулентностью, порывами ветра и спутным следом.

2. Не оценены запасы устойчивости замкнутой системы «самолет-резервированная ЦСДУ» на больших углах атаки, где возможны локальные зоны неустойчивости моментной характеристики по тангажу (т.н. аэродинамические «ложки»).

3. Остаётся неясным, что происходит с ЦСДУ при отказе датчиков, в частности, основного и дублирующих, например, вследствие обледенения приёмников воздушного давления.

Высказанные замечания не снижают научную значимость и прикладное значение выполненной работы, в которой **решена научная проблема повышения безопасности полёта транспортных самолётов, оборудованных цифровыми системами дистанционного управления.**

Диссертация Баженова С.Г. «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, отвечает паспорту специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов» по

п. 1. Моделирование движения аппаратов, систем управления полетом и действующих возмущающих факторов...

п. 3. Динамическое проектирование управляемых летательных аппаратов и исследование динамики их движения...

п. 4. Навигация и оперативное управление полетом,... разработка методов улучшения летных характеристик средствами автоматического управления,

а её автор Баженов Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по указанной специальности.

Зав. кафедрой Прикладной механики и информатики д.т.н., профессор

 /Вышинский Виктор Викторович/

факультет Аэромеханики и Летательной техники Московского физико-технического института (ГУ), 140180, г. Жуковский, Московской обл., ул. Гагарина, дом 16, тел./факс: +7 (495) 556 8417. E-mail: vyshinsky@rambler.ru

12.01.2018

Подпись В.В. Вышинского заверяю

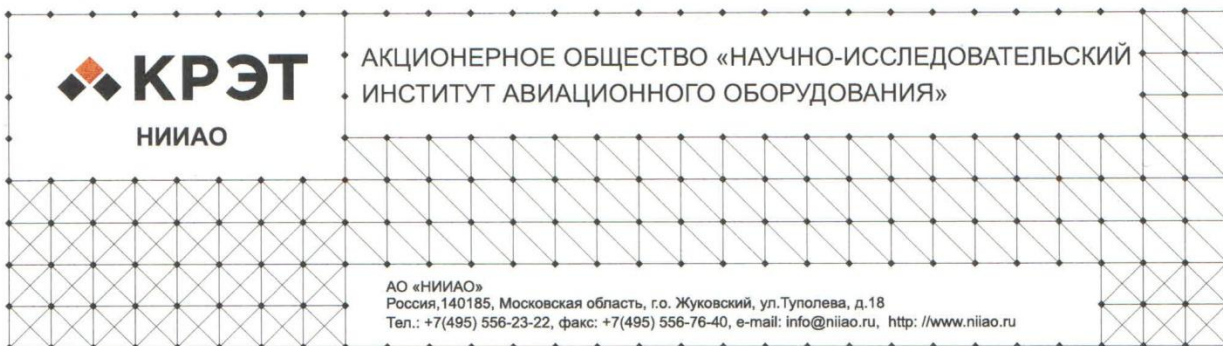
Учёный секретарь МФТИ

к.ф.-м.н., доцент





_____/Ю.И. Скалько/



16.01.2018 № 48/3-146-01/102

На № _____

Ученому секретарю диссертационного
совета Д 212.125.12 при Московском
авиационном институте (национальном
исследовательском университете)
А.В. Старкову

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское ш., д. 4, ФГБОУ ВО МАИ

Исп. н/вх. № 4093н от 13.12.2017.

На Ваш исх. № 604-10-278 от 07.12.2017.

Направляю отзыв на автореферат диссертации БАЖЕНОВА Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов.

Приложение: Отзыв на 4-х листах, 2 экз.

Генеральный директор –
Генеральный конструктор
доктор технических наук

А.В. Воробьев



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор – Генеральный
конструктор АО «Научно-иссле-
дательский институт авиационного обо-
рудования»
Доктор технических наук



А.В. Воробьев

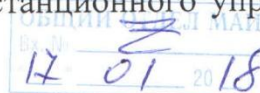
« 16 » января 2018 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации БАЖЕНОВА Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных много-тактных систем управления магистральных самолетов», представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов

Актуальность работы. В настоящее время среди специалистов в области бортовых комплексов доминирует мнение, что цифровым системам получения, обработки и передачи информации практически нет альтернативы. Это обусловлено революционными возможностями как в экстенсивном (расширение круга охватываемых функций и задач), так и в интенсивном (повышение точности, эффективности, преодолении сложных явлений и закономерностей) аспектах. Представляется, что границы применимости цифровой техники для решения всевозможных прикладных задач бортового оборудования (навигация, наведение, пилотирование, предотвращение неприятных последствий воздействия различных факторов и многое другое) ограничены либо техническими характеристиками техники сегодняшнего дня, либо глубиной знания или понимания тех процессов, с которыми приходится иметь дело. А это, в свою очередь, говорит о широчайших перспективах цифровой бортовой техники в обозримом будущем.

Не являются исключением и цифровые системы дистанционного управле-



ния (ЦСДУ) полетом самолетов коммерческой и транспортной категории, которые являются предметом представленной квалификационной работы.

Естественным образом разработка, внедрение и эксплуатация цифровой техники порождают множество специфических научных и технических проблем, без решения которых невозможно успешное продвижение в соответствующем направлении. В частности, при расширении номенклатуры (вместе с особенностями построения и функционирования) вычислительных средств с предполагаемым их взаимодействием возникают проблемы нивелирования возможного (или даже неизбежного) взаимовлияния или диссонанса их характеристик. Сюда следует отнести тактовые частоты и синхронизм разных компонентов, частоты обновления и масштабирование данных, целостность данных, регулярные и случайные сдвиги во времени обновления данных, гарантированные и реальные времена доставки данных и пр.

В связи со сказанным тема диссертационной работы, посвященной созданию математического и методического аппарата исследования устойчивости и контроля правильности функционирования ЦСДУ в условиях проявления типовых факторов многомашинной асинхронной обработки данных, является вполне актуальной.

Научная новизна. Судя по автореферату, представленная диссертация главным образом направлена на решение важной научно-технической проблемы создания математико-методического обеспечения процессов разработки и исследования ЦСДУ с использованием стендовых и натурных испытаний. При этом автор осуществил достаточно глубокие теоретические исследования, позволяющие говорить о значительном развитии научного направления, связанного с цифровым управлением динамическими системами большой сложности.

В частности, следует отметить такие новые научные результаты как:

общее развитие единого подхода к исследованию современных многоплановых систем, включая улучшение устойчивости и пилотажных характеристик, ограничение параметров движения, мониторинг правильного функционирования

и пр.;

создание инструментов и методик для исследования произвольных циклограмм работы информационно-вычислительных компонентов, результативности резервирования, влияния асинхронности работы и разных частот обновления данных;

обоснование необходимости выравнивания результатов интегрирования и синхронизации состояний разных каналов;

исследование причин и основных характеристик временных (дополнительных задержек) и масштабных (изменение коэффициентов и постоянных времени) искажений цифровой обработки данных под воздействием исследованных факторов;

обоснование рекомендаций по практическому преодолению (условиям допустимого пренебрежения) нежелательных эффектов искажения цифровой обработки данных в частных случаях;

разработка метода структурной декомпозиции передаточных функций разомкнутой системы для изучения устойчивости самолетов с резервированными цифровыми системами управления и использованием нескольких органов управления.

Практическое значение работы заключается в том, что развиваемый подход ориентирован на использование в процессе разработки, исследования и доводки конкретных ЦСДУ с использованием как стендовых, так и натурных испытаний этих систем. Предложен метод получения распределений рассогласований между каналами из стендовых экспериментов и летных испытаний, а также подход к выбору параметров системы контроля на основе этих распределений.

Достоверность результатов и рекомендаций основана на использовании в качестве исходных различных положений теории систем и статистического анализа, справедливость которых была доказана ранее, на тщательном анализе действующих факторов, на приемлемом совпадении результатов численных, стендовых

и натуральных экспериментов.

Замечания по автореферату и его оформлению сводятся к следующему:

1. Автореферат содержит отдельные формулировки, которые трудно либо понять, либо проанализировать. Так, последовательность формул на стр. 24 трудно проследить, а что такое появившаяся s вообще не понятно. На стр. 30 и 31 упоминаются разработанные автором алгоритмы на основе конечных автоматов, при этом никакой информации, приоткрывающей суть или возможности этих алгоритмов, не приводится.
2. Остается неясным происхождение формулы для J_{\max} на стр. 33. Если это результат автора, то чем объясняется форма и, тем более, числовой параметр (единица в конце)?

Указанные замечания не снижают высокий научный уровень диссертации. Автореферат написан ясным языком, в достаточной степени иллюстрирован. Приведенный перечень работ автора свидетельствует о приемлемом уровне опубликования результатов.

Вывод. Диссертационная работа представляет собой законченную работу, содержащую решение важной научно-технической проблемы создания математико-методического обеспечения процессов разработки и исследования ЦСДУ, и удовлетворяет требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор БАЖЕНОВ Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктор технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов.

Ведущий научный сотрудник
доктор технических наук, профессор



В.Н. Буков

Тел. +7 9161204354



Акционерное общество
«Экспериментальный
машиностроительный завод
имени В. М. Мясищева»
(АО «ЭМЗ им. В. М. Мясищева»)

Ул. Наркомвод, д. 7, г. Жуковский,
Московская область, 140180
тел.: (495) 664-76-76, факс: (495) 728-41-30
e-mail: MDB@emz-m.ru
<http://www.emz-m.ru>
ОКПО 07539110, ОГРН 1105040001549
ИНН/КПП 5040097816/504001001

17 01 18 № 1/73

На № _____ от _____

Учёному секретарю
диссертационного совета
Д 212.125.12
Старкову А.В.
125993 г.Москва, А-80,ГСП-3
Волоколамское шоссе , д.4

Направляю Вам отзыв на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолётов », представленной к защите на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Приложение: Указанное в тексте 2 экз. на 3-х листах каждый

Управляющий директор

А.А.Горбунов



Утверждаю

Управляющий директор

АО «ЭМЗ им. В.М.Мясищева»

А.А. Горбунов

.....2018г.



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолётов», представленную к защите на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

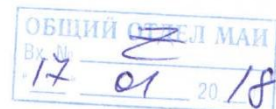
Актуальность работы. В настоящее время происходит оборудование современных магистральных самолётов цифровыми системами дистанционного управления (ЦСДУ). Первыми отечественными самолётами, оснащёнными такими системами были самолёты Ту-204 и Ил-96. Автоматическая система штурвального управления (АСШУ) самолёта Ту-204 была первой системой с полностью цифровым основным контуром управления, а система управления самолёта Ил-96 содержала элементы цифрового управления с системой активного демпфирования.

Созданный региональный самолёт RRJ-100 оснащён системой управления в соответствии с современными процедурами разработки и сертификации авионики, имеет современную архитектуру, реализует многочисленные функции управления, ограничения параметров движения и мониторинга. Новейшие разработки цифровых систем управления используются и при создании самолёта МС-21.

Однако при разработке, отработке и испытаниях самолётов с цифровыми системами дистанционного управления, обеспечивающими высокий уровень функциональности, надёжности и отказобезопасности возникает большое число специфических проблем, которые отрицательно влияют на динамические характеристики ЦСДУ и устойчивость и управляемость самолёта. Так, датчики и информационные системы, различные каналы ЦСДУ работают в асинхронном режиме, обновляются с разными частотами, что приводит к запаздываниям в трактах управления и обратных связей.

Асинхронность работы системы, наличие возмущений и сбоев информации приводит к необходимости обеспечения одинаковых значений интегралов и дискретных ключей в разных каналах ЦСДУ. Это требует использования линий межканальной связи и специальных алгоритмов синхронизации.

При использовании этих алгоритмов искажаются характеристики динамических звеньев. Оценка этого искажения является сложной задачей и требует разработки специальных методов исследования.



Проблема выравнивания данных и синхронизации состояний каналов связана с необходимостью создания эффективной системы контроля. При отсутствии выравнивания динамических звеньев и синхронизации ключей появляются ложные срабатывания системы контроля и каскадного отключения ЦСДУ, т.е. требуется согласование параметров алгоритмов выравнивания и порогов срабатывания системы контроля.

В диссертационной работе рассматриваются все перечисленные проблемы, что и определяет её актуальность.

Объект исследования. В работе исследуются цифровые системы дистанционного управления современных самолётов с высоким уровнем автоматизации.

Предмет исследования. Предметом исследования в диссертационной работе являются сложные цифровые системы управления и мониторинга, а также характеристики устойчивости самолёта, динамические характеристики ЦСДУ с учётом резервирования, асинхронности, многотактности и выравнивания информации.

Научная новизна и теоретическая значимость работы. Автором разработаны универсальные, практически применимые методы исследования самолётов с современными цифровыми системами управления, реализующими широкий набор функций управления. Разработанные в работе методы учитывают основные особенности построения и функционирования современных ЦСДУ, а именно резервирование вместе с асинхронностью вычислителей, многотактность и выравнивание информации между каналами.

Исследована также и структура передаточной функции, определяющей устойчивость самолёта с ЦСДУ, обнаружен принципиальный факт нелинейной зависимости устойчивости самолёта от коэффициентов усиления ЦСДУ. Оценено влияние этого нелинейного явления. Показано, что в большинстве случаев им можно пренебречь.

Проанализировано влияние выравнивания сигналов интегралов и фильтров между каналами на их динамические свойства. Показано, что основным влиянием является изменение коэффициентов при интеграле и постоянной времени фильтра.

Получены аналитические выражения для оценки этого влияния.

Проанализированы особенности динамики многотактных систем для двух видов многотактности. Обнаружен факт влияния реализуемой циклограммы на структуру эквивалентной передаточной функции резервированной системы.

Автором разработан метод оценки вероятности срабатывания системы контроля вследствие сбоя информации.

Практическая значимость работы.

В работе автором разработаны универсальные частотные методы исследования цифровых резервированных, асинхронных, многотактных систем с выравниванием информации по линиям межмашинного обмена. Эти методы позволяют оценить устойчивость самолёта, исследовать искажение передаточных функций элементов ЦСДУ и рассчитать эталонные частотные характеристики для испытания реальных систем управления.

Предложены методы обеспечения устойчивой работы ЦСДУ, как многофункционального комплекса, включая алгоритмы выравнивания информации и синхронизации между каналами. Используя данные стендовых и лётных испытаний, получены двумерные распределения рассогласований между каналами в зависимости от уровня рассогласования и времени. Эти распределения позволяют обоснованно выбрать параметры системы контроля для обеспечения требований к вероятности ложного срабатывания.

Автореферат диссертации позволяет оценить содержание работы с достаточной полнотой.

По содержанию работы можно сделать некоторые **замечания**.

1. В работе не исследован случай, когда цифровые резервированные элементы в системе управления используются наряду с аналоговыми и механическими.

2. Не рассмотрен случай выравнивания информации между вычислителями управления приводами для предотвращения взаимонагружения приводов, отклоняющих одну аэродинамическую поверхность и работающих в активном режиме.

Отмеченные в работе недостатки не влияют на высокий научный уровень и большую практическую значимость работы, направленной на создание научно-технического задела для решения важных научно-технических задач.

Внимательное рассмотрение автореферата позволяет сделать заключение, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор **Баженов Сергей Георгиевич** заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Главный специалист
по динамике полёта
АО «ЭМЗ им.В.М.Мясищева»
Абраменко Эдуард Яковлевич
тел.8(495)-664-76-76 доб.364
140186 г.Жуковский
Московской обл.
ул.Молодёжная д.17 кв.69

Абраменко
16.01.2018

Подпись *Абраменко* *Э.Я.* *заведом.*
начальник ОК *Мясищева*





Утверждаю

Исполнительный директор
АО «Московский вертолетный
завод им. М.Л. Миля»

С.Н.Романенко

«_____» 2018г.

ОТЗЫВ

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

Актуальность работы. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт разработки, испытаний и эксплуатации военных и пассажирских самолетов, оборудованных электродистанционными системами управления (ЭДСУ). С 1987 года началась эра цифровых ЭДСУ, которые впервые были установлены на самолете Airbus-320. Первый полёт отечественного самолета Ту-204 с полностью цифровой основной системой управления состоялся в январе 1989 года. Для интегрированных систем цифровой авионики разработана соответствующая нормативная база по их разработке и сертификации (АП-25, SAE ARP-4761, SAE ARP-4754, DO-178, DO-254,...). Несмотря на значительные успехи в области создания самолетных ЭДСУ, их применение на вертолетах только начинается. И это несмотря на то, что вертолет как объект управления, значительно сложнее самолета, у него существенно больше режимов полета, он изначально является неустойчивым и необходимость в улучшении характеристик устойчивости и управляемости не подлежит сомнению. Еще сложнее управление такими объектами как конвертопланы (V-22 Osprey), для которых необходимость в цифровом управлении еще острее. Также для вертолетов весьма важно реализовать функции автоматического ограничения предельных параметров движения, аналогично тому как это реализовано на самолетах. В настоящее время цифровое управление реализовано лишь на экспериментальном вертолете Boeing/Sikorsky RAH-66, на серийном вертолете Augusta/Westland NH-90 и на опытном вертолете Bell 525. В России впервые электродистанционная система управления вертолетом была реализована на вертолете Ансат. В этой связи обзор структурных построений, реализованных функций, алгоритмов управления, представленный в диссертационной работе представляет значительный интерес.

При расчете характеристик цифровых систем управления появляются

проблемы, нетипичные для аналоговых и механических систем. Среди них оценка устойчивости и управляемости с учетом особенностей цифровой реализации системы управления, а именно дискретность, запаздывания по времени в передаче и обработке информации, отсутствие синхронизации работы каналов управления, использование нескольких периодов расчета и выдачи сигналов, использование цифровых линий межканальной связи для контроля информации и обеспечения идентичности вычислительных процессов в разных каналах. С этой точки зрения, результаты исследований, представленные в работе весьма актуальны и представляют несомненный интерес для разработчиков цифровых ЭДСУ вертолетов.

Объектом исследования являются цифровые резервированные системы управления самолетов с высоким уровнем автоматизации.

Предмет исследования. В работе исследуются методы исследования и динамика высокоавтоматизированных самолетов, оборудованных цифровыми ЭДСУ, проводится анализ влияния резервирования, асинхронности, многотактности систем управления на устойчивость и управляемость самолетов.

Научная значимость и теоретическая новизна работы. Развита теоретическая подходы к исследованию самолетов с системами управления современной архитектуры и большим объемом функций управления и мониторинга. Эти методы позволяют учесть дискретность по времени, резервирование, асинхронность, многотактность, использование межканальной связи для контроля и выравнивания информации. Обнаружено влияние резервирования на устойчивость и динамические характеристики системы «самолет-ЭДСУ» при асинхронном режиме работы каналов ЭДСУ, показано, что передаточная функция, определяющая устойчивость замкнутой системы нелинейным образом зависит от коэффициентов усиления. Оценен уровень этой нелинейной составляющей и ее зависимость от наличия высокочастотных тонов упругих колебаний. Обоснована необходимость выравнивания значений интегральных звеньев и дискретных сигналов разных каналов. Выявлено искажение динамических характеристик элементов ЭДСУ при выравнивании их выходных сигналов с помощью межканальной связи, которое заключается в дополнительном запаздывании, изменении коэффициента усиления интеграла и изменении постоянной времени фильтра. Предложен метод структурной декомпозиции многосвязных систем (ММО – Multiple Input Multiple Output), заключающийся в расчете собственных значений матрицы передаточных функций разомкнутой системы для исследования устойчивости замкнутой системы. На базе методов теории Марковских процессов предложен подход к расчету вероятности отключения ЭДСУ вследствие т.н. «сбоев» информации.

Практическое значение работы.

Разработаны практические методы расчета устойчивости и динамических характеристик самолетов со сложными цифровыми ЭДСУ. Предложен

подход к экспериментальному частотному исследованию реальных резервированных цифровых систем управления, разработан метод расчета их эталонных характеристик с учетом особенностей цифровой реализации ЭДСУ, их асинхронности, многотактности и выравнивания сигналов разных каналов. Обоснованы требования к частотам обновления информации разных сигналов исходя из условия обеспечения устойчивости, хороших переходных процессов и эффективной работы системы контроля. Разработаны алгоритмы синхронизации положений дискретных ключей в разных каналах ЭДСУ в форме конечных автоматов. Предложен подход к выбору параметров системы контроля на основании двумерных функций распределения рассогласований между каналами.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

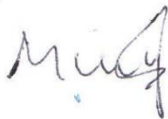
По содержанию автореферата можно сделать ряд **замечаний**.

1. В работе не рассмотрен случай реализации в ЭДСУ режимов автоматического управления, таких как стабилизация параметров полета, управление в режимах улучшения устойчивости и управляемости (СУУ), которые играют большую роль в автоматизации управления вертолета.

2. В предложенном методе структурной декомпозиции не раскрыт физический смысл и не исследованы свойства собственных векторов матрицы передаточных функций многосвязной системы управления.

Сделанные замечания не влияют на высокий уровень диссертации, в которой приведено решение ряда научных задач, имеющих большое значение для решения важных народно-хозяйственных задач. Диссертационная работа представляет собой законченную работу и удовлетворяет всем требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что автор Баженов Сергей Георгиевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов»

Главный конструктор
АО «МВЗ им. М.Л. Миля»
доктор технических наук



С.Ю. Есаулов

Подпись С.Ю. Есаулова заверяю
Начальник отдела кадров



ПАО «Корпорация «Иркут»
Ленинградский проспект, д. 68
Москва, 125315, Россия
Телефон: (495) 777-21-01
Факс: (495) 221-36-39



inbox@irkut.com
www.irkut.com
ОКПО 07504910
ОГРН 1023801428111
ИНН 3807002509, КПП 997850001

Публичное акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Иркут»

22.01.2018 № 720
На № _____ от _____

Учёному секретарю
диссертационного совета Д 212.125.12
Московского авиационного института
(национального исследовательского
университета)
к. т. н., доценту А. В. Старкову

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

Уважаемый Александр Владимирович!

Направляю Вам отзыв на автореферат диссертационной работы Баженова Сергея Георгиевича на тему: «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолётов», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальностям 05.07.09 – «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

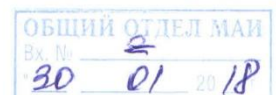
Приложение: Отзыв на автореферат диссертации С. Г. Баженова,
2 экз. на 6 листах каждый.

Вице-президент по разработке АТ –
Директор Инженерного центра,
Главный конструктор МС-21,
кандидат технических наук



К. Ф. Попович

Исп. А. Н. Митриченко
Тел. +7(495)777-21-01, доб. 77-54



УТВЕРЖДАЮ

Старший вице-президент,
Исполнительный директор,
кандидат технических наук



В. Б. Прутковский

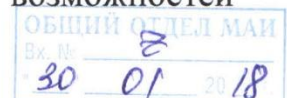
» 01 2018 г.

ОТЗЫВ

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

Главной тенденцией авиастроения настоящего времени является повышение уровня автоматизации пассажирских самолетов за счёт внедрения цифровых систем управления полётом. Такие системы помимо обеспечения желаемых характеристик устойчивости и управляемости позволяют реализовывать дополнительные функции, связанные с повышением уровня комфорта пилотирования, предотвращением выхода самолёта на критические режимы полёта, функциями обеспечивающие снижение нагрузок на конструкцию самолёта, что позволяет расширить область условий эксплуатации самолёта, повысить уровень безопасности полётов, увеличить ресурс конструкции.

Начиная с самолетов типа Ту-204, Ил-96 практически все современные российские пассажирские самолеты имеют цифровые системы дистанционного управления (ЦСДУ). Кардинальное увеличение, вычислительных, логических и информационных возможностей



современных ЦСДУ обеспечило значительное расширение функциональных возможностей систем управления, но привело к резкому росту числа решаемых на борту вычислительных задач. Также, это привело к значительному повышению объема информационного обмена между бортовыми системами и расширению требований к его характеристикам. Серьезное усложнение используемых алгоритмов и переход на новый уровень человеко-машинного интерфейса также увеличило требования к надежности, степени резервирования, глубине контроля и точности выполнения задач.

В связи с этим важной проблемой является оценка изменений динамических характеристик ЦСДУ, вызванных резервированием, кворумированием и особенностями цифровой реализацией систем управления, такими как асинхронность, многотактность и выравнивание информации. Как правило, эти вопросы остаются вне рассмотрения, в силу их сложности и именно их решение является основой диссертационной работы.

В силу высокой логической сложности законов управления серьезной проблемой становится обеспечение одинаковых состояний резервированных каналов при наличии возмущений в переходных процессах, чему в работе уделяется большое внимание.

Объектом исследования диссертационной работы являются цифровые системы дистанционного управления ЦСДУ современных магистральных самолетов с высоким уровнем автоматизации управления.

Предметом исследования являются методы расчета характеристик сложных резервированных асинхронных, многотактных ЦСДУ самолетов, особенности их динамики, принципы синхронизации вычислительных процессов в разных каналах ЦСДУ и анализ их влияния на динамические

свойства системы, а также методы оценки устойчивости замкнутой системы «самолет-ЦСДУ».

Автор разработал комплекс методов по исследованию цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления самолетов с современным набором функций, продемонстрировал результаты их применения.

Разработанные методы направлены на расчет устойчивости, динамических характеристик, параметров контроля, базируются на частотных методах анализа и учитывают основные особенности построения и функционирования цифровых систем управления.

В работе описаны и решены следующие основные задачи:

1. С помощью предложенного метода рассматривается задача устойчивости системы «самолет - резервированная ЦСДУ», учитываются несинхронность работы каналов ЦСДУ, кворумирование, работа системы встроенного контроля. Устойчивость оценивается по уровню возмущений переходных процессов по нормальной перегрузке, угловой скорости тангажа и положению рулевых поверхностей. Также, здесь автор предлагает методику определения максимальных возможных запаздываний и периодов обновления основных информационных сигналов обратных связей, из условия обеспечения необходимых запасов устойчивости системы «самолет - ЦСДУ».

2. Автором предложено рассматривать систему «самолет-резервированная ЦСДУ» как многосвязную систему, а ее устойчивость оценить путем расчета собственных значений матрицы передаточных функций разомкнутой системы «самолет-ЦСДУ». Данный метод позволяет получить эталонные частотные характеристики системы с учетом многоканальности, кворумирования и выравнивания сигналов, что важно при

экспериментальных исследованиях многоканальных асинхронных цифровых систем.

3. Произведен анализ особенностей динамики многотактной и многоканальной информационной системы. Предложен метод согласования работы каналов системы управления, т.е. выравнивания информации и синхронизации состояний различных каналов ЦСДУ с использованием конечных автоматов, произведен анализ эффективности их работы при различных характеристиках входных сигналов и отказах.

4. Детально рассмотрены проблемы, связанные с построением эффективной системы контроля ЦСДУ. Предложен подход к расчету вероятности ложного срабатывания системы управления из-за сбоев данных и определены требования к параметрам системы контроля, позволяющие их минимизировать. На основе требований к вероятности ложного срабатывания системы контроля и данных стендовых и летных испытаний разработана методика формирования двумерных функций распределения рассогласований между каналами, использование которых позволяет сделать предварительный выбор параметров алгоритмов контроля - порогов срабатывания, времени подтверждения.

Разработанные в диссертационной работе методы использовались в процессе проектирования и при отработке цифровых систем дистанционного управления современных российских пассажирских самолетов.

В работе приведен большой объем расчетных данных и материалов натурных испытаний.

К содержанию автореферата можно сделать следующие замечания:

1. Не рассмотрены особенности динамических характеристик, а также согласования сигналов датчиков первичной информации (например, угловых

скоростей и перегрузок) с учетом различной архитектуры их аппаратной части и мест установки.

2. Сформирован методический подход, но не рассмотрен в деталях практически важный случай использования цифрового управления приводами системы дистанционного управления, когда блок управления и контроля находится непосредственно на приводе, а связь с вычислителями ЦСДУ осуществляется по каналам межмашинного обмена.

3. Не проанализировано на конкретных примерах взаимодействие резервированной асинхронной многотактной ЦСДУ и аэроупругих тонов колебаний конструкции, присутствующих в сигналах обратных связей по угловым скоростям и перегрузкам. Эти вопросы важны при разработке активных систем управления (систем снижения маневренных и ветровых нагрузок на конструкцию самолета, повышения комфорта экипажа и пр.) и их следует рассмотреть при дальнейшем развитии работы.

Сделанные замечания не снижают общий высокий уровень диссертации в которой представлено решение актуальных задач, имеющих большую важность для авиационной науки и промышленности. Диссертационная работа представляет собой законченную работу и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям.

Вывод: диссертационная работа Баженова Сергея Георгиевича выполнена на современном научном и техническом уровне, является законченной научно-исследовательской работой. По новизне, научной и практической ценности отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов».

Вице-президент по разработке АТ –
Директор Инженерного центра,
Главный конструктор МС-21,
кандидат технических наук

К. Ф. Попович

Зам. Главного конструктора
по системам управления –
Начальник отделения

А. Н. Митриченко

Начальник отдела моделирования
систем управления

С. В. Байков

Место работы: ПАО «Корпорация «Иркут».

Рабочий адрес: 125315, г. Москва, Ленинградский проспект, дом 68.

Рабочий телефон: +7 (495) 777-21-01, доб. 82-80.

Адрес электронной почты: Sergey.Baykov@irkut.com.

Подписи К. Ф. Поповича, А. Н. Митриченко,
С. В. Байкова заверяю.

Руководитель департамента управления
персоналом ПАО «Корпорация «Иркут»



А. Р. Бахарев