



125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4,
Учёный совет МАИ, Учёному секретарю
диссертационного совета,
к.т.н., доценту А.В. Старкову

20. 12. 2017 № 901/5504

На № _____

/сопроводительное письмо к отзыву
ведущей организации/

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертацию Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов (Авиационная и ракетно-космическая техника)».

Приложение: 2 экземпляра отзыва на 6 листах каждый.

Ученый секретарь НТС МИЭА, к.т.н.
125167 Москва, Авиационный пер., д. 5
(495) 223-27-09 доб. 34-05

Кербер

О.Б. Кербер



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
Московского института
электромеханики и автоматики, д.т.н.



А.Г. Кузнецов

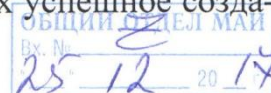
2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Баженова Сергея Георгиевича на тему «Динамика цифровых резервированных асинхронных многотактных систем управления магистральных самолетов», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов (Авиационная и ракетно-космическая техника)»

Актуальность работы. 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 решением ряда новых проблем, которые не свойственны аналоговым дистанционным, а также механическим системам. На начальном этапе формируются требования к характеристикам ЦСДУ, проводится оценка влияния цифровой реализации на динамические характеристики самолета, что требует разработки новых методов исследования и моделирования сложных цифровых систем управления. В частности, следует учитывать асинхронность выполнения операций в разных каналах резервированной ЦСДУ, использование межмашинного обмена для контроля и выравнивания информации, что, в общем случае, влияет на динамические характеристики и ведет к отличию 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 синхронизация состояний для обеспечения идентичности вычислительных процессов в различных каналах ЦСДУ. Построение эффективной системы контроля требует знания распределений расогласований между контролируемыми сигналами, которые зависят от вышеупомянутых особенностей построения и функционирования ЦСДУ.

Целью исследования является разработка методов исследования сложных резервированных асинхронных многотактных систем управления, создание программных средств реализующих эти методы и получение знаний об особенностях динамики сложных ЦСДУ, которые обеспечат их успешное созда-



ние и внедрение.

Объектом исследования являются сложные цифровые системы дистанционного управления высокоавтоматизированных самолетов.

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

Общая характеристика диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и двух приложений. Ее объем составляет 314 страницы, в том числе 285 страниц основного текста и 29 страниц приложений, 152 рисунка и 12 таблиц. Список использованной литературы содержит 96 наименований.

Во введении проведен анализ современного состояния и определено место работы в исследованиях резервированных цифровых систем управления самолетов. Показана необходимость разработки методов и средств, позволяющих учесть отличительные особенности построения и функционирования таких систем.

В первой главе проведен обзор основных особенностей построения и функционирования современных цифровых систем дистанционного управления самолетов и определен предмет исследования. Приведены основные требования, предъявляемые к самолету с ЦСДУ, рассмотрен достигнутый уровень функциональности ЦСДУ. Описан современный подход к разработке высокоинтегрированных цифровых систем. Рассмотрены особенности построения и функционирования ЦСДУ, учет которых необходим при анализе устойчивости и характеристик управляемости самолета с цифровой системой управления, а именно, асинхронность, многотактность, выравнивание информации для обеспечения идентичности вычислительных процессов и состояний разных каналов.

Во второй главе рассмотрены особенности динамики асинхронной одноканальной системы управления. Представлены типовые временные циклограммы работы ЦСДУ, которые реализуются при учете запаздываний, вызванных квантованием по времени, передачей информации по цифровым линиям связи, контролем входной информации и расчетом управляющих сигналов, асинхронностью и многотактностью работы ЦСДУ. Определены требования к максимальным допустимым запаздываниям в каналах обратной связи по угловым скоростям и перегрузке, исходя из оценки запасов устойчивости замкнутой системы «самолет-СДУ» и характеристик переходных процессов (колебательность, забросы и т.д.). В других каналах допустимые запаздывания обусловлены необходимостью построения эффективной системы контроля. На основе стендовых экспериментов и летных испытаний получены распределения контролируемых сигналов и их производных, что позволяет

сделать оценку рассогласований и допустимых максимальных периодов обновления информации.

В третьей главе анализируется влияние асинхронности и обмена информацией по каналам межмашинного обмена и ее выравнивания для обеспечения идентичных вычислительных процессов на устойчивость и динамические характеристики самолета с ЦСДУ. Выявлено, что передаточная функция, определяющая устойчивость замкнутой системы «самолет - многоканальная асинхронная цифровая СДУ» является нелинейной функцией коэффициентов усиления, что искажает смысл такого понятия как запас по амплитуде. Показано равенство передаточной функции, определяющая устойчивость замкнутой системы и линейной части передаточной функции системы, разомкнутой в общей точке непрерывной части. Предложена методика экспериментального исследования ЦСДУ и создано программное обеспечение для расчета эталонных частотных характеристик многоканальных ЦСДУ. Исследован эффект выравнивания информации с точки зрения свойств динамических звеньев. В области низких частот выравнивание сигнала прямой цепи эквивалентно дополнительному запаздыванию, выравнивание сигнала интеграла ведет к изменению коэффициента при интеграле, а выравнивание выходного сигнала апериодического фильтра вызывает изменение его постоянной времени.

В четвертой главе проведено исследование динамики многотактных систем. Выявлено влияние реализуемой циклограммы работы на передаточную функцию системы. Рассмотрены два практически важных случая многотактности, а именно, использование разных периодов обновления информации и расчет одного сигнала по альтернативным алгоритмам в разные моменты времени. Разработаны методы расчета динамических характеристик цифровых систем с обоими видами многотактности. Предложен подход к анализу многосвязных цифровых систем управления с помощью расчета собственных значений матрицы передаточных функций разомкнутой системы. Проведена оценка устойчивости системы «самолет-ЦСДУ» для типовых расчетных случаев, включая реконфигурацию законов управления в отказных ситуациях.

В пятой главе рассмотрены проблемы обеспечения эффективности системы контроля ЦСДУ. Исследованы параметры рассогласований между каналами ЦСДУ, вызванных асинхронностью системы, наличием случайных составляющих и сбоями информации. Синтезированы алгоритмы синхронизации дискретных сигналов цифровой резервированной системы управления, обеспечивающих идентичность состояний каналов резервированной системы, и проведена оценка их эффективности. На основе стендовых исследований и летных испытаний получены двумерные функции распределения рассогласования между контролируемыми сигналами в зависимости от уровня рассогласования и времени превышения этого уровня. На основании этих распределений сделаны рекомендации к порогам срабатывания алгоритмов контроля различных сигналов с учетом требований к вероятности ложного срабатывания системы контроля ЦСДУ.

В Заключении сформулированы основные полученные в работе результаты, отражающие научную новизну и практическую значимость работы в целом.

В приложениях приведены современные подходы к созданию интегрированных ЦСДУ современных высокоавтоматизированных самолетов и методы расчета надежности и отказобезопасности.

Научная значимость работы состоит в том, что:

- Разработаны универсальные, применимые на практике методы и средства исследования сложных цифровых систем управления современных самолетов с учетом резервирования, асинхронности, многотактности и выравнивания информации между каналами ЦСДУ;
- Проведено исследование устойчивости замкнутой системы «самолет – резервированная асинхронная ЦСДУ». Выявлены особенности структуры передаточной функции, определяющей устойчивость, заключающиеся в ее нелинейной зависимости от коэффициентов усиления, что искажает понятие запаса устойчивости по амплитуде;
- Показано, что выравнивание информации между каналами влияет на динамические свойства системы, получены аналитические выражения для эквивалентных передаточных функций, учитывающих это влияние;
- Модифицирован метод гармонического баланса с учетом транспонирования гармоник, комбинированных на нелинейных элементах в низкочастотную область, получены аналитические выражения вклада этих гармоник в частотную характеристику;
- Предложены алгоритмы выравнивания выходных сигналов фильтров и интегралов а также дискретных сигналов для архитектуры, основанной на вычислительных парах;
- определен подход к выбору параметров системы контроля для обеспечения эффективности контроля и выполнения требований к вероятности ложного срабатывания.

Практическая значимость работы заключается в создании методов и средств исследований, которые могут быть непосредственно использованы при разработке резервированных ЦСДУ современных самолетов с высоким уровнем автоматизации. Полученные результаты по влиянию резервирования, асинхронности, многотактности и выравнивания информации ЦСДУ на устойчивость замкнутой системы «самолет-ЦСДУ», на уровень рассогласований между каналами, на искажение динамических характеристик звеньев ЦСДУ имеют важное значение для процесса разработки и отработки систем управления. Адаптация методов частотного анализа применительно к резервированным асинхронным системам, предложенная в работе, позволяет рассчитать эталонные частотные характеристики ЦСДУ, что имеет большое значение для экспериментальной отработки систем управления и верификации реализованных законов управления. Результаты, полученные при исследова-

нии работы системы контроля, также представляются весьма полезными для практики.

Рекомендации по практическому использованию и развитию результатов работы. Рекомендуется интенсифицировать работы по более широкому внедрению полученных результатов, а также разработанных методов и средств среди разработчиков цифровых систем управления. Весьма желательно распространять полученные результаты среди разработчиков авиационной техники. Также предлагается продолжить работы по научному сопровождению разработки сложных цифровых систем управления и созданию программных средств по анализу сложных резервированных ЦСДУ.

Обоснованность и достоверность результатов. Научные результаты диссертации получены с применением методов современной теории автоматического управления, цифровых систем управления, частотного анализа, теории многомерных систем управления, методов теории случайных процессов, математического моделирования и математических методов обработки стендовых исследований и летных испытаний. Эти методы, квалифицированно применены в работе для решения корректно поставленных задач, что позволило получить практически значимые результаты. Достоверность результатов, полученных аналитически и с использованием разработанных программных средств подтверждены результатами компьютерного и стендового моделирования ЦСДУ самолетов Ту-204, Ту-334, Сухой Суперджет 100, МС-21.

Апробация работы. Результаты диссертации были представлены на ряде российских и международных конференций, среди которых 7-я Всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015) и 8-й Международный аэрокосмический конгресс (IAC - 15).

Публикация результатов. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, представлены в монографии, в 21 публикации в рецензируемых журналах и сборниках научных трудов, а также в сборниках тезисов конференций. Из них 12 статей в журналах из перечня ВАК РФ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертации.

1. В диссертации не уделено должного внимания взаимодействию многоканальной асинхронной ЦСДУ с высокочастотными тонами аэроупругих колебаний конструкции. Приведены лишь общие аналитические выражения для транспонирования тонов в низкочастотную область, но конкретные примеры влияния резервирования и асинхронности на запасы устойчивости системы «ЦСДУ-упругий самолет» не приведены;
2. В работе рассмотрен лишь случай фиксированной циклограммы работы ЦСДУ, тогда как на практике она является «плавающей», т.е. слабо меняющейся по времени;
3. Приведенные в работе примеры относятся, в основном, к динамике не-

маневренных самолетов, тогда как для маневренных самолетов, в силу их более высоких собственных частот и, соответственно, быстрой динамики рассмотренные проблемы представляются более актуальными.

Общая характеристика работы. Диссертация С.Г. Баженова представляет собой самостоятельную завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, связанную с получением научно-технических решений, внедрение которых привело к улучшению экономики и повышению обороноспособности государства. Новые научные результаты, полученные автором, имеют большое теоретическое и практическое значение. Верификация использованных моделей, методов и полученных результатов проведена на основе большого объема компьютерного моделирования, стендовых экспериментов и летных испытаний.

Работа отвечает критериям Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым в докторских диссертациях, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика и управление движением летательных аппаратов (Авиационная и ракетно-космическая техника)».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании специалистов тематического направления 900 Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА), протокол №7 от 19 декабря 2017 г.

Начальник отдела 901 МИЭА, д.т.н.
125167 Москва, Авиационный пер., д. 5
(495) 223-27-09 доб. 46-48

А.В. Гребёнкин

Ученый секретарь НТС МИЭА, к.т.н.
125167 Москва, Авиационный пер., д. 5
(495) 223-27-09 доб. 34-05

О.Б. Кербер

25.12.2017