

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), академик РАН



Чернышев С.И.

«05» 09 2017 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу соискателя ученой степени кандидата технических наук ЕФАНОВА Дмитрия Евгеньевича «Аналитическое решение задачи сохранения заданных характеристик устойчивости воздушного судна при реконфигурации системы управления» по специальности 05.22.14 - Эксплуатация воздушного транспорта.

Актуальность. Необходимость повышения безопасности полетов воздушных судов (ВС) гражданского назначения определяет актуальность разработки алгоритмов реконфигурации систем управления (СУ) при отказах их элементов. Наиболее опасными с точки зрения безопасности полетов отказами являются отказы элементов исполнительной системы СУ ВС. При возникновении таких отказов изменяются располагаемые отклонения и скорости рулевых поверхностей и создаваемые ими аэродинамические силы и моменты. Компенсация последствий таких отказов осуществляется путем реконфигурации СУ при наличии избыточности ее элементов. Методы аппаратной реконфигурации (резервирования) являются наиболее эффективными и простыми в реализации. Однако в настоящее время их возможности практически исчерпаны. Из-за наличия заведомо избыточных элементов ухудшается ряд важных показателей СУ. Аппаратные методы реконфигурации не могут быть основой повышения безопасности полетов перспективных ВС, так как они вступают в противоречие с принципами обеспечения надежности и эксплуатационной технологичности. Повышение надежности в таких условиях возможно только при перераспределении функций отказавших органов управления на исправные с помощью функциональной (аналитической) реконфигурации СУ. Поэтому, несомненно, тема диссертационного исследования является весьма актуальной.

Исследования посвящены решению актуальной **научно-практической задачи** обеспечения отказоустойчивости системы управления полетом воздушного судна при отказах исполнительных подсистем путем

функциональной реконфигурации управления аналитическими методами, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Автор формулирует **цель работы** как повышение безопасности полета воздушных судов в условиях отказов и повреждений исполнительных элементов системы управления.

Для достижения поставленной цели решается **научная задача**, заключающаяся в разработке аналитического подхода к решению задачи сохранения устойчивости и управляемости воздушного судна при реконфигурации системы управления в условиях отказов и повреждений исполнительных элементов.

Рамки исследований. Область математических моделей ограничена полностью наблюдаемыми моделями ВС в пространстве состояний. Не учитываются динамические свойства исполнительных устройств, а также ограничения на амплитуды и скорости отклонения рулевых поверхностей. Область исследуемых отказов ограничена множественными внезапными отказами исполнительной системы контура штурвального управления СУ ВС, в том числе вызванными внешними повреждениями. Не рассматриваются перемежающиеся и компонентные отказы, а также, отказы измерительных и информационных подсистем. Теоретические исследования ограничены линейными стационарными динамическими многосвязными системами. Анализ полученных результатов осуществляется на примерах линейных математических моделей ВС.

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы из 97 наименований, списка сокращений, списка иллюстративного материала и 2-х приложений общим объемом 139 страниц печатного текста. Основная часть диссертации изложена на 134 страницах и содержит 20 рисунков и 6 таблиц.

В первом разделе на основе статистического анализа авиационных происшествий в гражданской авиации выявлены наиболее характерные отказы, возникающие на борту ВС и оценены вызываемые ими последствия. Приводятся требования нормативно-технических документов к обеспечению безопасности полета при возникновении отказов.

При анализе средств обеспечения безопасности полета рассматривается аппаратная и аналитическая избыточность исполнительных элементов СУ современных ВС. Показывается, что наличие аналитической избыточности позволяет использовать одну и ту же рулевую поверхность для управления в различных каналах. В этом случае для повышения безопасности полета воздушных судов при возникновении отказов возможно осуществлять реконфигурацию СУ путем перераспределения функций отказавших элементов между исправными.

Приводится краткий обзор подходов к реконфигурации СУ. Показывается актуальность разработки аналитических методов реконфигурации СУ при отказах. На этой основе ставится задача исследований, формулируются основные исходные положения и ожидаемые результаты.

Второй раздел посвящен выбору математической модели, формулировке метода размещения полюсов (собственных значений) на основе специальной декомпозиции, построению алгоритмов синтеза, а также решению задач аналитического синтеза законов управления для изолированного продольного и бокового движения и построению множества эквивалентных ЗУ.

В третьем разделе описывается аналитическое решение задачи реконфигурации СУ на основе метода размещения полюсов с учетом известной информации о параметрах ВС. Формулируется и решается прикладная задача реконфигурации СУ ВС при наличии отказов в исполнительной системе. В аналитическом виде представлено решение задачи реконфигурации с помощью аналитического множества стабилизирующих законов управления.

В результате проведенных исследований автором разработаны теоретические подходы к аналитической реконфигурации системы управления воздушного судна с обеспечением заданных характеристик устойчивости при отказах исполнительных элементов системы управления, основанные, в том числе, на получении следующих **новых научных результатов**:

1. Аналитический подход к решению задачи сохранения устойчивости и управляемости воздушного судна при реконфигурации системы управления в условиях отказов и повреждений исполнительных элементов;

2. Методика построения множества эквивалентных аналитических законов системы управления воздушного судна, обеспечивающих заданные характеристики устойчивости в условиях отказов и повреждений исполнительных элементов;

3. Аналитические выражения стабилизирующих законов управления для линеаризованных моделей продольного и бокового движения воздушного судна;

4. Методика практического использования разработанных законов реконфигурации системы управления воздушного судна в условиях отказов и повреждений исполнительных элементов.

Научная новизна полученных результатов определяется следующим:

1. Впервые на основе декомпозиционного метода размещения полюсов и учета информации о параметрах воздушного судна в исправном и неисправном состояниях решена задача реконфигурации системы управления воздушного судна, обеспечивающая заданные характеристики устойчивости.

2. Впервые для линеаризованных моделей продольного и бокового движения воздушного судна с учетом перекрестных связей между каналами рулевых органов получены аналитические (символьные) выражения стабилизирующих законов управления.

3. Доказано, что использование реконфигурации законов управления при сохранении управляемости воздушного судна, позволяет эффективно

компенсировать последствия отказов и повреждений исполнительных элементов системы управления в каждом из каналов управления при наличии эффективности оставшихся органов управления.

Теоретическая значимость проведенных исследований заключается в развитии аналитических методов реконфигурации системы управления воздушного судна, обеспечивающих заданные характеристики.

Практическая значимость результатов определяется следующим:

1. Законы реконфигурации системы управления ВС, полученные на основе аналитического множества, являются стабилизирующими (обеспечивают устойчивость движения летательного аппарата) и ориентированы на существующий уровень характеристик вычислительных и исполнительных устройств. Показано, что применение данного подхода позволяет успешно парировать последствия отказов исполнительных элементов системы управления.

2. Эффективность предлагаемых алгоритмов реконфигурации продемонстрирована на задаче реконфигурации системы управления самолета. Характер динамических процессов, достигаемый за счет предлагаемых алгоритмов, позволяет обеспечить безопасность полета при возникновении отказов элементов систем управления рулем высоты и элеронов в широком диапазоне высот и скоростей полета.

Рекомендации по использованию результатов и выводов. Все рассматриваемые в работе задачи сводятся к решению алгебраических уравнений аналитическими методами. В данном случае важным является не только получение их решений, но и возможность исследования параметрических зависимостей решения задачи от различных коэффициентов модели объекта, что позволяет получить условия разрешимости задачи управления и выявить существование множества ее решений. В практических задачах это позволяет дать исчерпывающий ответ на следующий вопрос: можно ли обеспечить удовлетворительное управление самолетом при наличии той или иной совокупности отказов и как реконфигурировать управление в этих условиях.

Полученные законы и прикладные результаты реконфигурации СУ гражданского самолета, показывающие высокую эффективность использования функциональной избыточности исполнительной подсистемы, могут быть использованы для обоснования степени резервирования приводов рулевых поверхностей, предварительного синтеза эффективных законов реконфигурации, а также на этапе конструирования облика перспективных ВС для оптимизации характеристик рулевых поверхностей и их систем управления с учетом требований к отказобезопасности СУ.

В целом предложенная в работе методология может быть использована на самолетах пассажирской и военно-транспортной авиации, а также при создании перспективных беспилотных комплексов различного назначения. Полученные автором результаты могут быть использованы как на этапах разработки перспективных отказоустойчивых СУ, так и при

модификации действующих систем. Научные положения и выводы диссертации, новые постановки задач управления и методы их решения могут быть использованы при построении теоретических разделов соответствующих дисциплин, преподаваемых в гражданских учебных заведениях при обучении студентов.

Достоверность. Методы и алгоритмы, разработанные автором, базируются на фундаментальных результатах теории систем, справедливость которых не вызывает сомнения. Математические модели ВС и их СУ протестированы на соответствие реальным объектам на основе сравнения результатов моделирования с результатами летных экспериментов. Полученные аналитические результаты хорошо согласуются с данными численных экспериментов и не противоречат накопленному опыту создания современных систем управления.

Апробация. Основные результаты работы опубликованы единолично и в соавторстве в 9 научных трудах (6 из которых - статьи в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК), использованы в процессе выполнения НИР по созданию отказобезопасных систем управления рулями воздушных судов и при формировании облика отказоустойчивой системы управления самолета гражданской авиации, прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах.

Целесообразно отметить следующие **недостатки** диссертационной работы:

1. В разработанных методах не учитываются погрешности измерений параметров состояния и управления, не проанализирована чувствительность реконфигурации к подобным погрешностям.
2. При решении задачи реконфигурации системы управления самолета не рассмотрены наиболее опасные отказы, а именно увод руля в крайнее положение и заклинивание в положении, отличном от балансировочного.
3. Недостаточно объяснено сужение множества решений и получение единственного решения в практических задачах реконфигурации системы управления самолета.
4. В автореферате и диссертации отсутствует описание некоторых введенных обозначений (A , B , C), не указаны размерности матриц.

Несмотря на названные недостатки, следует отметить, что в целом цель исследований достигнута, поставленные научные и практические задачи выполнены.

Заключение. Диссертация ЕФАНОВА Дмитрия Евгеньевича «Аналитическое решение задачи сохранения заданных характеристик устойчивости воздушного судна при реконфигурации системы управления» является законченной научно-исследовательской работой и по своему научному уровню и практической ценности полученных результатов

соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о порядке присуждения учёных степеней, утвержденным постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 и паспорту специальности 05.22.14 - Эксплуатация воздушного транспорта.

Работа выполнена автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. Научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное научно-практическое значение. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание работы в целом. Содержание работы соответствует теме и научной задаче. Текст диссертации оформлен в соответствии с предъявляемыми требованиями. Работа имеет выраженную структуру и отличается логичностью изложения. Материалы изложены в корректной форме с глубокой проработкой всех вопросов, выносимых на защиту. Диссертация написана научно-техническим языком, стиль изложения материала строг и лаконичен. Использована принятая в данной научной области терминология. Имеются ссылки на первоисточники. Работа содержит необходимое количество исходных данных, формул и иллюстраций. По каждому разделу и работе в целом сформулированы четкие, аргументированные выводы.

В работе решена научная задача разработки аналитического подхода к решению задачи сохранения устойчивости и управляемости воздушного судна при реконфигурации системы управления в условиях отказов и повреждений исполнительных элементов, имеющая важное значение для развития авиационной техники РФ, а ее автор, ЕФАНОВ Дмитрий Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв составлен кандидатом технических наук, доцентом, начальником НИО-15 ЦАГИ Баженовым Сергеем Георгиевичем. Отзыв обсужден и утвержден на заседании НИО-15 ЦАГИ «4» сентября 2017 г., протокол № 14.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.
Тел. +7 495 556 4205, эл. почта: info@tsagi.ru

Начальник отделения №15 ЦАГИ
кандидат технических наук, доцент



Баженов С.Г.