

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук,

старшего научного сотрудника

Ракова Дмитрия Леонидовича

на диссертационную работу Нагорнова Андрея Юрьевича

«Обеспечение аэроупругой устойчивости беспилотных летательных аппаратов из композиционных материалов», представленной на соискание ученой степени

кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика,

прочность машин, приборов и аппаратуры».

### Актуальность темы исследования

Объектом исследования в диссертации является беспилотный летательный аппарат (БЛА) – представитель одного из наиболее динамично развивающихся классов современных летательных аппаратов. При проектировании БЛА требуется выполнить требования аэро- и аэросервоупругости во всем диапазоне высот и скоростей. Сложность решаемой при этом задачи определяется целым рядом моментов, связанных с недостаточной сбалансированностью рулей, их малой жесткостью, применением электромеханических приводов, имеющих невысокую жесткость и значительную инерционность, использованием композиционных материалов, характеризующегося существенным разбросом механических характеристик, конструктивно-компоновочными особенностями двухбалочной схемы. Решение задач аэро- и аэросервоупругости в этих условиях требует совершенствования существующих методов исследования и разработки новых математических моделей, учитывающих специфические особенности рассматриваемых задач. Все это говорит об актуальности темы диссертационного исследования.

### Научная новизна

1. Применительно к БЛА самолетного типа с двухбалочной схемой оперения, выполненного из композиционных материалов, разработаны

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

03 12 20 20

математические модели аэроупругих колебаний летательного аппарата, одна на основе метода Ритца, другая – на основе метода конечных элементов.

2. На основе комплексных исследований аэроупругой устойчивости БЛА с использованием разработанных моделей получены новые результаты по безрулевым и рулевым формам флаттера БЛА данного типа.

3. В интересах решения задачи обеспечения аэроупругой устойчивости БЛА с системой автоматического управления предложен алгоритм выбора фильтров, направленных на подавление упругих тонов колебаний планера летательного аппарата.

**Достоверность работы подтверждается:**

– корректным применением положений и методов известных методов аэро- и аэросервоупругости и теории автоматического управления;

– строгостью применяемых в исследованиях математических моделей;

– верификацией разработанных математических моделей посредством сопоставления полученных результатов на тестовой модели крыла конечного размаха с применением различных методов составления уравнений аэроупругих колебаний конструкции; сравнения результатов, полученных по методу Ритца и методу конечных элементов для безрулевых форм флаттера БЛА, а также сопоставления полученных решений с известными результатами исследований аэроупругости летательных аппаратов;

– применением для численного моделирования аэроупругих явлений апробированных и широко применяемых на практике программных комплексов MATLAB и Nx Nastran.

**Практическая значимость**

1. Разработан арсенал инструментов (в виде моделей и компьютерных программ) для исследования флаттера и аэроупругой устойчивости дозвукового БЛА с двухбалочным хвостовым, выполненного из композиционного материала.

2. Проведены комплексные исследования флаттера БЛА, которые позволили сформулировать рекомендации по улучшению характеристик

конструкций планера БЛА с целью повышения критических скоростей рулевых форм флаттера.

3. С использованием предложенного диссертантом алгоритма выбраны конкретные параметры фильтров, направленных на подавление упругих тонов колебаний планера БЛА рассматриваемого типа.

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цели и задачи работы, раскрыты научная новизна, научная и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ состояния проблемы флаттера и аэроупругой устойчивости с САУ БЛА самолетного типа двухбалочной схемы, выполненного из композиционных материалов. Проанализированы причины и обстоятельства, обостряющие проблемы аэроупругости подобных летательных аппаратов. Представлен обзор работ по вопросам аэро- аэросервоупругости. Приведено описание объекта и предмета исследования. Дана постановка задачи исследования.

Во второй главе представлены разработанные диссертантом математические модели, предназначенные для исследования флаттера БЛА с двухбалочной схемой оперения, выполненного из композиционных материалов, и основные результаты проведенных исследований. Автором диссертационной работы:

1. Разработаны математические модели аэроупругих колебаний прямого крыла большого удлинения, выполненного из композиционного материала. В первой модели, построенной на основе метода Ритца, при определении аэродинамических сил применяются гипотезы квазистационарности и нестационарности (гармоничности), при этом обтекание крыла считается плоским. Во второй модели, построенной на основе метода конечных элементов, аэродинамические силы находились панельным методом с учетом особенностей типа диполей. Анализ результатов показал, полученных с использованием

данных моделей показал, что учет нестационарности обтекания и конечности размаха крыла дает наибольшее значение критической скорости флаттера.

2. Применительно к БЛА с двухбалочным хвостовым оперением, выполненного из композитного материала, построена математическая модель для определения характеристик собственных конструкции планера.

3. В интересах исследования безрулевых и рулевых форм флаттера БЛА рассматриваемого типа разработаны соответствующие математические модели исследования аэроупругих колебаний, первая – на основе метода Ритца, вторая – на основе метода конечных элементов. С использованием разработанных моделей выполнены комплексные исследования аэроупругой устойчивости дозвукового композитного БЛА с двухбалочным хвостовым оперением. Исследованы безрулевые и рулевые формы флаттера БЛА. Выявлено, что несмотря на то, что приращение местных углов атаки оперения вызывает приращение местных углов атаки крыла вследствие конструктивной связи крыла с оперением посредством упругих хвостовых балок, критические скорости безрулевого флаттера значительно превышают максимальную допустимую скорость для подобных БЛА. Критичными для БЛА данного типа являются рулевые формы флаттера, которые могут возникать при скоростях, значительно ниже максимально допустимых.

В третьей главе рассмотрены актуальные вопросы, связанные с реализацией требований аэросервоупругости при проектировании БЛА. В работе структура и параметры САУ, а также параметры расчетных режимов полета, считаются известными. Ставится задача провести исследование аэроупругой устойчивости БЛА с САУ и в случае неустойчивости (или недостаточных запасов устойчивости) контура стабилизации упругого БЛА, выбрать структуру и параметры фильтров, направленных на подавление упругих колебаний планера БЛА. Предлагается оригинальный алгоритм выбора параметров фильтров, направленных на подавление упругих тонов колебаний планера БЛА рассматриваемого типа, суть которого состоит в следующем:

1) с использованием многостепенных моделей аэроупругих колебаний, представленных во второй главе, определяются передаточные функции БЛА, которые затем представляются в виде отдельных звеньев второго порядка, аппроксимирующих локальные резонансные пики;

2) исследуется устойчивость разомкнутого контура системы стабилизации упругого БЛА и в случае отсутствия необходимых запасов устойчивости системы выбираются параметры фильтров, предназначенных для амплитудного подавления резонансов на частотах упругих колебаний БЛА.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Диссертация Нагорнова А.Ю. на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры». Основные положения и результаты диссертации представлены в 5 научных трудах, в том числе 2 – в рецензируемых научных журналах перечня ВАК, рекомендованных для публикации результатов диссертаций. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

### **Замечания по диссертации**

1. В диссертационной работе предлагается использовать метод начальных параметров в дифференциальной форме для расчета собственных форм колебаний БЛА. В этом случае для нахождения собственных частот колебаний БЛА приходится многократно численно решать системы обыкновенных дифференциальных уравнений (85), что является достаточно трудоемкой задачей. Из текста диссертации не ясно, какие преимущества дает метод начальных параметров по сравнению с другими методами решения задачи о собственных колебаниях и чем обосновано его использование.

2. В диссертации не раскрыт способ получения массово-инерционных характеристик конструкции БЛА, используемых в расчетах на флаттер.

3. Полученные во второй главе результаты показали, что для рассматриваемого в диссертационной работе БЛА с двухбалочным оперением

характерны рулевые формы флаттера в диапазоне полетных скоростей. Автор связывает этот факт с отсутствием весовой балансировки органов управления. Из практики известно, что весовая балансировка органов управления является наиболее эффективным способом повышения критической скорости флаттера. Однако из текста диссертации не ясно, рекомендует ли диссертант данное техническое решение, направленное на обеспечение безопасности от рулевых форм флаттера БЛА, или предлагает иные меры, направленные на повышение критических скоростей флаттера.

4. В диссертации в качестве способа обеспечения аэроупругой устойчивости БЛА с САУ рассмотрен только один, хотя и достаточно эффективный способ обеспечения устойчивости контура стабилизации – установка специальных фильтров, и не рассмотрены иные возможные меры.

5. В таблицах 2 и 4 приведены результаты расчета безрулевых форм флаттера как отношения допускаемой скорости полета БЛА к критическим скоростям флаттера. Для более удобного восприятия результатов необходимо было сделать наоборот: привести отношение критических скоростей флаттера к допускаемой. Тогда значение отношения больше единицы означает отсутствие флаттера в полете.

6. В тексте диссертации имеются незначительные орфографические и синтаксические ошибки.

#### **Заключение по диссертационной работе**

Однако данные замечания не снижают общей положительной оценки научных результатов работы и ее практической ценности. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация Нагорнова А.Ю. выполнена на высоком уровне, а полученные результаты представляют научный и практический интерес.

Диссертация Нагорнова А.Ю. является законченной научной-квалификационной работой, которая полностью соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней»,

утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Нагорнов Андрей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».


Официальный оппонент,  
кандидат технических наук

Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт машиноведения им.  
А.А. Благонравова Российской  
академии наук (ИМАШ РАН)

Адрес: 101000, Москва, Малый  
Харитоньевский переулок, д.4

Телефон: +7 (495) 623-50-97

E-mail: rdl@mail.ru

27.11.2020г. 

Раков Дмитрий Леонидович

Подпись Ракова Дмитрия Леонидовича заверяю:



*Секция по метрологии*  
*ИМШ 1 д.т.с. Бурчева 1*