

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ПРОФЕССОРА Н.Е. ЖУКОВСКОГО**

УДК 629.7.015.4

На правах рукописи

Экз. № 1



**ЕРЁМИН МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ**

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ НА ЛОПАСТЯХ НЕСУЩЕГО  
ВИНТА ВЕРТОЛЕТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТРИММЕРАМИ С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗОК**

Специальность 2.5.14. – «Прочность и тепловые режимы летательных  
аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Жуковский – 2024

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (г. Жуковский).

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
Парышев Сергей Эмильевич, – начальник  
НИО-19 ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского,  
г. Жуковский

**Официальные  
оппоненты:** доктор технических наук,  
Шувалов Владимир Александрович,  
главный специалист АО «НЦВ Миль и  
Камов»;

доктор физико-математических наук,  
Русских Сергей Владимирович,  
доцент, профессор 602 кафедры ФГБОУ  
ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)».

**Ведущая организация:** АО «Казанский вертолётный завод»

Защита состоится «\_\_» декабря 2024 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 31.1.006.01 при Центральном аэрогидродинамическом институте по адресу 140181, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Центрального Аэрогидродинамического Института и на сайте ЦАГИ: <http://tsagi.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 31.1.006.01,  
д.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ М.А. Брутян

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Ключевые слова:** *лопасть несущего винта, управление маховым движением лопасти несущего винта вертолета, испытания в аэродинамической трубе, законы и алгоритмы системы управления маховым движением лопасти.*

### **Актуальность темы исследования:**

Режим полета вертолета с продольной скоростью характерен существенно более высоким уровнем вибраций и динамического нагружения конструкции по сравнению с летательными аппаратами самолетного типа. Причина – в несимметрии работы и обтекания наступающих и отступающих лопастей несущего винта при его вращении одновременно с поступательным движением вертолета. Указанная несимметрия приводит к интенсивным вынужденным маховым движениям лопастей несущего винта, изменяющимися по сложному гармоническому закону. Циклически изменяющиеся маховые движения лопасти приводят к уменьшению углов атаки наступающей лопасти и к увеличению углов атаки у отступающей лопасти. Из-за конструктивного увеличения углов атаки отступающей лопасти ее концевые сечения приближаются к критическим углам атаки, создавая условия для отрыва потока и схода вихрей. С ростом скорости полета, интенсивность махового движения увеличивается. Большие скорости полета в дополнение к увеличению махового движения лопасти приводят к дополнительным динамическим нагрузкам разного вида – прежде всего, к увеличению шарнирного момента в системе управления лопастями и к увеличению крутящего момента на валу несущего винта (НВ).

Применение на лопастях НВ активной системы управления является актуальным направлением исследований по снижению махового движения лопасти во время полета вертолета, и связанных с ним нагрузок, таких, как шарнирный момент лопасти, крутящий момент на валу НВ, уровни вибраций и шума от НВ. Также, рассматривается возможность использования активной системы управления в качестве дополнительного автомата перекаса. Наибольший практический интерес представляет экспериментальная отработка алгоритма действия и принципов функционирования активной системы управления лопастями НВ с целью повышения эффективности ее применения. Решению данной проблемы посвящена настоящая диссертация.

**Объектом исследования** являются несущий винт вертолета, оснащенный системой активного управления лопастями, и сама система активного управления лопастями.

**Предметом исследования** является расчетно-экспериментальная оценка уровня махового движения и нагрузок на лопасть несущего винта вертолета в зависимости от скорости полета вертолета при функционировании системы активного управления.

**Целью диссертационного исследования** является создание, демонстрация и исследования эффективности работы активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета на основе системы индивидуального управления лопастями, с помощью, установленных на них триммеров.

### **В рамках исследования поставлены следующие задачи:**

– исследованы наиболее благоприятные места и способы расположения управляющей поверхности на лопасти несущего винта вертолета, обеспечивающие достижение максимального эффекта управляющего воздействия;

– разработана конструкция лопасти несущего винта вертолета с системой индивидуального управления при помощи управляющей поверхности, расположенной на ней;

– экспериментально установлены эффективные законы и алгоритмы системы управления активными триммерами, расположенными на лопасти несущего винта;

– разработаны крупномасштабная модель и методики активного управления лопастью несущего винта вертолета в потоке аэродинамической трубы (АДТ) без вращения и с вращением;

– исследован в АДТ демонстратор активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета;

– продемонстрирована, с помощью комплексного анализа результатов исследований, возможность снижения нагрузок в системе управления вертолетом, сохранения эффективности управления во всем диапазоне скоростей полета, а также использования системы в виде дополнительного автомата перекоса.

**Методы и средства исследования.** Основным методом исследования является разработанная методическая основа исследований системы активного управления лопастью вертолета на основе постепенного усложнения параметров эксперимента и модели «от простого к сложному». Эффективность данного метода доказана всем объемом положительных результатов проведенных расчетно-экспериментальных исследований, а также главной новизной всего проекта – впервые предложено использовать управляющую поверхность в виде триммера на лопасти.

При решении поставленных задач был использован метод управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета с помощью расположенных на ней триммеров.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- Предложена и разработана концепция управления маховым движением лопасти НВ вертолета с помощью вынесенных за заднюю кромку лопасти управляющих поверхностей – триммеров, приводимых в движение пьезоприводами, что подтверждено двумя патентами, автором которых является соискатель, и что обеспечивает малую инерцию системы управления и минимальное вмешательство в конструкцию лопасти и аэродинамику профиля лопасти.

- Экспериментально доказана возможность использовать данную систему как аэродинамический автомат перекоса.

- На основе экспериментальных данных показана высокая эффективность управления маховым движением вращающейся лопасти в потоке аэродинамической трубы.

- Экспериментально уточнены законы и алгоритмы системы управления активным триммером.

**Теоретическая значимость работы** заключается в том, что совокупность проведенных расчетных и экспериментальных исследований позволила объяснить механизм снижения махового движения лопасти и нагрузок с помощью динамического отклонения триммеров, выявить возможность работы активной системы управления в прямом режиме и режиме аэроупругого реверса, а также

показала возможность использовать активную систему управления в качестве дополнительного автомата перекоса.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что разработанная система управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета эффективно влияет на шарнирный момент лопасти и крутящий момент на валу НВ, и позволяет использовать его как дополнительный аэродинамический автомат перекоса. Проведенные оценки по влиянию управления маховым движением лопасти на эксплуатацию вертолетов на высоких скоростях полета показывают возможность увеличить крейсерскую скорость полета, снизить усталостную нагрузку на конструкцию.

**Внедрение** заключается в том, что разработан, изготовлен и испытан в АДТ демонстратор активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета, представляющий собой четырех-лопастной несущий винт диаметром 6 метров, каждая лопасть которого оснащена двумя триммерами, управляемыми каждый своим пьезоприводом. Результаты исследований отмечены дипломами в конкурсе «Авиастроитель года» за 2021 год и в конкурсе ЦАГИ «За лучшие фундаментальные и поисковые теоретические и экспериментальные исследования в области аэродинамики, динамики и прочности летательных аппаратов» за 2022 год.

Основные результаты исследований внедрены в ОКБ АО «Казанский вертолетный завод» в части проработок перспективных схем несущих винтов гражданских вертолетов в качестве возможного варианта пути снижения уровня вибраций в эксплуатации.

#### **На защиту выносятся:**

– разработанная методическая система исследований активного управления лопастью вертолета на основе постепенного усложнения параметров эксперимента и модели «от простого к сложному», эффективность данного метода доказана всем объемом положительных результатов проведенных расчетно-экспериментальных исследований, а также главной новизной всего проекта – впервые предложено использовать управляющую поверхность в виде триммера на лопасти.

– разработанная активная система управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета, с помощью расположенных на ней триммеров.

– экспериментально уточненные эффективные законы и алгоритмы системы управления активным триммером.

– разработанный демонстратор активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета на основе индивидуального управления лопастями с помощью триммеров с пьезоэлектрическими приводами.

– результаты проведенных исследований по снижению махового движения лопасти в потоке аэродинамической трубы, по влиянию на шарнирный момент лопасти и продольный момент НВ, и возможности использовать его как дополнительный автомат перекоса, а также возможность снижения нагрузок в системе управления вертолетом, сохранения эффективности управления во всем диапазоне скоростей полета.

**Достоверность** полученных результатов и выводов подтверждена результатами испытаний демонстратора активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета на основе индивидуального управления лопастями с помощью триммеров с пьезоэлектрическими приводами. Результаты работы согласуются с экспериментальными данными и результатами расчётов других авторов.

Содержание диссертации полностью **соответствует паспорту специальности** 2.5.14. по пунктам 1 «Методы определения внешних нагрузок, действующих на объекты авиационной, ракетной и космической техники» и 2 «Обеспечение прочности объектов авиационной, ракетной и космической техники на основе современных аналитических и численных методов, методов натурного и полунатурного моделирования в условиях стационарных и нестационарных внешних воздействий».

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались как на отечественных, так и на международных конференциях:

- Научно-техническая конференция «Прочность конструкций ЛА», 12 – 13 декабря 2012 года, г. Жуковский;
- Десятый форум Российского вертолетного общества, МАИ г. Москва 28-29 ноября 2012 года.
- Одиннадцатый Форум Российского вертолетного общества, МАИ г. Москва 19 - 20 марта 2015 года.
- Девятнадцатая международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», 04-11 июня 2019 года, г. Евпатория;
- Научно-техническая конференция Прочность конструкций ЛА, 08 – 12 декабря 2022 года, г. Жуковский;
- 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, приуроченная к 115-летию Л.Д. Ландау, 03-08 апреля 2023 года, г. Долгопрудный;
- Двадцать третья международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики», 05-09 июня 2023 года, г. Жуковский;
- Открытый семинар ГосНИИГА «Актуальные вопросы обеспечения усталостной прочности и ресурса вертолетов гражданской авиации», 19 мая 2023 года, г. Химки;
- Открытый семинар ГосНИИГА им. Н.Д. Осипова «Актуальные вопросы обеспечения усталостной прочности и ресурса вертолетов гражданской авиации», 31 мая 2024 года, г. Москва;
- Результаты исследований отмечены дипломами в конкурсе «Авиастроитель года» за 2021 год и в конкурсе ЦАГИ «За лучшие фундаментальные и поисковые теоретические и экспериментальные исследования в области аэродинамики, динамики и прочности летательных аппаратов» за 2022 год.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 9 научных работ, из них 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, а также два Патента на изобретение:

- 1) Патент № RU 2 603 707 МПК В 64С 27/615, 2016 год;
- 2) Патент № RU 2 662 591 МПК В 64С 27/615, 2018 год.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, Заключения и списка литературы. Общий объем работы 171 стр., рисунков 147, таблиц 10, библиографических ссылок 117 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* выполнен обзор публикаций, относящихся к теме диссертации, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены основные положения научной новизны и приведено краткое изложение работы.

В главе 1 рассмотрена функциональная картина работы лопастей несущего винта вертолета при прямолинейном полете. Представлена физическая природа возникновения махового движения лопасти НВ, и какие последствия этого явления могут быть для конструкции вертолета в зависимости от режимов его полета.

Рис. 1 показывает типичный профиль вертолетных вибраций как функцию от крейсерской скорости. Максимум вибраций приходится на два режима: переходной с малыми поступательными скоростями и установившийся полет с высокой поступательной скоростью.

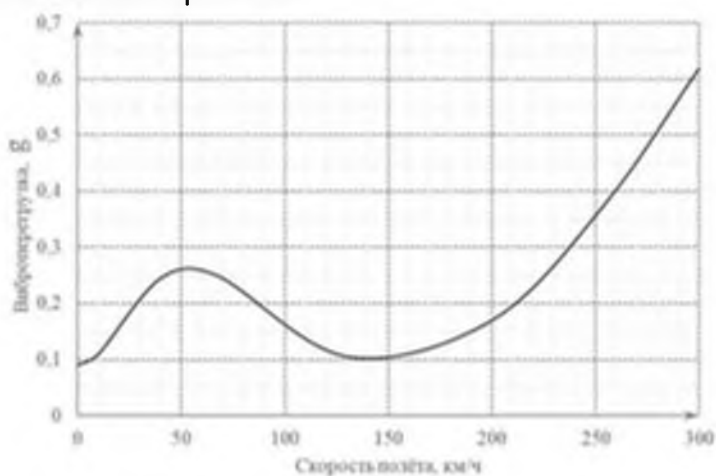


Рис. 1. - Зависимость уровня вибрации от скорости полета вертолета

В крейсерском полете в диапазоне средних и высоких скоростей интенсивное маховое движение вызывают, главным образом, аэродинамические условия, в которых работают лопасти. Периодическое изменение скоростей обтекающего лопасть потока приводит к изменению аэродинамических нагрузок на лопасти и угла атаки лопасти, а значит и к гармоническому изменению действующих на лопасти нагрузок.

### 1.1 Нагрузки, вызывающие вибрацию

Лопasti несущего винта вертолета работают в горизонтальном полете в условиях несимметричного обтекания и поэтому нагружены большими переменными силами. Причина переменности в основном заключается в следующем – см. (Рис. 2).

Сечение лопасти на радиусе  $r$  имеет скорость относительно воздуха  $v \approx \omega \cdot r + V \cdot \sin \psi$ . Здесь  $\omega$  – угловая частота вращения винта,  $V$  – скорость полета,  $\psi$  – азимутальное положение лопасти, отсчитываемое от положения лопасти сзади. Формула дает представление об основной составляющей скорости, и из нее видно, что в части диска винта, где лопасть идет вперед, скорости обтекания распределены по ее длине линейно, превышают  $\omega \cdot r$  и достигают максимума при положении лопасти перпендикулярно скорости полета. На противоположной стороне диска

винта скорости меньше  $\omega \cdot r$ , также распределены линейно и достигают минимума при положении лопасти перпендикулярно скорости полета. В этой части диска имеется зона обратного обтекания сечения лопасти (со стороны хвостика), а стало быть, и нагрузок обратного знака. Зона имеет круглую форму, ее диаметр расположен на перпендикулярном к полету диаметре диска винта и примыкает к его центру; диаметр зоны, отнесенный к радиусу винта, равен  $V/(\omega \cdot R)$ .

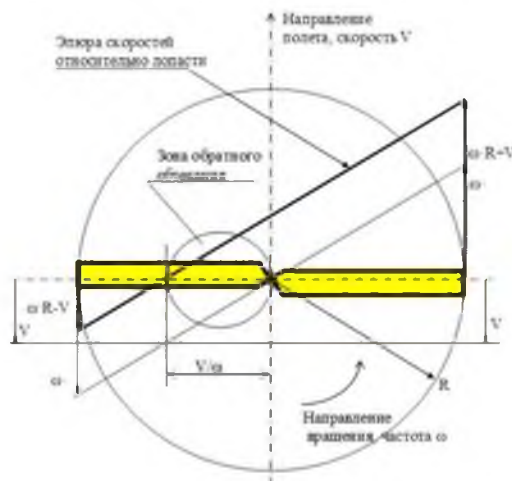


Рис. 2. - Эпюра скоростей обтекания лопасти несущего винта вертолета

Для уравнивания нагрузок на лопасти справа и слева по полету с помощью автомата перекаса изменяются углы установки лопастей раз за оборот по закону синуса – уменьшаются на наступающей лопасти и увеличиваются на отступающей. При наличии нелинейности нагрузки на отступающей лопасти достичь полного уравнивания таким образом не удастся. Неуровновешенные переменные силы проходят на фюзеляж, вызывая вибрацию с частотами, кратными частоте вращения винта и числу лопастей.

Перечисленное с определенной точностью предсказуемо. Поэтому может быть предложен способ снижения нагрузок на вертолет, если дополнить работу автомата перекаса (который исчерпал свой максимум механической компенсации нестационарности обтекания лопастей в полете), более сложным способом управления лопастями путем оснащения каждой лопасти аэродинамической механизацией, распределенной по длине лопасти и программно управляемой.

## 1.2 Описание особенностей махового движения лопасти несущего винта вертолета

Маховым движением называется движение в горизонтальном шарнире, ось которого лежит в плоскости диска винта, и приводит к отклонению лопасти от плоскости диска. При полете вперед азимутальное изменение подъемной силы лопасти вызывает ее периодическое движение с периодом  $\frac{2\pi}{\omega_{\text{оборот}}}$  в плоскости, нормальной к плоскости диска (плоскости взмаха).

Причиной изменения аэродинамических характеристик винта является изменение угла атаки элементов лопасти. С увеличением относительной скорости  $V_0$  угол притекания растет, а угол атаки  $\alpha$  уменьшается, поскольку угол установки постоянен  $\varphi = \text{const}$ . Чем больше скорость полета, тем больший угол установки должен иметь винт для получения положительного значения силы тяги. Сила тяги аналогично изменяется с изменением угла азимута, в зоне опережающей лопасти сила тяги возрастает, в зоне отступающей – уменьшается.



Учет махового движения имеет принципиальное значение в исследовании аэродинамических характеристик несущего винта при полете вперед.

Силы, действующие на произвольный элемент лопасти шарнирного несущего винта (Рис. 3): сила тяги  $\Delta T$ ; центробежная сила  $\Delta C$ ; вес  $\Delta G$ ; инерционная сила  $\Delta J$ , появляющаяся, когда угол взмаха изменяется по времени.

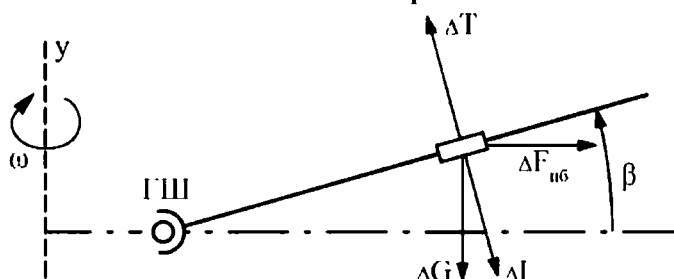


Рис.3 – Силы, действующие на элемент лопасти.

В вертикальном направлении, относительно горизонтального шарнира (ГШ), действуют сила тяги  $\Delta T$ , вес элемента  $\Delta G$  и инерционная сила  $\Delta J$ . Маховое движение лопасти представляет собой, по существу, вынужденные колебания под действием аэродинамических и инерционных нагрузок.

Известно, что на отстающей лопасти, работающей в условиях вычитания скоростей полета и вращения, существует зона обратного обтекания, где лопасть обдувается со стороны задней кромки. С увеличением скоростей полета размеры этой зоны растут. В данной работе влияние этой зоны не учитывается, так как при изменении значения коэффициента режима работы  $\mu \geq 0.5$  несущего винта, определяемого как соотношение проекции вектора  $V$  истинной воздушной скорости на плоскость вращения втулки несущего винта к окружной скорости конца лопасти, этим можно пренебречь.

$$\mu = \frac{V \cos A}{\omega_{\text{нв}} r_{\text{л}}} \approx \frac{V}{\omega_{\text{нв}} r_{\text{л}}}$$

где  $A$  – угол атаки несущего винта,  $\omega_{\text{нв}}$  – угловая скорость вращения несущего винта,  $r_{\text{л}}$  – радиус лопасти

Угловые положения  $\beta$  (маховое движение) каждой лопасти в определенных азимутальных положениях  $\psi$  относительно плоскости вращения винта одинаковы. Маховое движение лопастей является циклическим с периодом, равным времени одного полного оборота винта, и описывается гармоническим рядом Фурье, в основном по первой гармонике:  $\beta = a_0 - a_1 \cos \psi - b_1 \sin \psi$

С ростом скоростей горизонтального полета вертолета происходит увеличение скорости махового движения, что в свою очередь ведет к росту угла атаки на  $\psi \approx 270^\circ$ , на элементах лопастей происходит срыв потока, что приводит к падению  $C_y$  профиля, росту  $C_x$ , смещению центра давления профиля и неустойчивому обтеканию. При увеличении скорости и высоты полета маховое движение становится более интенсивным, что способствует расширению зоны срыва потока.

Система снижения махового движения лопасти при помощи отклоняемой поверхности, расположенной на ней изначально направлена на небольшое приращение положительной или отрицательной подъемной силы с большой периодичностью.

Как уже упоминалось выше, для достижения основных целей данной работы применяется разработанная автором методическая основа исследований системы активного управления лопастью вертолета на основе постепенного усложнения параметров эксперимента и модели «от простого к сложному».

В рамках такого подхода, на первых этапах исследований, работа проводилась на неподвижно установленных в рабочей части АДТ соответствующих несущих поверхностях (лопасть или ее аналог – крыло) с активными органами управления на задней кромке. В первую очередь отработывалось функционирование самой системы активного управления, в начале – без потока, и в режиме работы в разомкнутом контуре, без включения обратных связей. Дальше – отработка системы и определение ее аэродинамических характеристик в потоке АДТ, когда набегающий на неподвижную лопасть поток в первом приближении моделирует встречный поток на вращающуюся лопасть на натурном вертолете.

Далее в эти исследования добавлялось включение обратных связей, которые и определяют работу системы управления как активную, а внешние периодические воздействия потока на вращающуюся натурную лопасть в первом приближении моделировались в АДТ с помощью решетки отклоняемых профилей, создающих в набегающем потоке гармонически меняющиеся скосы.

Наконец, на заключительных этапах, после успешной отработки на неподвижной лопасти, исследования были продолжены на крупномасштабном демонстраторе вращающегося несущего винта вертолета с лопастями, оснащенными активными органами управления – триммерами. Вначале была проведена отработка без потока, на гоночной площадке, затем – уже в набегающем потоке в АДТ.

В главе 2 описан самый начальный этап исследования системы активного управления маховым движением лопасти. В качестве рабочей поверхности рассмотрено использование колеблющегося закрылка на взвешенном на аэродинамических шестикомпонентных весах отсеке лопасти.

Для проведения аэродинамических исследований на установке МВП-5 перспективного профиля была создана модель лопасти размахом 1500 мм и хордой 600 мм, по середине имеющая взвешенный на шести-компонентных тензовесах отсек с размахом 298 мм (Рис. 4). Из данных исследований этой модели имеются результаты круговых продувок из АДТ Т-105 для различных углов атаки и в рабочем диапазоне скоростей потока, разрешенных для этой АДТ. При исследовании этой же модели на установке МВК-5 в АДТ Т-105 в тех же условиях мы получим готовую базу данных продувок для сравнения влияния активного закрылка на модель.

Для этого разместим активный закрылок с хордой  $b_{закр}=150$  мм и размахом  $l_{закр}=298$  мм в задней части имеющегося взвешенного отсека, изображенном на (Рис. 5 и Рис.6) на существующей модели лопасти.

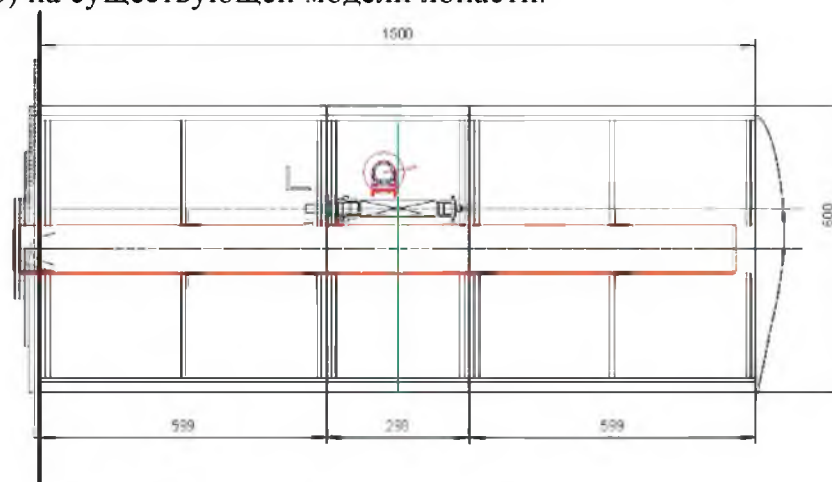


Рис.4 – Модель лопасти с взвешенным отсеком.

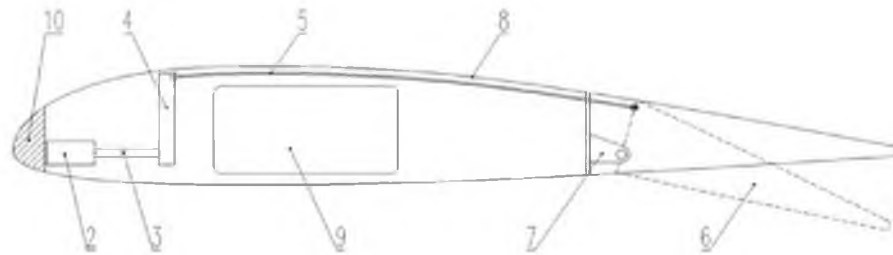


Рис.5 – Расположение закрылка в задней части взвешенного отсека лопасти

В средней части лопасти проходит лонжерон 9, который делит внутреннее пространство лопасти на два отсека передний и задний. В задней части лопасти установлен закрылок 6, который с помощью навесных поворотных кронштейнов 7 крепится к лонжерону 9. В передней части лопасти напротив закрылка 6 на внутренней части носка 10 установлен пьезоэлектрический привод 2. Система передачи движения, включающая рычаг и тяги расположена в передней части лопасти. С помощью тяги 3 пьезопривод 2 соединен с рычагом 4 посредством шарнира. Рычаг 4 установлен вдоль оси лопасти 1 на подшипниковом узле в плоскости работы пьезоэлектрического привода 2. На большом плече рычага 4 установлена тяга 5 закрылка 6 при помощи шарнира. Другая сторона тяги 5 через шарнирный узел крепится к закрылку 6. Рычаг 4 по своей длине имеет изгиб, с углом  $\alpha$  составляющим  $22^\circ$ - $25^\circ$ , для того чтобы тягу 5 закрылка прижать к обшивке 8 лопасти 1, т.к. она к закрылку 6 от рычага 4 проходит между лонжероном 9 и обшивкой 8. Тяги 3 и 5 расположены перпендикулярно продольной оси лопасти.



Рис. 6. - Общий вид расположения установки МВП-5 с моделью лопасти в АДТ Т-105. Вид снизу лопасти.

### 2.1 Результаты испытаний.

На следующих (Рис. 7 –и Рис. 8) представлен анализ динамической части аэродинамических характеристик отсека с закрылком. Для анализа необходимо сравнить амплитуды сигналов подъемной силы, снимаемых с весов, на определенной частоте привода закрылка (задано 3 Гц) при различных скоростях потока на некотором угле атаки крыла (задано  $15^\circ$ ) - с амплитудой того же сигнала на частоте привода, но без потока (вычесть инерционную составляющую). Оставшаяся часть амплитуды сигнала после вычета инерционной составляющей будет величиной прироста аэродинамической подъемной силы  $Y$ .

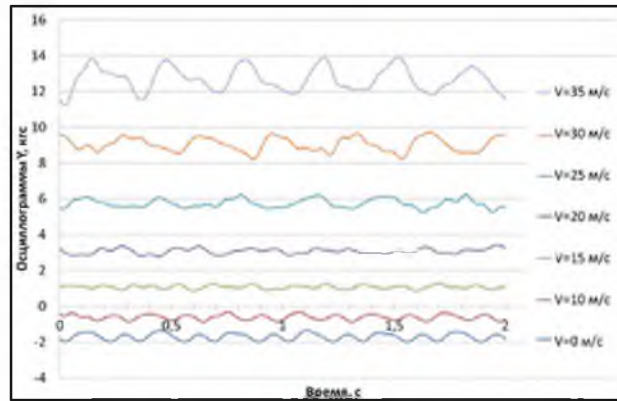


Рис. 7. - Сравнение сигналов без потока и с потоком до 35 м/с.

На (Рис. 8) показана прибавка 7% коэффициента подъемной силы  $C_y$  от динамической составляющей сигнала к графику статической составляющей сигнала  $C_y$  на угле атаки крыла  $15^\circ$  и скорости потока 35 м/с, частота привода закрылка 3 Гц.



Рис. 8. - Статическая составляющая сигнала коэффициента подъемной силы  $C_y$  и динамическая составляющая сигнала в положительной и отрицательной полуплоскостях, частота привода закрылка 3 Гц, скорость потока  $V=35$  м/с.

Указанный подход показал принципиальную возможность создания переменной аэродинамической силы на лопасти с помощью поверхности управления, отклоняемой электро-пьезоприводом. В то же время конкретная конструкция, выполненная на первом этапе исследований на основе имеющейся лопасти с целью сокращения времени разработки и сохранения преимущества, не свободна от недостатков.

Недостатком является выполнение закрылка, как части профиля лопасти в пределах  $1/3$  хорды. Следствием этого является большая толщина передней части закрылка, что в свою очередь приводит к большому весу конструкции, соответственно, к большому моменту инерции закрылка и повышенной мощности пьезопривода и снижению быстродействия всей системы. Также данная конструкция ограничивает длину закрылка, из-за большого веса конструкции и особенности расположения закрылка в профиле лопасти (лопасть по длине изгибается при вращении винта). Немаловажное значение имеет факт расположения закрылка внутри профиля лопасти (наличие щелей между закрылком и неподвижными частями лопасти). В результате, как неподвижный закрылок, так и работающий, ухудшает аэродинамические характеристики профиля по сравнению с профилем без закрылка. Лопасть вертолёта имеет небольшую хорду, поэтому плечо



аэродинамического момента закрылка относительно фокуса лопасти небольшое. Соответственно необходимо рассмотреть варианты конструкции лопасти, позволяющие увеличить плечо аэродинамического момента управляющей поверхности для возможности создания управляющего воздействия на момент кручения законцовки лопасти.

В главе 3 предложена новая конструкция управляющей поверхности в виде триммерной пластины (триммера). Представлен анализ сравнительного экспериментального исследования различного расположения управляющей поверхности на отсеке лопасти, и как закрылка, и в виде триммера вне профиля лопасти. Показано, что управляющая поверхность в виде триммера значительно эффективнее воздействует на отсек лопасти. Также проведено расчетное исследование по выбору места расположения триммера в зависимости от радиуса лопасти.

Анализ недостаточной эффективности прототипа системы с закрылком и результаты экспериментальных измерений выявили, что другой вариант, а именно, модель лопасти с триммером вне профиля лопасти дает значительный прирост значения производной коэффициента подъемной силы крыла по углу атаки  $C_Y^\alpha$  по сравнению с моделью, где закрылок занимает приблизительно 1/3 хорды профиля лопасти (Рис. 9).



Рис. 9. - Профиль лопасти винта с триммером вне профиля и с закрылком

Техническим результатом является увеличение быстродействия, точности и четкости работы системы и расширения возможностей автоматического управления аэроупругими явлениями на лопасти. Техническим результатом также является улучшение аэродинамических характеристик системы «профиль лопасти – закрылок».

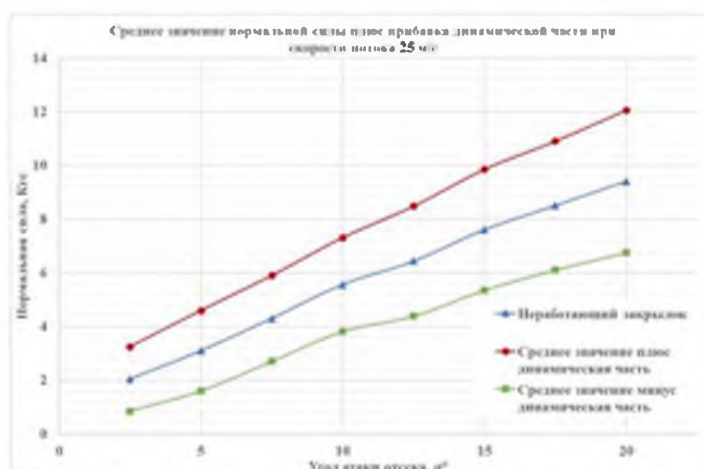


Рис. 10. - Средняя часть нормальной силы плюс-минус динамическая часть нормальной силы отсека с триммерной пластиной, колеблющейся на частоте 5Гц при скорости потока 25 м/с.

При вычете сигналов видно см. (Рис. 10), что прирост нормальной силы составляет  $\Delta Y=2,4$  кгс. Учитывая статическую составляющую  $Y_{ст} = 9,6$  кгс получаем, что нормальная сила увеличилась на 25%. При сравнительных испытаниях прирост подъемной силы от работы закрылка на отсеке лопасти составил 7% (Рис. 8), а от работы триммера составил 25% (Рис. 10).

На основе исследований различных вариантов активных систем разработан прототип демонстратора системы активного управления маховым движением лопасти несущей поверхности ЛА посредством управляемого триммера. Демонстратор представляет собой крупномасштабную модель лопасти несущего винта вертолета, на которую установлены две секции триммеров с индивидуальным приводом от пьезопривода (Рис. 11). Секции триммера устанавливаются в регулярной части лопасти на участке между относительными радиусами  $r/R=0,6$  и  $r/R=0,8$ . Длина модели  $L=2750$  мм, хорда модели  $b=270$  мм. Триммер имеет размах 11% длины и хорду 19% хорды модели.

Решение задачи и технический результат достигаются тем, что в лопасти несущего винта вертолёта закрылок выполнен в виде установленного триммера, расположенной вне аэродинамического профиля в задней части лопасти. Ширина триммера составляет не более 10% хорды лопасти. Триммер установлен с возможностью отклонения в обе стороны от профиля лопасти. Триммер соединен с профилем посредством узла навески, при этом он имеет утолщение в передней части и занимает часть задней кромки профиля лопасти на глубину от 3% до 7.5% хорды лопасти (выдержка из описания объекта исследования оформленного изобретения).

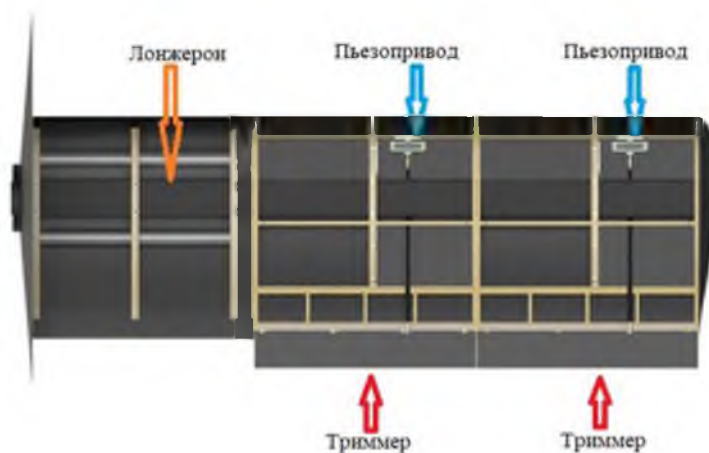


Рис. 11. - Действующий макет активной системы индивидуального управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета посредством управляемого триммера

В главе 4 проведено исследование в гармоническом потоке аэродинамической трубы невращающейся модели лопасти с двумя отсеками, оснащенными управляемыми при помощи пьезоприводов триммерами.

Для этого разработан действующий макет системы активного управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета для исследования эффективности его применения в гармонически возмущенном потоке аэродинамической трубы. Действующий макет представляет собой отсечно-балочную модель лопасти несущего винта вертолета, на которой установлены две

секции триммеров с индивидуальными пьезоприводами (Рис. 11). Размах модели составляет 1.854 м, хорда лопасти 0.6 м. Триммер имеет размах 32% относительно размаха модели и хорду 16.6% от хорды лопасти. Триммеры закреплены с возможностью отклонения в обе стороны от профиля лопасти, и расположены вне аэродинамического профиля лопасти за задней кромкой. Для их крепления к лопасти используются узлы навески, при этом для обеспечения плавного перехода между профилем и триммерами последние занимают часть задней кромки профиля на глубину порядка 3% хорды.

#### 4.1 Экспериментальная установка

На данном этапе исследования вращение лопасти в аэродинамической трубе заменялось переменным набегающим потоком с изменяемым углом притекания по гармоническому закону. Для создания возмущений в потоке использовано специальное устройство моделирования порывов.

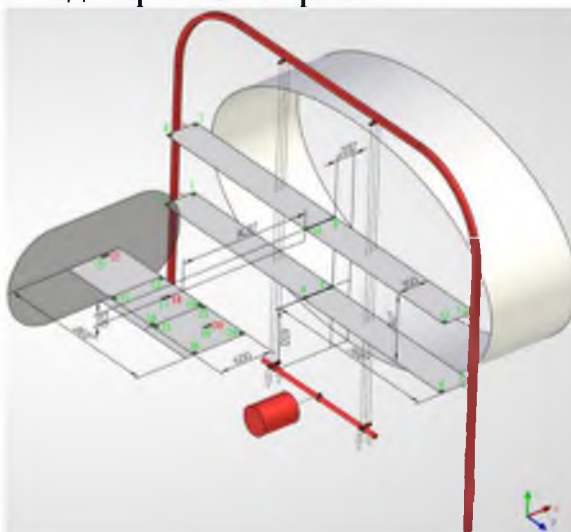


Рис. 12. - Схема устройства для моделирования порывов в АДТ

Устройство генерации порывов представляет собой систему аэродинамических поверхностей, закрепленных на жесткой раме поперек рабочей части трубы (Рис. 12). Изменяя отклонение поверхностей по времени, можно формировать порывы различных типов и форм. В данном исследовании моделировались порывы гармонической формы с обратной частотой среднего транспортного вертолета. Такое воздействие гармонически изменяет мгновенный угол атаки лопасти с определенной частотой, имитируя маховое движение лопасти при поступательном движении вертолета.

#### 4.2 Методика проведения эксперимента

Рассмотрим движение концевой элемента лопасти несущего винта вертолета, находящегося на радиусе  $R$ . При полете вертолета вперед в каждый момент времени лопасть работает в поле разных относительных скоростей воздушного потока. Изменяется мгновенный местный угол атаки сечения лопасти в зависимости от ее угла азимутального положения  $\psi$ , он определяется сложением  $(V+\Omega R)$  или вычитанием  $(V-\Omega R)$  поступательной скорости полета  $V$  и угловой скорости  $(\Omega R)$  вращения несущего винта и скорости вертикального перемещения конца лопасти  $V_y$ . Если зависимость угла атаки лопасти несущего винта от ее азимутального положения за один оборот развернуть на плоскость, то получится гармоническая кривая (Рис. 13).



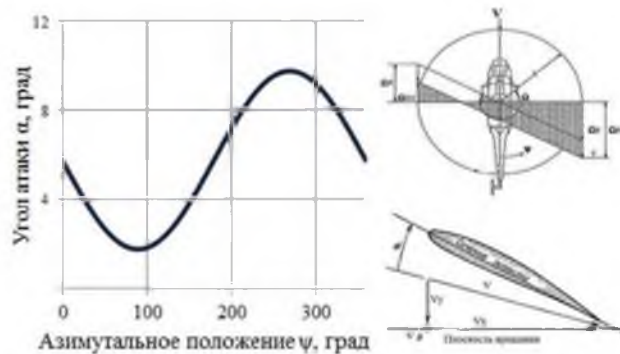


Рис. 13. - Зависимость угла атаки лопасти от ее азимутального положения за один оборот винта во время горизонтального полета

Экспериментальные исследования системы активного управления колебаниями лопасти в потоке АДТ Т-103 состояли из двух этапов.

На первом этапе были определены амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) генератора порывов и модели лопасти, которые необходимы для уточнения параметров системы управления (Рис. 14).

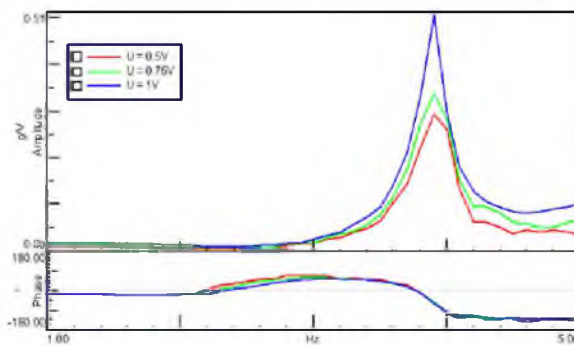


Рис. 14. - АФЧХ от сигнала, подаваемого на генератор порывов до сигнала акселерометра, установленного на конце лопасти, скорость потока 20 м/с

Система управления реализована на оборудовании National Instruments с дискретизацией и фильтрацией сигналов датчиков управления (интегрирование перегрузки) и автономной проверкой вычислителя системы управления (АФЧХ вычислителя).

#### 4.3 Результаты испытаний

С помощью разработанной методики эксперимента, исследованы характеристики невращающегося демонстратора, а также эффективность снижения гармонических колебаний лопасти с помощью управляемых триммеров. В процессе испытаний варьировались скорость потока, угол атаки лопасти, частота и амплитуда колебаний триммеров. Также варьировались частота и амплитуда колебаний аэродинамических поверхностей двухлопастного генератора порывов (решетки подвижных профилей), установленного непосредственно за соплом, задающего частоту и амплитуду махового движения модели лопасти в потоке.

Для измерения перемещений поверхности модели лопасти и триммеров использовалась стереовидеограмметрическая система (ВГМ), которая с частотой  $f=60$  Гц по наклеенным светоотражающим маркерам регистрировала пространственное состояние лопасти и триммеров в потоке. Также



регистрировались по времени показания контрольного акселерометра с включенной и выключенной системой управления маховым движением на различных режимах.

Пример временной зависимости амплитуды вертикальных перемещений законцовки модели лопасти, полученных ВГМ - системой при угле атаки лопасти  $\alpha=10^\circ$  и скорости потока  $V=20$  м/с, приведен на (Рис. 15). На осциллограмме в левой части приведена зависимость амплитуды колебаний законцовки модели лопасти в потоке со скоростью  $V=20$  м/с с неработающим генератором порыва. В центре показаны колебания законцовки лопасти, происходящие при работающем генераторе порыва на частоте  $\nu=3.5$  Гц с той же скоростью потока, а в правой части осциллограммы демонстрируется результат действия активной системы управления маховым движением лопасти.

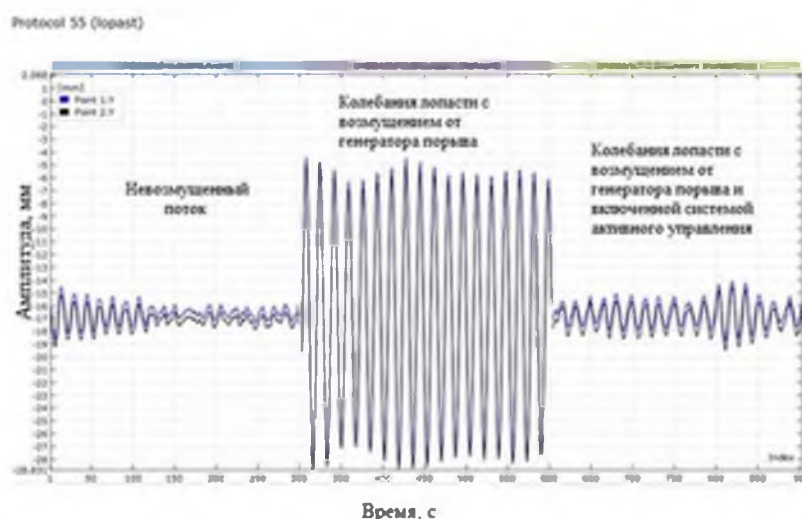


Рис. 15. - Амплитуда колебаний модели лопасти и триммерной пластины с включенным и выключенным генератором порыва и недействующей и действующей системой активного управления (скорость потока  $V=20$  м/с, частота возбуждения  $\nu=3.5$  Гц, угол атаки лопасти  $\alpha=10^\circ$ ).

Можно сделать вывод, что в зависимости от частоты привода и скорости потока эффективность управления маховым движением модели лопасти возрастает в 5 раз при включенной системе управления маховым движением лопасти. При этом сам размах колебаний конца лопасти варьировался от 40 мм при выключенной системе управления до 8 мм при включенной системе управления маховым движением лопасти. Увеличение угла атаки лопасти приводит к росту эффективности воздействия триммеров на маховое движение лопасти без изменения параметров амплитуды отклонения управляющих поверхностей.

В главе 5 представлены результаты по моделированию алгоритмов управления.

Одним из возможных способов демпфирования вибраций лопасти несущего винта является использование регулятора с обратными связями по сигналам акселерометров, установленных внутри отсека (Рис. 16).

Если выходная переменная  $u$  регулятора  $R$  описывается выражением

$$U(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

где  $t$  - время  $K$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  - пропорциональный коэффициент, постоянная интегрирования и постоянная дифференцирования, то такой регулятор называют пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором (Рис. 17).



Рис. 16 - Концепция активного демпфирования колебаний лопасти с использованием обратных связей

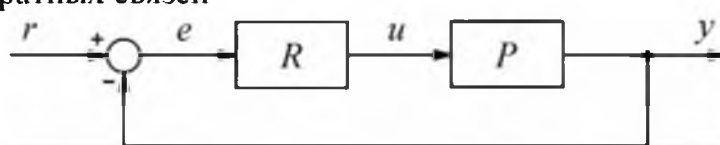


Рис.17. - Система автоматического регулирования с обратной связью

#### Состав системы управления

Система управления триммерами лопастей НВ состоит из чувствительного элемента, вычислительного блока со встроенными АЦП/ЦАП, усилителей пьезоприводов и самих пьезоприводов, пристыкованных к триммерам с использованием тяг и качалок.

#### Датчик системы управления

Чувствительным элементом системы управления триммерами лопастей несущего винта является магнитный датчик отметчика азимута. Он установлен снаружи вала НВ, со стороны хвостовой балки. На валу установлена металлическая ответная часть датчика. Магнитный датчик выдает импульс по напряжению при прохождении рядом с ним ответной части.

#### Алгоритм управления

Для снижения колебаний лопастей НВ по твердотельному тону (маховые движения) система управления осуществляет отклонение триммеров таким образом, чтобы при вращении лопастей винта их подъемная сила была постоянной. При движении лопасти навстречу набегающему потоку воздуха триммер отклоняется вверх для компенсации дополнительной подъемной силы, вызванной увеличением скоростного напора, а при движении по потоку – вниз для увеличения подъемной силы лопасти. Таким образом, управляющий сигнал на каждую из лопастей должен зависеть от текущего азимута лопасти, от скоростного напора и частоты вращения НВ.

$$\delta_{\text{зад}}(t) = A(\omega, q)\sin(\Psi)$$

Аналоговый сигнал датчика азимутального положения поступает на АЦП вычислительного блока. При срабатывании порогового триггера происходит обнуление текущего угла поворота первой лопасти и запускается таймер. При следующем срабатывании триггера таймер перезапускается, а измеренная длина периода используется для вычисления угловой частоты вращения НВ. Из предположения, что за один оборот винта частота вращения меняется

незначительно, угловое положение первой лопасти рассчитывается следующим образом:

$$\psi_1(t) = 360 \frac{t}{T},$$

где  $t$  – текущее значение таймера,  $T$  – период, измеренный на предыдущем обороте винта.

Вторая лопасть расположена через 120 градусов, третья – через 180, четвертая – через 300 градусов.

В главе 6 представлены результаты исследования эффективности работы демонстратора системы управления маховым движением лопасти в АДТ на различных режимах испытаний

### 6.1 Геометрические характеристики лопасти демонстратора

Лопать имеет прямоугольную форму в плане в регулярной части, комлевую часть с прямой передней кромкой и переменную хордой и стреловидную законцовку (Рис. 18). Лопать оборудована двумя триммерами, установленными по задней кромке в районе относительного радиуса  $r/R=0,7$ .



Рис. 18. – Общий вид лопасти с триммерами

Основные геометрические характеристики лопасти:

- диаметр винта – 6 м;
- длина пера лопасти (от торца) – 2,640 мм;
- хорда регулярной части лопасти – 270 мм;
- относительная высота профиля в регулярной части – 15 %;
- угол стреловидности законцовки по передней кромке – 33 град.

На модели лопасти устанавливаются две секции триммера с индивидуальным приводом от пьезоактуатора. Секции триммера устанавливаются в регулярной части лопасти на участке между относительными радиусами  $r/R=0,6$  и  $r/R=0,8$  (Рис. 18).

### 6.2 Исследование эффективности системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета в АДТ-104

Для снижения махового движения используется триммер, который управляет несущей способностью лопасти по азимутальному положению. Для наступающей лопасти триммер отклоняется вверх, значительно уменьшая коэффициент подъемной силы лопасти  $C_{ua}$ . Суммарная подъемная сила, приложенная к лопасти, снижается на некоторую величину  $\Delta T$ . Благодаря этому лопасть взмахивает меньше. На обратном ходе, чтобы лопасть не провалилась значительно, необходимо увеличить её несущую способность. Для этого триммер отклоняется вниз, создавая дополнительное положительное приращение подъемной силы  $\Delta T$  (Рис. 19).



Благодаря работе триммера амплитуда тяги за один оборот снижается, вызывая меньшее маховое движение лопасти. Тяга по азимуту приближается к среднему значению.

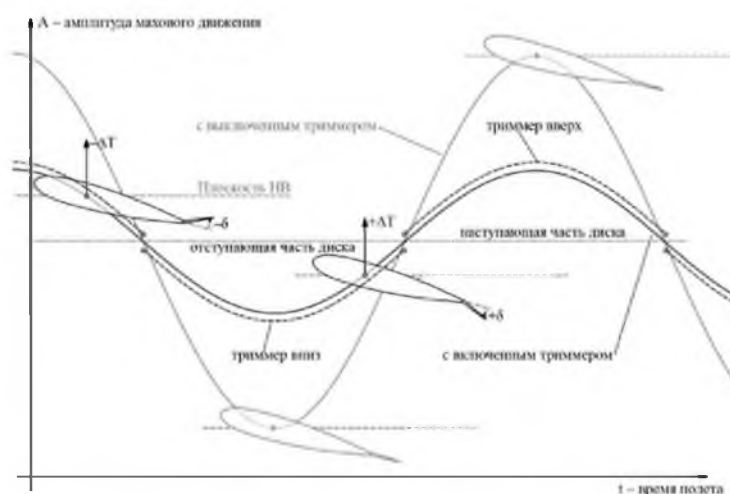


Рис. 19. – Триммер отклоняется на тах угол вверх при движении лопасти навстречу потоку ( $\psi=0-180^\circ$ ) и на тах угол вниз на  $\psi=180^\circ-360^\circ$  при движении по потоку

На (Рис. 20) показан сигнал датчика махового движения. Работе системы активного управления соответствует участок снижения амплитуды колебаний. При выключении системы лопасть снова увеличивает амплитуду махового движения. В момент включения системы управления триммерами происходит увеличение амплитуды кручения лопасти при одновременном снижении амплитуды махового движения.

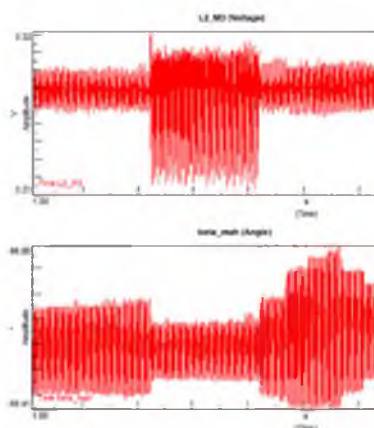


Рис.20 – Изменение амплитуды момента кручения лопасти и амплитуды махового движения лопасти в момент работы системы активного управления

### 6.3 Эффективность управления лопастью с учетом эффекта реверса управления при работе активных триммеров

В данной работе исследовались режимы висения и режимы малых полетных скоростей до 70 км/ч, где наблюдаются повышенные нагрузки в системе управления лопастями НВ. В этом случае используется прямое управление триммером подъемной силой лопасти, где суммарное приращение подъемной силы на отсеке образуется изменением характеристик профиля за счет отклонения триммера с учетом изменением угла атаки самой лопасти от эффекта закручивания (Рис. 21).

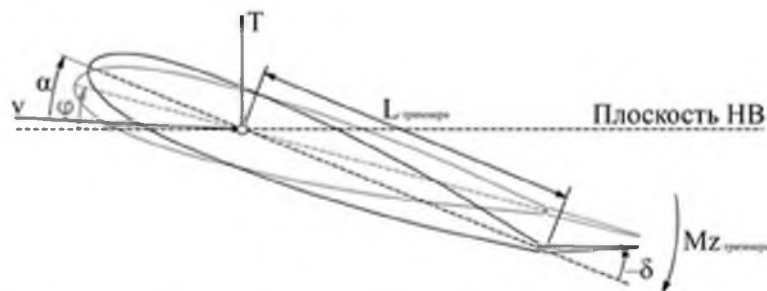


Рис. 21. – Схема действия сил и моментов на отсек лопасти при прямом управлении

С дальнейшим ростом скорости нагрузки в системе управления лопастью НВ невелики, и работа триммеров может использоваться автопилотом как автомат перекоса. Но при выходе на максимальные скорости полета 270 – 350 км/ч наблюдается резкий рост нагрузок в системе управления. Лопасть начинает закручиваться не только за счёт ненулевого аэродинамического момента профиля, но и из-за несовпадения центра давления с осью жёсткости, за счет комбинации свойств лопасти, как длинной нежесткой балки в условиях центробежных сил и наличия махового движения.

С учетом этих свойств, а также, например, наличия люфтов в системе управления появляется область с нулевой жесткостью в точке балансировки профиля и управление триммером работает в режиме реверса и сохраняет необходимую эффективность.

#### 6.4 Анализ результатов работы триммеров в режиме автомата перекоса

В процессе испытаний демонстратора в АДТ Т-104 был исследован режим висения несущего винта с постоянным углом общего шага  $\varphi=14^\circ$  и в диапазоне оборотов НВ от 160 об/м до 400 об/м с шагом 20 оборотов (Рис. 22). На каждом шаге оборотов брался отсчет с выключенными триммерами и с включенными.

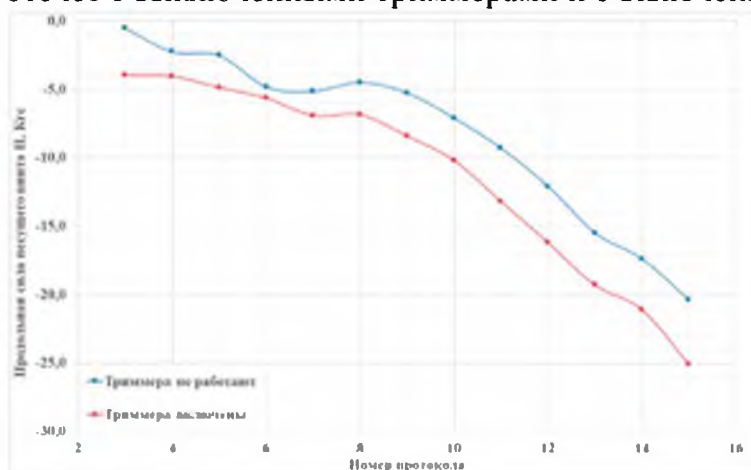


Рис.22. - Зависимость продольной силы несущего винта от изменения числа оборотов при включённых и выключенных триммерах

На графике (Рис. 22) представлена зависимость продольной силы несущего винта от изменения числа оборотов при включённых и выключенных триммерах на тех же режимах. Из проведенного анализа изменения продольной силы определено, что его достаточно, чтобы вертолет класса Ансат изменил угол тангажа с нулевого на минус тридцать градусов (опустил переднюю часть фюзеляжа).

## 6.5 Анализ ожидаемого влияния системы управления маховым движением лопасти НВ на долговечность вертолетной конструкции

Основным положительным эффектом от работы системы управления маховым движением лопасти НВ является снижение величины амплитуды переменной части шарнирного момента на наиболее нагруженных режимах полета. Поскольку переменные шарнирные моменты на лопастях НВ воспринимаются системой управления и особенно ее забустерной частью, то наибольшего эффекта от снижения амплитуды этих моментов следует ожидать именно в данной забустерной части управления.

По результатам расчета определены осевые силы в штоках бустеров и представлены на (Рис. 23). Для наглядности график нагрузки дан отдельно для переднего бустера с учетом влияния управляющего триммера и без учета данного влияния. По расчету наиболее нагруженным оказался передний бустер.

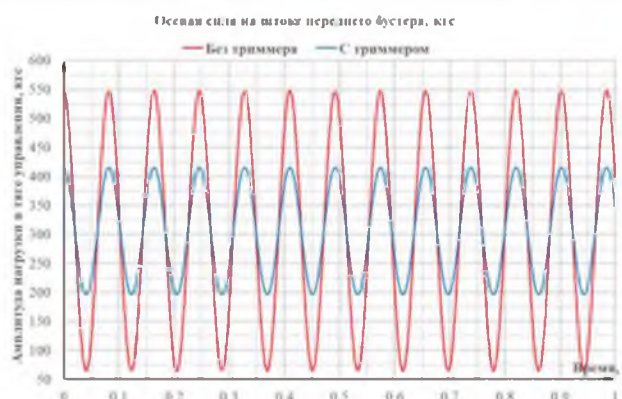


Рис. 23 – осевая сила на штоке переднего бустера

Как видно из формулы расчета ресурса, при изменении эквивалентной нагрузки  $P_{\text{экв.полет}}$  на величину коэффициента  $k_1$ , и например, при  $m = 6$  расчетная величина ресурса увеличится в:

$$\frac{R_{\text{трим}}}{R} = \frac{\frac{N_{\text{прл}}}{3600 \cdot f \cdot \eta_{\Sigma}} \left( \frac{P_{\text{вл}}}{P_{\text{экв.полет}} \cdot \left(\frac{1}{k_1}\right) \cdot \eta_{\sigma}} \right)^6}{\frac{N_{\text{прл}}}{3600 \cdot f \cdot \eta_{\Sigma}} \left( \frac{P_{\text{вл}}}{P_{\text{экв.полет}} \cdot \eta_{\sigma}} \right)^6} = (k_1)^6 = 2,2^6 = 114 \text{ раз.}$$

На практике увеличение ресурсных показателей с приемлемых значений в 2000...6000 часов в 100 раз приводит к выводам о том, что ограничения по условиям усталости могут не предъявляться к данным агрегатам. Таким образом, может быть обоснована возможность эксплуатировать данные агрегаты по техническому состоянию.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе экспериментально определена структура и принцип действия системы активного управления лопастями НВ, разработан демонстратор активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета и экспериментально доказана его эффективность. Основные результаты работы состоят в следующем:

- Предложена и разработана концепция управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета с помощью расположенных на ней триммеров, приводимых в движение пьезоприводами (аэродинамический автомат перекоса), что подтверждено двумя патентами.

- В ходе исследования невращающейся модели лопасти несущего винта вертолета в АДТ использование генератора порывов с гармоническим законом управления позволило в первом приближении смоделировать параметры колебаний лопастей НВ при полете вертолета. Воздействие со стороны профилей генератора порывов гармонически изменяет мгновенный угол скоса (притекания) потока в районе неподвижной лопасти, с определенной частотой, имитируя маховое движение лопасти НВ при поступательном полете вертолета.

- Исследован крупномасштабный вращающийся демонстратор активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета на основе индивидуального управления лопастями с помощью триммеров с пьезоэлектрическими приводами.

- Экспериментально уточнены (на основе поиска максимальной эффективности управления) законы и алгоритмы системы управления.

- В ходе оценки эффективности активной системы управления маховым движением лопасти на различных режимах работы несущего винта в АДТ, полученный результат от применения закона на основе ступенчатого изменения угла отклонения триммера (меандра) показал максимальный эффект.

- В ходе проведения поисковых исследований опережения системы управления триммерами по минимуму махового движения лопасти во время испытаний демонстратора активной системы управления в АДТ определена оптимальная фаза управления (передний фронт меандра), которая на исследованных режимах работы несущего винта и скоростях потока составляла  $330^\circ - 350^\circ$  азимутального положения лопасти.

- Проведены параметрические исследования влияния динамического отклонения триммеров на снижения махового движения лопасти несущего винта на различных углах атаки лопастей и скоростях потока и была продемонстрирована высокая эффективность управления маховым движением лопасти несущего винта, обеспечивающая изменение амплитуды махового движения в 3 - 5 раз.

- Проведен анализ ожидаемого влияния системы управления маховым движением лопасти НВ на долговечность вертолетной конструкции на примере автомата перекоса, при степени кривой усталости  $m = 6$ , увеличение показателей долговечности составит до 100 раз.

Основные результаты исследований внедрены в ОКБ АО «Казанский вертолетный завод» в части проработок перспективных схем несущих винтов гражданских вертолетов в качестве возможного варианта пути снижения уровня вибраций в эксплуатации.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ**

1. Евдокимов Ю.Ю., Еремин М.М., Трифонов И.В., Усов А.В. Определение аэродинамической нагрузки для разработки крупномасштабной модели лопастей несущих вертолетных винтов // *Авиационная промышленность*. № 1-4, 2020.
2. Ерёмин М.М., Лисейкин Г.В., Неделько Д.В. Исследование в АДТ действующего макета невращающейся лопасти несущего винта вертолета, оснащенной активной системой индивидуального управления на основе триммеров с пьезоэлектрическими приводами // *Учёные записки ЦАГИ*. – 2023. – Т. LIV. – №6. – С. 53 – 62.
3. Ерёмин М.М., Борисов Е.А., Патент № RU 2603707, МПК В64С 27/615, «Лопасть несущего винта с управляемой задней кромкой» 2016.
4. Ерёмин М.М., Борисов Е.А., Патент № RU 2662591, МПК В64С 27/615, «Лопасть несущего винта вертолета», 2018.

### **Публикации в других изданиях**

5. Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Еремин В.Ю., Ерёмин М.М., Качарава И.Н., Кудряшов А.Б., Трифонов И.В., Усов А.В. Получение диаграммы резонансных оборотов аэродинамической модели лопасти несущего винта вертолета и ее экспериментальное и расчетное обоснование // *Научно-техническая конференция ЦАГИ «Прочность конструкций ЛА»*. – 2012.
6. Ерёмин М.М., Ланцов А.Ю., Мананников А.Л. Экспериментальное исследование виброн нагружения модели несущего винта перспективного скоростного вертолета и корпуса вертолетного прибора ВП-6 // *Научно-техническая конференция ЦАГИ «Прочность конструкций ЛА»*. – 2012.
7. Ерёмин М.М., Пронин М.А., Лисейкин Г.В., Кузнецов А.Г., Аполонская И.О. Отработка методики экспериментальных исследований по демпфированию вибраций лопасти несущего винта вертолета в АДТ // *Материалы Девятнадцатой международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», ЦАГИ*. – 2019.
8. Редькин А.В., Анимица В.А., Ерёмин М.М. Разработка рационального облика преобразуемого ЛА с гибридной силовой установкой и многовинтовой несущей системой на 9 пассажиров // *Материалы Девятнадцатой международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», ЦАГИ*. – 2019.
9. Ерёмин М.М., Климова А.А., Лисейкин Г.В. Исследование в АДТ демонстратора активной системы управления маховым движением лопасти несущего винта вертолета на основе индивидуального управления лопастями с помощью триммеров с пьезоэлектрическим приводом // *Материалы Двадцать третьей международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики», ЦАГИ*. – 2023.