



ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛОНЖЕРОНА КРУПНОРАЗМЕРНОЙ ЛОПАСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

В.Д. Вермель, Ю.Ю. Евдокимов, И.Н. Качарава, П.М. Николаев, И.В. Трифонов, Л.Л. Чернышев (ФГУП «ЦАГИ» им. проф. Н.Е. Жуковского)

Рассмотрена оптимизация конструктивных параметров лонжерона в типовой конструкции крупноразмерной аэродинамической модели лопасти несущего винта вертолета из условия минимальной массы. Внешняя поверхность лопасти задается цифровой моделью, а действующие нагрузки (перерезывающая сила, изгибающие и крутящий моменты) определяются числом лопастей и предельным значением тяги винта, достигаемыми при испытаниях на определенных винтовых приборах. Разработанный способ оптимизации и его программная реализация существенно сокращают временные затраты на конструирование крупноразмерных моделей лопастей несущих вертолетных винтов.

Ключевые слова: крупноразмерная аэродинамическая модель лопасти несущего винта вертолета, типовая конструкция модели лопасти, лонжероны, оптимизация конструктивных параметров

Важнейшим этапом в создании перспективных вертолетов различного назначения является разработка аэродинамических компоновок лопастей несущих винтов с повышенными аэродинамическими характеристиками, обеспечивающими эффективную эксплуатацию на всех режимах полета. Его выполнение связано с необходимостью проведения значительного объема экспериментальных исследований по отработке аэродинамической компоновки лопастей во ФГУП «ЦАГИ» [1]. Эксплуатируемое в современных условиях оборудование, аэродинамические трубы и винтовые приборы, обеспечивают [2] экспериментальные исследования на моделях несущих винтов с диаметром

от 1,5 до ~ 5,0 м. Пример испытаний крупноразмерной модели несущего винта $D=5,0$ м, показан на рис. 1.

Наряду с другими факторами, ключевым условием обеспечения адекватности моделирования является увеличение размера моделей лопастей, однако для них характерны также увеличение временных затрат на разработку конструкции и изготовление. Поскольку число исследуемых вариантов аэродинамических компоновок лопастей в значительной степени определяет уровень экспериментальной отработки несущих винтов [2], соответственно существенным становится сокращение сроков разработки конструкции крупноразмерных моделей лопастей, а также сроков и трудоемкости их изготовления.

При различиях в аэродинамической профилировке лопастей несущих винтов, определяющих их внешнюю поверхность, число лопастей для конкретного винта и исследуемых в эксперименте режимов полета, устанавливающих действующие аэродинамические нагрузки, имеется определенная общность, обуславливающая условия для разработки типовой конструкции моделей лопастей несущих вертолетных винтов. Ее составляют внешняя поверхность лопасти типа крыло большого удлинения, характер действующих нагрузок для базовых режимов полета вертолетов, близкие геометрические размеры моделей лопастей и винтов.

Важнейшим требованием к моделям лопастей является минимально возможная масса. Его выполнение, наряду с удовлетворением требования весового подобия натурной лопасти [3], расширяет возможности обеспечения целого ряда характеристик лопастей (балансировка в комплекте, вариация положения оси



Рис. 1. Испытания крупномасштабной модели несущего винта вертолета в аэродинамической трубе Т-104 ФГУП «ЦАГИ» на винтовом приборе ВП-6

центров масс сечений, инерционное подобие, отстройка собственных частот за счет присоединяемых к лопасти балансировочных грузов).

Настоящая статья посвящена рассмотрению разработанной типовой конструкции крупноразмерной ($D \approx 5,0$ м) аэродинамической модели лопасти несущего винта вертолета, а также способу оптимизации конструктивных параметров лонжерона по условию минимума массы.

Типовая конструкция крупноразмерной модели лопасти несущего вертолетного винта

Лопастей несущих винтов вертолетов, как правило, представляют собой поверхности с аэродинамической профилировкой большого удлинения $\lambda = 15...20$ и более. Для них наиболее рациональной является однолонжеронная конструкция, которая стала характерной конструктивной силовой схемой натуральных лопастей несущих винтов. Именно она положена в основу типовой конструкции крупноразмерной модели лопасти несущего винта вертолета (рис. 2).

Центральным силовым элементом конструкции является лонжерон, воспринимающий основные действующие на лопасть статические и динамические нагрузки: центробежную и перерезывающую силы, а также изгибающие моменты. Их предельные значения для контрольного сечения ($\bar{r}=0,4$) известны. Они определяются по максимальной подъемной силе создаваемой используемыми винтовыми приборами на модели винта. Восприятие крутящего момента обеспечивается обшивкой, образующей замкнутый контур максимальной площади (рис. 2). Лонжерон формируется из преформ (верхняя и нижняя полки, передняя и задняя стенки), что позволяет использовать наиболее рациональную

укладку армирующего наполнителя для восприятия центробежной силы и изгибающих моментов, обуславливающих совместно только растягивающие напряжения в полках. По результатам специального исследования на конструктивно-подобных образцах определены как наиболее рациональные отечественные полимерные композиционные материалы (ПКМ) с углеродным армирующим наполнителем, изготавливаемым корпорацией UMATEX, и связующим производства АО «ИНУМИТ».

Центр масс сечения лонжерона совмещается с точкой С, лежащей на продолжении оси шарнира узла навески лопасти на втулку винтового прибора для передачи действующих на лопасть нагрузок. Реализуемый объем в носке лопасти (показан на рис. 2) должен обеспечивать размещение грузов для выполнения требований балансировки лопастей в комплекте, положение линии центров масс сечений, а также присоединенных масс для балансировки и отстройки собственных частот лопасти. Заполнение внутренних объемов лопасти пенопластом предотвращает потерю устойчивости продольных элементов конструкции (полки, стенки) лонжерона и обшивки. В пенопласте просто изготавливаются ниши для размещения балансировочных грузов и измерительного оборудования. Вследствие низкой нагруженности обшивки упрощается изготовление люков для доступа к оборудованию и его обслуживание.

Постановка задачи

Оптимизацию параметров выполним для контрольного сечения $\bar{r}=0,4$ задающего начало регулярной части модели лопасти, соответствующей по критериям подобия натурной лопасти.

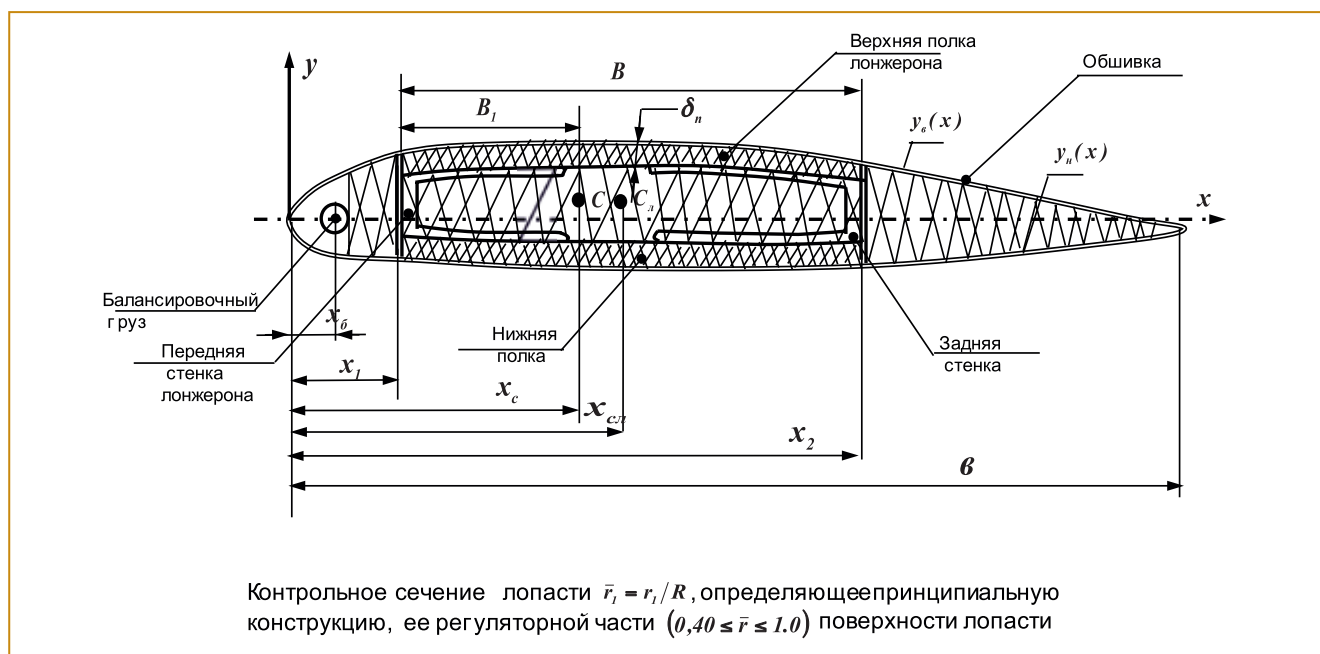


Рис. 2. Сечение $\bar{r} = r/R$ модели лопасти, определяющее принципиальную конструкцию ее регуляторной части $0,4 \leq \bar{r} \leq 1,0$, R – радиус модели винта, r – радиус сечения модели.

Зависимости для верхней и нижней сторон профиля в сечениях $y_g(x)$ и $y_n(x)$ (рис. 2) задаются цифровой моделью внешней поверхности. Силowymi компонентами в конструкции лонжерона, прежде всего, являются полки, примыкающие к обшивкам. Их внешний контур эквидистантен внешней поверхности сечения на толщину δ_0 обшивки. Лонжерон ограничивается по оси OX передней и задней стенками (координаты x_1 и x_2), причем стенки могут вырождаться, при увеличении ширины лонжерона, вплоть до совпадения с контуром профиля в носке и хвостике.

Номинальная толщина стенок при известных ширине лонжерона и его положении в контуре сечения определяется по величине перерезывающей силы и заданному запасу прочности.

Дополнительным условием является необходимость совмещения центра масс лонжерона S_L с точкой S , определяемая условием $x_L = x_c$. Масса обшивки для используемого ПКМ пропорциональна толщине δ , вычисляемой для действующего крутящего момента. Для секции Δr в окрестности сечения r масса лонжерона для данного контура сечения лопасти зависит от его ширины и положения в сечении.

Масса секции модели лопасти в контрольном сечении равна:

$$\Delta m(r) = [F_L(r) \rho_K + f_{вн}(r) \rho_{пн}] \Delta r, \quad (1)$$

где: r – позиция контрольного сечения по радиусу; F_L – площадь силового контура лонжерона, (полки, стенки); $f_{вн}$ – внутренняя площадь, заполняемая пенопластом; ρ_K – плотности ПКМ; $\rho_{пн}$ – и пенопласта соответственно.

Поскольку плотность пенопласта на два порядка $\sim O(2)$ меньше, чем у углепластика, вторым слагаемым в скобках можно пренебречь. Следовательно, задача минимизации массы модели лопасти сводится к минимизации погонной массы лонжерона, которая для данного ПКМ пропорциональна текущей площади сечения лонжерона $F_L(r)$.

Поставим задачу оптимизации следующим образом: найти ширину B лонжерона в контрольном сечении, обеспечивающую минимум площади F_L , отвечающей требованиям прочности при заданных нагрузках, при совпадении центра масс сечения лонжерона x_L с координатой x_c точки оси лопасти, определяемой величиной параметра B_1 .

Критерием оптимизации является минимум функции $F_L = F_L(B, B_1)$, при выполнении условия:

$$x_c - x_L(B, B_1) = 0. \quad (2)$$

Воспользуемся методом множителей Лагранжа. Расширенная функция Лагранжа для решаемой задачи оптимизации:

$L(B, B_1, \lambda) = F_L(B, B_1) + \lambda \varphi(B, B_1)$, где: λ – множитель Лагранжа, $\varphi(B, B_1) = x_c - x_L(B, B_1)$.

Соотношения для нахождения условного экстремума

$$\frac{\partial L}{\partial B} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial B_1} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0.$$

Соответствующая система нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_L}{\partial B}(B, B_1) + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial B}(B, B_1) &= 0, \\ \frac{\partial F_L}{\partial B_1}(B, B_1) + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial B_1}(B, B_1) &= 0, \\ \varphi(B, B_1) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Для определения коэффициентов в уравнениях (3), связывающих конструктивные параметры лопасти с условиями оптимизации примем, что наибольшее действующее напряжение для полок лонжерона определяется суммой напряжений от максимальных изгибающих моментов M_x, M_y и центробежной силы $P_{цб}$.

Площади, моменты инерции, положения центров тяжести и моменты сопротивления изгибу от искомым толщин компонентов конструкции, а также значения ширины полок лонжерона в сечении определяются по цифровой модели лопасти [4]. Уменьшение площади сечения лонжерона по радиусу от контрольного сечения к концу лопасти оценивается по условиям равнопрочности.

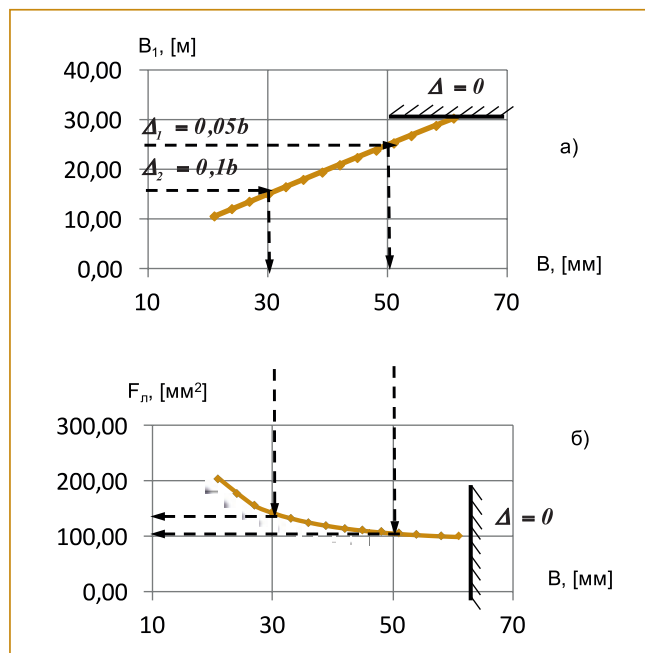


Рис. 3. Траектория решения вариационной задачи минимизации площади F_L контрольного сечения лонжерона, материал углепластик, $\sigma_6 = 80$ кг/мм², запас прочности $b = 140$ мм – хорда сечения, Δ – расстояние от носика сечения до передней стенки лонжерона, B – ширина полки лонжерона, B_1 – расстояние от передней стенки до центра тяжести лонжерона

Решение системы (3) выполняется методом Ньютона. При его проведении ищется оптимальное значение ширины полок и положение лонжерона в контрольном сечении в зависимости от выделяемых для размещения балансировочного груза объемов в носке лопасти (рис. 2).

Результаты оптимизации конструктивных параметров крупно-размерной модели лопасти несущего винта вертолета

Проведем оптимизацию параметров лонжерона в контрольном сечении технологической модели лопасти, показанной на фотографии (рис. 1). Траектории а) и б) решения системы уравнений (3) в контрольном сечении построены на рис. 3. На графике (рис. 3 а) дана зависимость параметров B и B_1 , обеспечивающих выполнение условия (2). Зависимость ограничивается совпадением передней стенки лонжерона с контуром в носке сечения лопасти (соответствует сечению без ниши для размещения балансировочного груза, $\Delta=x_f=0$, рис. 2). На графике (рис. 3 б) видно, что минимальная площадь сечения лонжерона F_d , и соответственно его погонная масса достигается на ограничении $\Delta=0$. При этом ширина полок лонжерона максимальна и составляет $B \cong 63$ мм. Введение зазора между контуром сечения в носке и передней стенкой лонжерона при выполнении условия (2) приводит к уменьшению ширины полок лонжерона, при увеличении площади поперечного сечения. На графике (рис. 3 б) видно, что зависимость площади полок лонжерона от их ширины B в окрестности ограничения $\Delta=0$ выполаживается. Зазор $\Delta=0,05$ под размещение балансировочного груза приводит для технологической лопасти к уменьшению ширины пол-

ки до 50 мм практически без заметного изменения площади сечения лонжерона.

Заключение

Разработанный способ оптимизации конструктивных параметров лонжерона позволяет для данной цифровой модели внешней поверхности лопасти, используемого полимерного композиционного материала и заданных объемов под размещение балансировочных грузов оперативно в течение нескольких дней, оценить рациональные конструктивные параметры крупноразмерной модели лопасти несущего винта вертолета.

Список литературы

1. Тищенко М.Н., Некрасов А.В., Радин А.С. Вертолеты. Выбор параметров при проектировании. М. Машиностроение. 1976.
2. Мартынов А.К. Экспериментальные исследования по аэродинамике вертолета. 2-е изд. М. Машиностроение. 1980.
3. Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Кулеш В.П., Трифонов И.В., Усов А.В., Чернышев Л.Л., Шардин А.О. Обеспечение требований к массово-инерционным характеристикам моделей лопастей несущих вертолетных винтов из ПКМ в условиях производственных погрешностей // Авиационная промышленность. 2019. Вып. 1. 2019.
4. Балашова Ю.С., Вермель В.Д., Мамонтов О.Б., Овсянников И.Ю., Подлеснов А.М., Шиняев А.В. Автоматизация управления проектированием и изготовлением изделий в опытных единичных машиностроительных производствах (на примере аэродинамических моделей для трубных испытаний) // Автоматизация в промышленности. 2019. № 5. с. 36-38.

Вермель Владимир Дмитриевич — д-р техн. наук, начальник НТЦ НПК, Евдокимов Юрий Юрьевич — начальник отдела,

Качарова Ираклий Нугзарович — начальник сектора, Николаев Прокопий Михайлович — д-р техн. наук, начальник отдела, Трифонов Иван Владимирович — начальник сектора,

Чернышев Леонид Леонидович — канд. техн. наук, начальник комплекса развития производственной и экспериментальной базы ФГУП "ЦАГИ".

Фонд по сохранению и развитию Соловецкого архипелага управляет инфраструктурными проектами с помощью российского программного обеспечения

Фонд по сохранению и развитию Соловецкого архипелага внедрил подсистему аналитики хода работ реставрации и строительства «Административный монитор». Основная цель внедрения подсистемы — повысить эффективность работ по созданию, реконструкции и капитальному ремонту объектов коммунальной, инженерной, транспортной и социальной инфраструктур и жилищному строительству на территории Соловецкого архипелага и отдельных территориях Республики Карелия, исторически связанных с Соловецким архипелагом. Также новое ПО обеспечит анализ эффективности работ по реставрации памятников истории и культуры этих территорий.

Сотрудники фонда начали использовать подсистему аналитики «Административный монитор» в апреле 2021 г. Эта подсистема позволяет получать актуальные сведения о ходе выполнения каждого из проектов по строительству и реконструкции, выявлять изменения в графике работ, своевременно отслеживать отклонение от плановых показателей, перепроверять отчетность подрядных организаций.

Подсистема быстро и наглядно визуализирует данные и помогает на основе достоверной и полной информации принимать управленческие решения. В подсистеме объекты строительства и реконструкции размещены на карте Соловецкого архипелага, данные по объектам отражены на аналитических панелях, представлены с помощью таблиц,

диаграмм Ганта, графиков, также имеется фотоархив объектов. Пользователь может самостоятельно получить нужные данные в нужных разрезах с помощью инструментов фильтрации и многоуровневой детализации информации.

Подсистема «Административный монитор» — это часть АСУ реставрацией и строительством АСУРИС. Она агрегирует данные из модулей «Адепт. Управление строительством», «Адепт. Исполнительная документация» разработаны на базе продуктов «Адепт», 1С-Рарус НКО и СЭД «Дело».

Решение «Административный монитор» реализовано на базе российского продукта для управления данными «Форсайт. Аналитическая платформа». Платформа содержит мощный инструментарий для анализа данных, в том числе построения прогнозов и моделирования. Возможности платформы позволяют одновременно вести аналитическую работу по сотням проектов, отслеживать статус выполнения проектов и прогнозировать ход их реализации в зависимости от изменения обстоятельств.

«Административный монитор» разрабатывает компания «ПРАЙМ ГРУП», которая поддерживает расширенное сопровождение нового решения, с дальнейшим развитием аналитических возможностей и функциональности.

[Http://www.fsight.ru](http://www.fsight.ru)