

Расчет резонансной диаграммы лопасти несущего винта в процессе проектирования

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Сформирована математическая модель собственных колебаний лопасти в поле центробежных сил. Применен метод трех моментов для определения форм и частот собственных колебаний вращающейся лопасти. Построена резонансная диаграмма лопасти в поле центробежных сил. Рассмотрено влияние параметров противофлаттерного груза на частоты собственных колебаний лопасти. Определены допустимые значения массы и длины противофлаттерного груза, при которых отсутствует резонанс лопасти в пределах эксплуатационных оборотов.

Ключевые слова: резонансная диаграмма, лопасть несущего винта, частоты и формы собственных колебаний, вертолет.

В процессе создания лопасти необходимо обеспечить высокую усталостную прочность конструкции. Для этого требуется отсутствие резонансов в эксплуатационном диапазоне частот вращения несущего винта. Поэтому уже на начальных этапах проектирования следует выполнить расчеты свободных упругих колебаний лопасти и построить резонансную диаграмму.

Практика проектирования показала, что расчетные методы определения частот собственных колебаний имеют точность порядка $\pm 2\%$ [1]. Следовательно, их применение на этапе проектирования является актуальным и обоснованным. Выбор параметров и доводка лопастей без использования таких методов расчета оказываются крайне неэффективными и трудоёмкими.

В процессе проектирования лопасти проводят расчеты собственных колебаний для исключения возможных резонансов с гармониками внешних сил. Даже небольшие по величине амплитуды переменных аэродинамических сил могут вызвать значительные по величине переменные напряжения. Гармонические составляющие аэродинамических сил, действующих на лопасть в полете, имеют существенную величину до гармоник не выше восьмой [1]. Более высокие гармоники настолько малы по величине, что могут не приниматься во внимание.

Частоты вынужденных колебаний могут быть определены по формуле

$$v = n\omega, \quad (1)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, 8$ – порядковый номер гармоники аэродинамической силы;

ω – частота вращения несущего винта.

Построенные совместно на одном графике зависимости частоты собственных колебаний вращающейся лопасти и частоты внешней нагрузки от частоты вращения несущего винта называются резонансной диаграммой лопасти.

В работе на основе сформированной математической модели и моделирования на ЭВМ собственных изгибных колебаний лопасти вертолета типа Ми-8 определен диапазон параметров, в котором отсутствует резонанс с восьмью гармониками аэродинамических сил. В качестве параметров использованы масса противофлаттерного груза $m_{пфг}$ и его длина $L_{пфг}$.

Лопасть представим в виде вращающейся шарнирно закрепленной балки с неравномерно распределенными массой и жесткостью, которая находится в поле

центробежных сил. Задача определения собственных форм и частот колебаний такой системы является геометрически нелинейной и точного аналитического решения не имеет. Поэтому в данной работе используем приближенный метод трех моментов[1].

В расчетах применена одномерная упругая модель с сосредоточенными грузами. Это означает, что лопасть разбита на конечное число участков различной длины, а её масса сосредоточена по краям этих участков в виде отдельных дискретных грузов. Изгибная жесткость является постоянной на протяжении каждого участка, а центробежная сила приложена к грузам. Рассматриваем только малые отклонения лопасти.

Уравнение деформации элемента лопасти имеет вид[2]

$$[EI y''']' - [N y']' = 0, \tag{2}$$

где EI – жесткость элемента лопасти на изгиб в плоскости взмаха;

y – функция прогиба лопасти;

N – центробежная сила, действующая на элемент лопасти.

Принимая, что на длине участка $EI = const$ и $N = const$, получим уравнение равновесия элемента

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \mu^2 M = 0, \tag{3}$$

где μ – коэффициент, определяемый из соотношения

$$\mu^2 = \frac{N}{EI}. \tag{4}$$

Решение уравнения (3) выражается такой функцией:

$$M(x) = A sh \mu x + B ch \mu x, \tag{5}$$

где A и B – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Численное решение системы уравнений равновесия для всех элементов лопасти позволяет с высокой точностью определить формы и частоты собственных изгибных колебаний лопасти.

В результате расчетов получены формы и частоты собственных колебаний вращающейся лопасти при рабочей частоте вращения несущего винта (рис. 1).

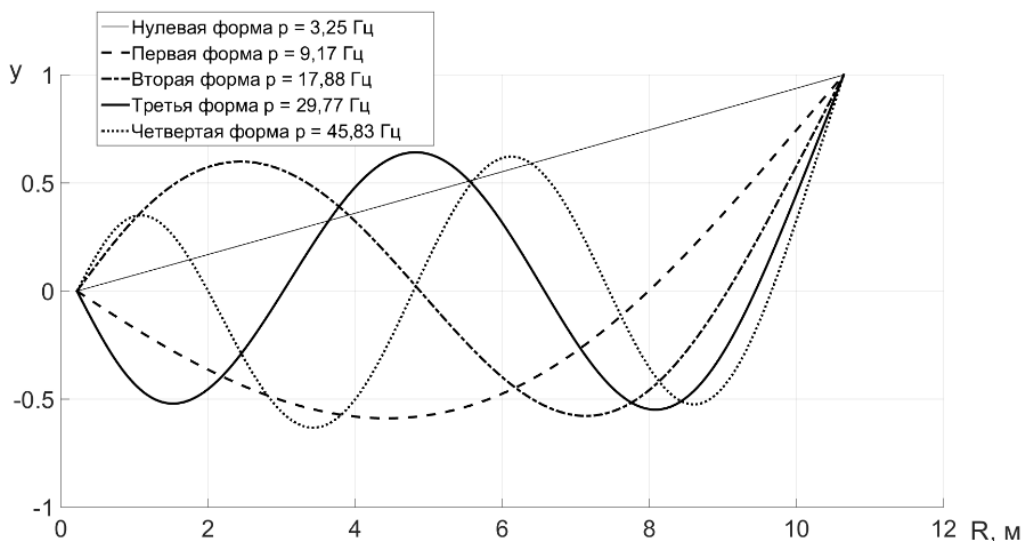


Рис. 1. Формы и частоты собственных колебаний вращающейся лопасти

Все формы собственных колебаний нормированы так, что перемещения конца лопасти равны единице.

На рис. 2 показаны частоты первых трех тонов собственных колебаний и восемь первых гармоник внешней аэродинамической силы. В эксплуатационном диапазоне оборотов пересечений графиков нет, следовательно, резонансы не возникают.

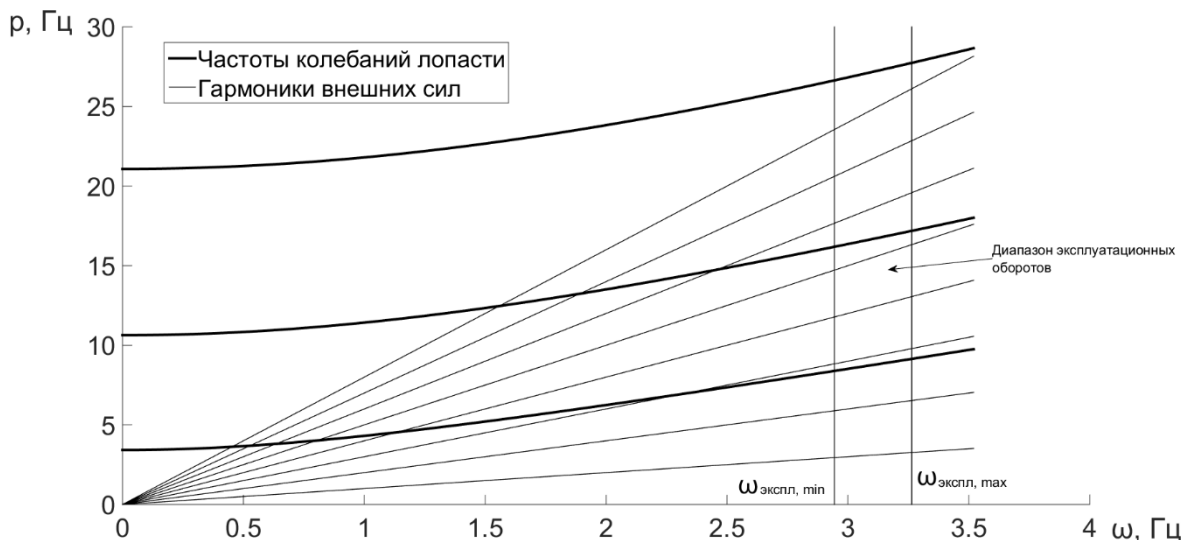


Рис. 2. Резонансная диаграмма лопасти несущего винта

В процессе проектирования часто возникает вопрос о допустимых значениях тех или иных параметров конструкции. На рис. 3 показано влияние массы и длины противовлаптерного груза на количество резонансов в эксплуатационном диапазоне частоты вращения винта. Резонансы в этом рабочем диапазоне частот вращения несущего винта должны быть исключены уже на этапе проектирования лопасти. Резонансы до эксплуатационного диапазона частот, так называемые «проходные», считаем неопасными, поскольку при быстрой раскрутке несущего винта амплитуда колебаний остается небольшой.

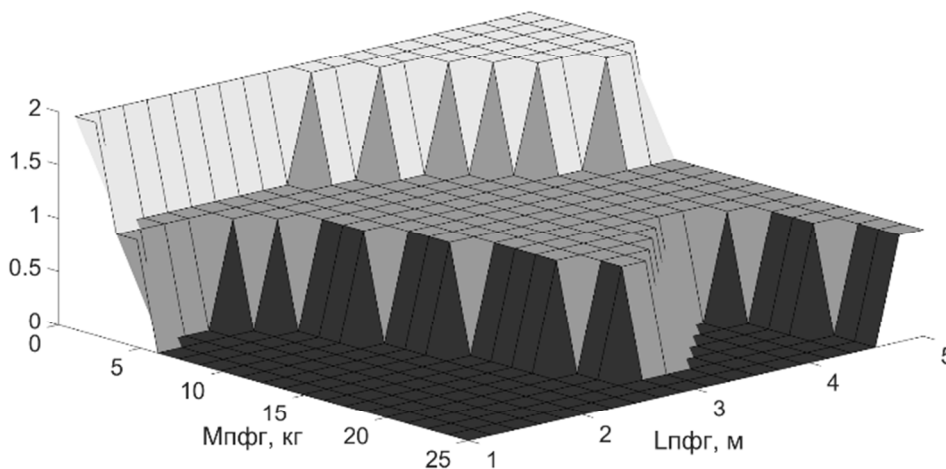


Рис. 3. Определение допустимых значений параметров противовлаптерного груза

Таким образом, расчет динамических характеристик и построение резонансной диаграммы вращающейся лопасти позволяют с хорошей точностью предсказывать резонанс лопасти при различных оборотах несущего винта.

Расчет динамических характеристик выполняют в короткие сроки, что позволяет эффективно использовать его на этапе проектирования. В дальнейшем следует осуществлять проверочные расчеты с использованием методов конечного элемента.

Построенная математическая модель и вычислительный эксперимент на ЭВМ дают возможность проводить широкие параметрические исследования и выбирать оптимальные соотношения параметров конструкции на этапе проектирования лопасти вертолета. Такая модель должна использоваться и уточняться на протяжении всего жизненного цикла вертолета.

Список литературы

1. Вертолеты, расчет и проектирование [Текст]: в 3 т. – Т. 2: Колебания и динамическая прочность / М. Л. Миль, А. В. Некрасов, А. С. Браверман и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 424 с.

2. Михеев, Р. А. Прочность вертолетов [Текст]: учебник для авиационных специальностей втузов / Р. А. Михеев. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Поступила в редакцию 19.09.2016

Розрахунок резонансної діаграми лопаті несучого гвинта в процесі проектування

Сформовано математичну модель власних коливань лопаті в полі відцентрових сил. Застосовано метод трьох моментів для визначення форм і частот власних коливань обертової лопаті. Побудовано резонансну діаграму лопаті в полі відцентрових сил. Розглянуто вплив параметрів протифлатерного вантажу на частоти власних коливань лопаті. Визначено допустимі значення маси і довжини протифлатерного вантажу, за яких відсутній резонанс лопаті в межах експлуатаційних обертів.

Ключові слова: резонансна діаграма, лопать несучого гвинта, частоти і форми власних коливань, вертоліт.

Rotor Blade's Resonance Diagram Calculation in Design Process

Mathematical model of natural oscillations of the rotor blade in the field of centrifugal forces is formed. Method of three moments is applied to define the forms and frequencies of rotating blade's natural oscillations. Resonance diagram of the blade in the centrifugal force field is compiled. The influence of antiflutter load parameters on blade's natural oscillations is considered. The permissible values of mass and length of the antiflutter load that don't cause blade's resonance within the operating speed are defined.

Keywords: resonance diagram, rotorblade, natural oscillations, helicopter.

Онищенко Владимир Михайлович – к.т.н., доцент каф. №102 «Прочность летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Рябов Владимир Сергеевич – студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.