

629.735.01:629.735.45(045)

> .&\ - - , - ((.

, - - ' -

V

V

раметров лопасти также учтены смещения по хорде центра масс секции лопасти, ее центра кручения и аэродинамического центра. Кроме того, каждый сегмент лопасти смоделирован с использованием одного или более элементов балки. Внутрисегментная совместимость удовлетворяет условиям использования нелинейных преобразований [1].

Анализ лопасти несущего винта вертолета методом конечных элементов основан на принципе Гамильтона, который может быть записан как

$$\delta\Pi = \int_{\psi_1}^{\psi_2} (\delta U - \delta T - \delta W) d\psi = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sum_{i=1}^N (\delta U - \delta T - \delta W) d\psi = 0,$$

где $\delta\Pi$ – полная энергия; ψ – угол азимута; δT – кинетическая энергия (тяга винта); δW – возможная работа; N – число лопастей.

Особенность композитных материалов заключается в наличии возможной потенциальной энергии δU . Выражения для δT и δW одинаковы как для лопастей с современной металлической конструкцией, так и для лопастей с усовершенствованной композитной конструкцией.

В исследованиях используется конечный элемент с 15 степенями свободы. Эти степени свободы соответствуют кубическим вариациям в оси упругости и изгибным деформациям (при взмахе и отставании), а также квадратичным вариациям при упругом кручении. К изменяемым конструктивным параметрам относятся: угол сгиба двухсекционного коробчато-балочного лонжерона, неконструктивные массы и их сдвиг по оси упругости, стреловидность, отрицательное поперечное V и сужение формы лопасти в плане. Лопасть несущего винта вертолета разбита по размаху на пять конечных элементов. Структурные параметры можно изменять для каждого из пяти элементов. Это позволяет варьировать упругую жесткость и композитные связи по размаху лопасти. Анализ аэроупругости включает в себя вычисление балансировки летательного аппарата, устойчивого поведения лопасти и устойчивости возмущенного движения лопасти.

В общем случае движение лопасти несущего винта вертолета можно описать уравнением динамики:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BY(t),$$

где $X(t)$ – вектор внутренних состояний системы; A , B – передаточные матрицы; $Y(t)$ – вектор внешних воздействий на систему.

Устойчивая периодическая реакция лопасти во временной области определяется методом конечных элементов после того, как уравнения в пространственной области преобразованы к нормальным модальным уравнениям. Нелинейное балансирующее уравнение и уравнение относительно реакции лопасти решены совместно методом Ньютона. Линеаризованные уравнения периодического возмущенного движения винта решены с помощью передаточных матриц Флоквета.

Для оптимизации используются три целевые функции [1]. Первая функция представляет собой только вибрационную нагрузку на втулку, вторая функция включает в себя изгибные колебания лопасти и крутильные моменты, а третья является комбинацией обеих функций. Первая целевая функция является суммой скалярных норм четырехоборотных сил и четырехоборотных моментов, передающихся четырехлопастным несущим винтом вертолета на фюзеляж как первичный источник вибрации, и определяется как

$$J_v = \sqrt{(F_{xH}^{4P})^2 + (F_{yH}^{4P})^2 + (F_{zH}^{4P})^2} + \sqrt{(M_{xH}^{4P})^2 + (M_{yH}^{4P})^2 + (M_{zH}^{4P})^2},$$

