

# РАСЧЁТ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ОТ ФЛАТТЕРА КРЫЛА МАЛОГО УДЛИНЕНИЯ МЕТОДОМ ПОЛИНОМОВ

Благодырёва О. В.

ОАО «Корпорация «Тактическое Ракетное Вооружение»,  
г. Королёв, Московская область, Россия

Флаттером называют незатухающие упругие колебания летательного аппарата (ЛА), возникающие в полёте, если скорость полёта достигает некоторой определённой величины. Эти колебания порождаются аэродинамическими воздействиями и относятся к классу автоколебаний. Опасность флаттера заключается в том, что возникающие при интенсивных колебаниях динамические напряжения могут достигнуть разрушающих, и выход из строя автоматической системы управления может привести к катастрофе ЛА.

Основным критерием, характеризующим флаттер ЛА, является величина критической скорости флаттера. Критической скоростью  $V_{кр}$  называется скорость полёта, при достижении которой возникают незатухающие упругие колебания ЛА. При скоростях больших  $V_{кр}$  колебания нарастают, а при меньших – затухают. Критическая скорость флаттера ЛА зависит от плотности и температуры воздуха, которые для различных высот имеют различные значения.

Основным критерием безопасности от флаттера является соотношение критической скорости флаттера  $V_{кр}$  и максимальной скорости полёта  $V_{max}$ , которую может достигнуть ЛА. Критическая скорость флаттера должна превышать  $V_{max}$  не менее чем в  $k$  раз, где  $k = 1.3$  – коэффициент запаса.

ЛА может быть подвержен разнообразным формам флаттера. В каждой форме флаттера обычно можно выделить основные «ведущие» степени свободы, изменение связи между которыми приводит к заметному изменению критической скорости. Так, например, для рулевых (элеронных) форм флаттера одной из таких ведущих степеней свободы будет угол отклонения руля (или элерона), другой – деформация поверхности, несущей руль.

При анализе флаттера первой встаёт задача выделения этих «ведущих» степеней свободы. Во многих случаях величина  $V_{кр}$  ЛА обусловлена характеристиками одной какой-нибудь его несущей части (например, крыльев), то есть можно пренебречь взаимодействием колебаний крыльев и остальных частей ЛА и считать крылья изолированными и даже как бы заземлёнными в неподвижную стенку. Задача существенно упрощается.

Расчёт каждой формы флаттера должен быть выполнен для всех режимов полёта (или для всей возможной траектории полёта). Критическая скорость существенно зависит от плотности воздуха (высоты полёта) и его сжимаемости (числа  $M$ ).

При решении задачи о флаттере, как правило, ограничиваются определением границы устойчивости упругих колебаний конструкции в потоке воздуха. Поэтому рассматривают малые колебания.

Конструкцию ЛА схематизируют девятью типами элементов, которые позволяют описать ЛА или какую-либо из его частей в целом. Этим типам элементов присвоены следующие условные названия: 1) балки, работающие на изгиб; 2) балки, работающие на кручение; 3) панели; 4) ортотропные панели; 5) элероны; 6) линейные части; 7) сосредоточенные массы; 8) пружины; 9) трапеции.

Одним из методов расчёта деформации конструкции при колебаниях является метод полиномов, основанный на методе Ритца. Деформацию  $w(x, z, t)$  какой-либо несущей поверхности (а также фюзеляжа) представляют в виде степенного ряда по

координатам  $x$  и  $z$ , при этом неизвестные коэффициенты ряда принимают за обобщённые координаты:

$$w(x, z, t) = \sum_{k=0}^{\infty} u_k(t) x^{p_k} z^{q_k},$$

где  $x$  – координата по потоку,  $z$  – координата по размаху,  $t$  – время,  $u_k(t)$  – обобщённая координата. Набор показателей степеней задаётся таблицей. На практике ограничиваются конечным числом  $N$  членов ряда, оставляя из младших степенных функций только такие, которые соответствуют характеру граничных условий данной конкретной задачи. Степень полученного многочлена зависит от того, сколько тонов собственных колебаний считается необходимым учитывать при расчёте на флаттер. Она должна быть примерно вдвое больше числа узловых линий, встречающихся на крыле (оперении) соответственно вдоль осей  $x$  и  $z$ .

Дифференциальные уравнения задачи о малых колебаниях получаются из уравнения Лагранжа второго рода, если за обобщённые координаты выбрать коэффициенты ряда  $u_k(t)$ :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_k} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial u_k} = Q_k, \quad k = 1, \dots, N,$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия,  $T$  – кинетическая энергия,  $Q_k$  – обобщённые внешние силы. Кинетическую и потенциальную энергию колебаний представляют квадратичными формами от обобщённых скоростей и обобщённых координат, соответственно.

Решениями системы  $N$  уравнений Лагранжа являются вектор собственных частот системы и матрица, соответствующая собственным формам в обобщённых координатах. Собственная частота колебаний – это угловая частота колебаний, которая зависит только от параметров системы и не зависит от начальных условий. Конфигурации системы, получающиеся в процессе свободных колебаний и соответствующие собственным частотам, называют собственными формами. С помощью матрицы перехода полученные собственные формы из обобщённых координат преобразуют в физические.

Изучение поведения ЛА при свободных колебаниях помогает характеризовать поведение ЛА в условиях воздействия на него внешних аэродинамических сил.

Для элементов, схематизирующих конструкцию, вычисляют матрицы инерции, жёсткости, аэродинамического демпфирования и аэродинамической жёсткости. Из полученных матриц составляют общую матрицу, собственные значения которой являются собственными частотами аэродинамической системы в потоке воздуха. Среди этих частот находят частоту, при которой возникают незатухающие колебания. Соответствующая этой частоте скорость полёта (при заданных параметрах плотности атмосферы и числа  $M$ ) и является критической скоростью флаттера.