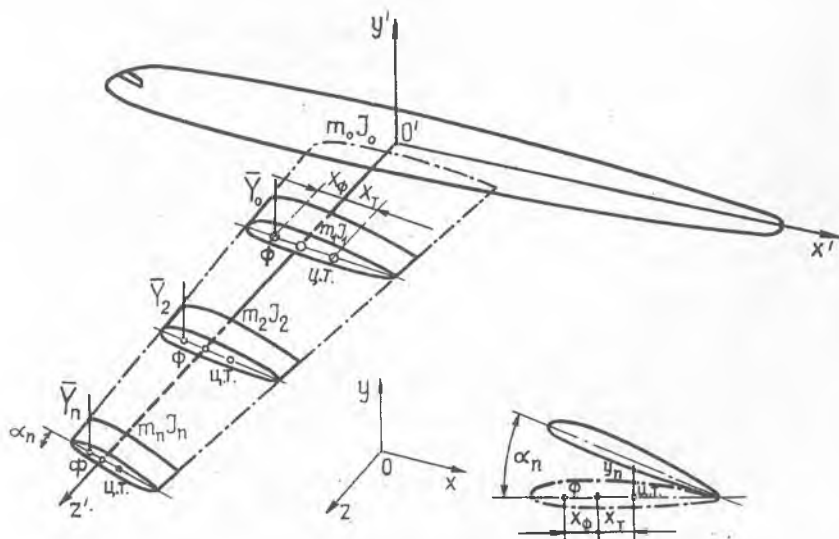


А.Н.Кобцев, В.И.Перепелка, М.Г.Титаренко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРЫЛА С УЧЕТОМ
 КОНСТРУКЦИОННОГО ГИСТЕРЕЗИСА

Исследование динамической нагруженности и усталостной долговечности авиационных конструкций в большинстве случаев проводится на линейных моделях. Лишь отдельные задачи флаттера решаются с привлечением реальных нелинейностей и учетом внутреннего рассеяния энергии. При этом выясняется существенная зависимость динамических характеристик от вводимых в рассмотрение параметров, описывающих нелинейное и диссипативные свойства конструкции. Подобный же эффект проявляется в задачах динамической реакции упругого крыла.

В работе предлагается нелинейная динамическая модель крыла самолета, учитывающая его конструкционное демпфирование. Крыло схематизируется в виде цепочки сосредоточенных инерционных элементов, соединенных между собой упруго-гистерезисными связями (рис. I).



Р и с. I. Расчетная схема крыла

Каждая связь при движении деформируется по двум направлениям: изгибается и закручивается. При изолированном циклическом нагружении связи проявляется гистерезисная зависимость между внешней нагрузкой и соответствующей ей деформацией. Площадь формируемой при этом петли гистерезиса характеризует количество энергии, рассеиваемой элементом за цикл нагружения. Очертания контура петли гистерезиса отражают нелинейные свойства конструкции. Предполагается взаимная независимость параметров гистерезиса по обоим направлениям деформирования, т.е. изгибный гистерезис, например, проявляется только при наличии изгибной деформации и совершенно не зависит от крутильной. Для установления вида петли гистерезиса предлагается использовать зависимость $A(x)$ энергии, рассеиваемой в конструкции крыла за цикл нагружения, от амплитуды цикла x . Эту зависимость просто и с достаточной точностью можно получить экспериментально. Дифференциальное уравнение, связывающее указанную зависимость с уравнением $f(x)$, описывающим контуры петли гистерезиса, имеет вид

$$\frac{df}{dx} = \frac{f}{x} - \frac{dA}{dx} \frac{1}{4x}; \quad (1)$$

В соответствии с этим выражением кусочная-линейная зависимость энергии диссипации от амплитуды цикла приводит к полигональной петле гистерезиса, а степенная - к петле гистерезиса с криволинейным контуром (рис. 2).

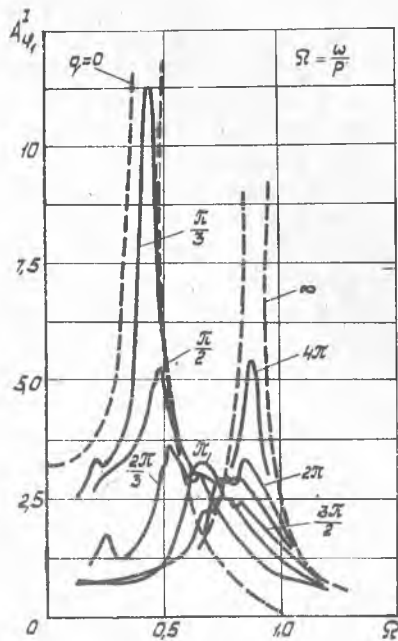
С учетом приведенных выше допущений уравнения изгибно-крутильных колебаний крыла в инерциальной системе координат XOY под действием турбулентного воздушного потока записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} m_i \ddot{y}_{i0} &= Y_i(t) - F_i + F_{i+1}; \\ J_{i0} \ddot{\alpha}_i &= Y_i(t)(x_{i\tau} + x_{i\varphi}) - M_i + M_{i+1} + (F_{i+1} - F_i)x_{i\tau} \\ &(i=1, 2, \dots, n; F_{n+1} = M_{n+1} = 0), \end{aligned} \quad (2)$$

где m_i, J_{i0} - масса и собственный момент инерции i -го элемента крыла; $x_{i\tau}, x_{i\varphi}$ - координаты фокуса и центра тяжести элемента; F_i, M_i - упруго-гистерезисные функции изгиба и кручения. Аэродинамические силы вычисляются по квазистационарной теории

$$Y_i(t) = \frac{1}{2} \rho v^2 \delta c_y^k \left(\frac{w(t)}{v} + \alpha_i - \frac{\dot{y}_i}{v} \right). \quad (3)$$

Случайная функция $w(t)$ дает зависимость скорости вертикального воздушного порыва от времени. Моделирование ее осуществляется на ЭВМ по



Р и с. 2. Связь между амплитудной зависимостью работы $A(x)$ и формой петли гистерезиса $f(x)$

известным спектральным характеристикам атмосферной турбулентности.

При исследовании поведения свободного крыла к системе уравнений (2) добавляются уравнения, описывающие линейные и угловые перемещения фюзеляжа как твердого тела:

$$\left. \begin{aligned} m_0 \ddot{y}_0 &= Y_0(t) + F_1 - F_0 ; \\ J_{00} \ddot{\alpha}_0 &= Y_0(t) x_p + M_1 - M_0 + (F_1 - F_0) x_r . \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При симметричном движении свободного крыла достаточно рассмотреть половину конструкции, и в этом случае $F_0 = M_0 = 0$.

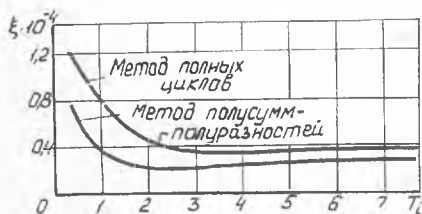
Уруго-гистерезисные функции кручения M_i выражаются в явном виде через относительные углы поворота $\Delta \alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i-1}$. При этом используются соотношения, приведенные на рис. 2. При определении уруго-гистерезисных функций изгиба F_i на интервале, определяемом шагом численного интегрирования, гистерезисная система считается линейной. Это позволяет записать соотношение

$$\{\Delta y_i\} = [G] \{\Delta \psi_i\} , \quad (5)$$

устанавливающей связь между приращениями перемещений Δy_i и нагрузок $\Delta F_i = \Delta F_i - F_{i+1}$. Элементы матрицы коэффициентов влияния $[D]$ определяются текущими значениями изгибных жесткостей участков связей. При изучении движения свободного крыла вместо приращений абсолютных перемещений Δy_i берутся приращения вертикальных перемещений $\Delta y_i' = \Delta y_i - \Delta y_0$ сечений крыла относительно заделки - фюзеляжа.

Решение поставленной задачи осуществляется численным методом на ЭВМ. Для этой цели разработана циклическая программа. Технические возможности использованной ЭВМ позволили рассмотреть систему с 32 степенями свободы. В процессе решения фиксировался отклик системы в нескольких расчетных сечениях на различные виды случайного возмущения. В качестве контрольных параметров отклика были использованы вертикальные и угловые перемещения инерционных элементов, изгибающие, крутящие моменты и перерезывающие силы. На втором этапе решения задачи проводилась обработка случайных реализаций отклика системы с целью получения сведений о повторяемости нагрузок и накопленной усталостной повреждаемости в расчетных сечениях. При вычислении повторяемости нагрузок использовалось два метода циклообразования: полусумм-полуразностей и полных циклов. Расчет повреждаемости проводился по линейной теории.

Основная задача проведенных расчетов состояла в исследовании влияния параметров конструкционного гистерезиса и его вида на повторяемость нагрузок и повреждаемость конструкции. Варьировалась ширина петель гистерезиса, что физически соответствует изменению интенсивности сил трения по контактным поверхностям. На рис. 3 представлен гра-



Р и с.3. Зависимость повреждаемости от интенсивности сил трения

фик зависимости повреждаемости в расчетном сечении около пятого инерционного элемента от ширины петли гистерезиса параллелограммного типа. Из него следует, что при некоторых значениях интенсивности трения (ширины петли гистерезиса) сечение имеет минимальное значение повреждаемости, т.е. работает в оптимальном динамическом режиме. При

невозможности обеспечить оптимальное значение трения в конструкции предпочтительным является введение трения большего (даже во много раз), нежели меньшего, чем оптимальное.

Кроме того, из рис. 3 видно, что метод полных циклов дает более высокие значения повреждаемости, чем метод полусумм-полуразностей.

Полученные результаты указывают на существенную зависимость расчетных значений нагруженности и повреждаемости от параметров конструкционного гистерезиса. Следовательно, при проведении динамических расчетов необходимо учитывать реальные нелинейные и гистерезисные свойства крыла. Кроме того, установлена возможность снижения уровня динамических нагрузок и повреждаемости за счет параметров конструкционного гистерезиса, что следует учитывать при проектировании оптимальных крыльевых конструкций.

В.К.Логинов

КОНСТРУКЦИОННОЕ ДЕМПИРОВАНИЕ ЗЕМНОГО РЕЗОНАНСА ВЕРТОЛЕТА

В последние годы появились работы, посвященные выяснению роли демпфирования в задачах устойчивости неконсервативных систем. Было показано, что введение малого вязкого трения в систему может дестабилизировать ее [1], [2], [3], [6 и др.]. В работе [7] на примере двойного обращенного маятника, шарниры которого обладают упруго-фрикционной характеристикой специального типа,* показана дестабилизирующая роль малого сухого трения. В работе [6] рассмотрена неконсервативная система с конструкционным демпфированием, причем оказалось, что трение может как дестабилизировать систему, так и улучшать ее устойчивость. Однако роль конструкционного гистерезиса криволинейной формы в задачах устойчивости до сих пор остается невыясненной, поскольку гистерезис такого типа обладает свойством менять в зависимости от трения не только диссипативные свойства системы, но и ее жесткость.

В качестве примера рассмотрена задача устойчивости идеализированной схемы вертолета на земле (рис. 1) [3], [5]. Фюзеляж имеет одну степень свободы - x , винт вращается вокруг вертикальной оси A с постоянной угловой скоростью ω в пустоте, тяжелые жесткие лопасти могут вращаться вокруг вертикальных шарниров B .