

УДК 539.3:629.7.025

ОБ ОДНОМ ВИДЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М. К. Тлеулинов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева (КАИ), 420111 Казань, Россия
E-mail: mktleulinov@kai.ru

Исследуются колебания катастрофического типа конструкции, состоящей из несущей и управляющей поверхностей. Показано, что этот процесс является автоколебательным. Приведены результаты расчетов.

Ключевые слова: составная конструкция, автоколебания, катастрофическая потеря устойчивости, несущая и управляющая поверхности.

DOI: 10.15372/PMTF20190521

При обтекании составных несущих и управляющих поверхностей летательных аппаратов, где управляющая поверхность прикреплена к несущей статически неопределимым образом, т. е. в трех и более точках, могут возникнуть колебания катастрофического типа — колебания прощелкивания или катастрофического изменения формы [1, 2]. Суть этого явления заключается в том, что в определенный момент под действием нагрузки и вследствие реакций в узлах навески происходит потеря устойчивости плоской формы изгиба, конструкция скачкообразно переходит из одного состояния равновесия в другое, при этом существенно меняются прогибы и углы закручивания — происходит жесткая бифуркация (катастрофа). После этого факторы, приведшие к катастрофе, исчезают, под действием упругих сил конструкция также скачкообразно возвращается в исходное положение — происходит обратная катастрофа. Факторы, приведшие к катастрофе, восстанавливаются, и процесс повторяется. Колебания этого типа характеризуются тем, что при каждом цикле колебаний дважды происходят катастрофическое изменение формы и жесткая бифуркация (прямая и обратная). На рис. 1 показана схема катастрофического изменения формы составной конструкции.

Существование колебаний катастрофического типа, открытых В. А. Павловым в конце 70-х гг. XX в. [1], подтверждено в эксперименте, проведенном в аэродинамической трубе [2]. Ряд исследователей считают это явление новым, другие утверждают, что эти колебания являются разновидностью изгибно-рулевого флаттера. Для исследования данного явления необходимо построение геометрически нелинейной математической модели и методов нелинейного динамического расчета, учитывающих совместные перемещения несущей и управляющей поверхностей, что является достаточно сложной задачей, поскольку при деформировании составной конструкции возникают различные нелинейные процессы. Вследствие колебаний меняется жесткость конструкции. Реакции в узлах соединения поверхностей нелинейно зависят от перемещений и нагрузки. Нестационарная (следящая)

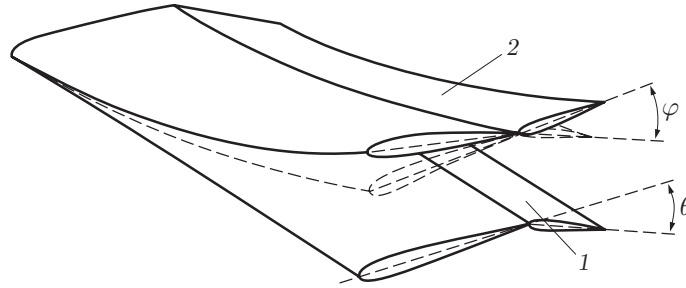


Рис. 1. Схема катастрофического изменения формы составной конструкции:
 1 — исходное положение, 2 — положение после катастрофического изменения формы

аэродинамическая нагрузка также зависит от перемещений. В момент потери устойчивости плоской формы изгиба матрица жесткости конструкции вырождается. В результате при использовании известных методов расчета имеет место расходящийся численный процесс. Устойчивое решение удалось получить только с использованием специальной методики численного динамического расчета, приведенной в работе [3], и метода прямого интегрирования, изложенного в [4].

В соответствии с методом [4] скорости и ускорения определяются выражениями

$$\dot{U}_{k+1} = \frac{12}{13} \Delta t \left(\frac{\beta_0}{3} + \beta_1 + \beta_2 \right) \ddot{U}_{k+1} + \Delta \dot{U}_{k+1}, \quad \ddot{U}_{k+1} = a(U_{k+1} - \Delta U_{k+1}),$$

где

$$a = 13/[12\Delta t^2(\alpha_0/3 + \alpha_1 + \alpha_2)],$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{k+1} &= U_k + \dot{U}_k \Delta t + \Delta t^2 [(1/2 + (11/26)\alpha_0 - (16/13)\alpha_1 - (42/13)\alpha_2) \ddot{U}_k - \\ &- ((10/13)\alpha_0 + (4/13)\alpha_1 - (48/13)\alpha_2) \ddot{U}_{k-1} + ((1/26)\alpha_0 + (8/13)\alpha_1 - (18/13)\alpha_2) \ddot{U}_{k-2}], \\ \Delta \dot{U}_{k+1} &= \dot{U}_k + \Delta t [(1 + (11/26)\beta_0 - (16/13)\beta_1 - (42/13)\beta_2) \ddot{U}_k - ((10/13)\beta_0 + \\ &+ (4/13)\beta_1 - (48/13)\beta_2) \ddot{U}_{k-1} + ((1/26)\beta_0 + (8/13)\beta_1 - (18/13)\beta_2) \ddot{U}_{k-2}]. \end{aligned}$$

Точность и устойчивость приведенного метода зависят от значений коэффициентов $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2$. В данной работе использовались значения $\alpha_0 = 0,167, \alpha_1 = 0,145, \alpha_2 = 0,115, \beta_0 = 0,5, \beta_1 = 0,38, \beta_2 = 0,225$.

На каждом шаге по времени решение уточняется с помощью метода Ньютона или его модификаций для систем нелинейных алгебраических уравнений. Используется следующий алгоритм уточнения решения на произвольном $(k + 1)$ -м шаге по времени:

1) по найденному решению уравнения движения U_{k+1} определяются перемещения в первом приближении $U_{k+1}^{(1)} = U_{k+1}$;

2) формируются матрицы $B_{k+1}^{(1)}, W_{k+1}^{(1)}, P_{k+1}^{(1)}$, эквивалентная матрица жесткости $B_{k+1} = K_{k+1} + baC + aM$, матрица жесткости K_{k+1} , матрица демпфирования C , матрица масс M , вектор внешней нагрузки P_{k+1} , $b = (12/13) \Delta t (\beta_0/3 + \beta_1 + \beta_2)$, вектор эквивалентной нагрузки $\bar{P}_{k+1} = P_{k+1} - C \Delta \dot{U}_{k+1} + (baC + aM) \Delta U_{k+1}$, матрица Якоби $W^{(i)}$.

3) вычисляются векторы $U_{k+1}^{(2)}$.

Процесс повторяется до тех пор, пока невязка нелинейного решения не станет меньше заданной малой величины.

На основе стержневой модели, описанной в работе [5], проведены исследования составной конструкции, характеристики которой приведены в [2]. На рис. 2 показана зависимость угла закручивания сечений управляющей поверхности от времени $\varphi(t)$. Угол отклонения

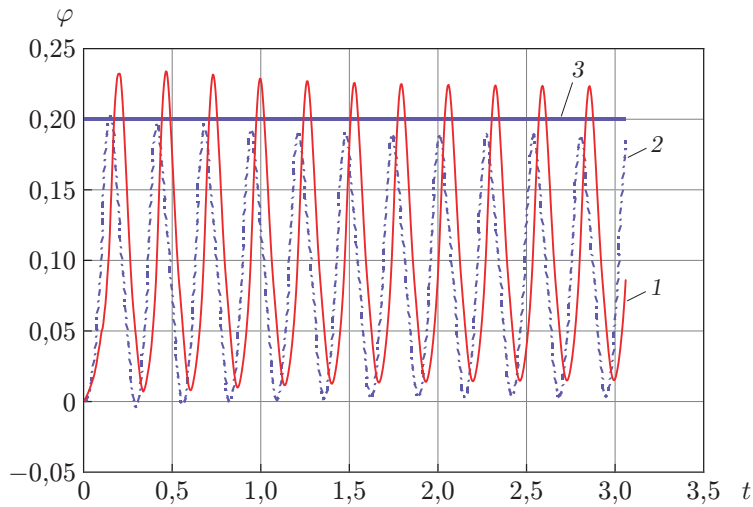


Рис. 2. Зависимость угла закручивания сечений управляющей поверхности от времени $\varphi(t)$:

1 — угол закручивания конечного сечения, 2 — угол закручивания среднего сечения, 3 — $|\theta| = 0,2$

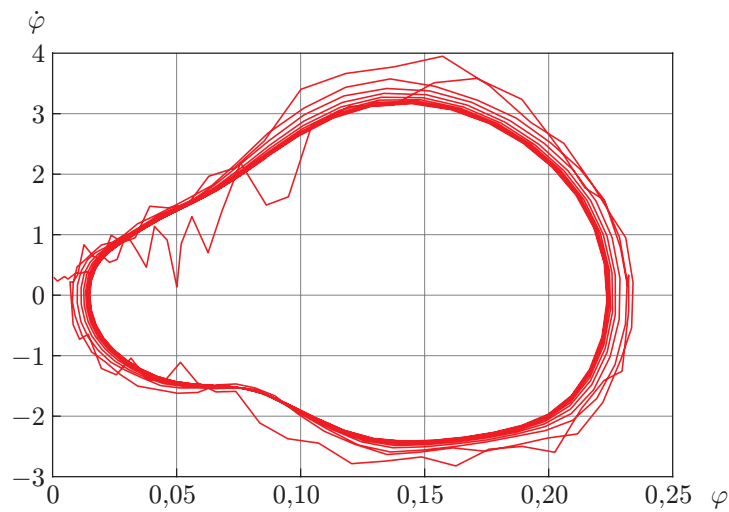


Рис. 3. Фазовый портрет закручивания конечного сечения управляющей поверхности $\dot{\varphi}(\varphi)$

управляющей поверхности равен $\theta = -0,2$ рад. В момент достижения углом закручивания значения $\varphi = 0,2$ рад происходит прощелкивание — катастрофическое изменение формы конструкции (линия 3). Из рис. 2, 3 следует, что колебания являются незатухающими. На рис. 3 приведен фазовый портрет $\dot{\varphi}(\varphi)$ закручивания конечного сечения управляющей поверхности, который представляет собой предельный цикл, что соответствует автоколебаниям.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Колебания, при которых происходит прощелкивание (катастрофическое изменение формы), представляют собой автоколебательный процесс, т. е. подобны классическим видам флаттера. При таких колебаниях возникает динамическая неустойчивость конструкции в потоке в виде автоколебаний с постоянной амплитудой.

Колебания, при которых происходит прощелкивание, принципиально отличаются от изгибно-рулевого флаттера. Они происходят в идеально сбалансированной конструкции, где возникновение изгибно-рулевого флаттера невозможно.

Колебания, при которых происходит прощелкивание, приводят к катастрофическому изменению формы составной конструкции и могут возникнуть только при статически неопределимом соединении несущей и управляющей поверхностей и при отклонении управляющей поверхности от исходного положения.

Таким образом, колебания, при которых происходит прощелкивание (катастрофическое изменение формы), — явление динамической аэроупругости, отличающееся от классического флаттера. Эти колебания обусловлены статически неопределимым креплением руля к несущей поверхности, могут возникнуть только при отклонении руля и сопровождаются катастрофическим изменением формы составной конструкции (прощелкиванием). Поэтому данные колебания являются колебаниями катастрофического типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В. А. О колебаниях “прощелкивания” оперения // Изв. вузов. Авиационная техника. 1975. № 2. С. 99–105.
2. Павлов В. А., Хакимуллин Ф. Ш., Гурьянов А. Я., Герштейн М. И. Экспериментальное исследование колебаний прощелкивания оперения // Изв. вузов. Авиационная техника. 1980. № 4. С. 81–84.
3. Тлеулинов М. К. О нелинейных колебаниях панелей обшивки // Вестн. Казан. гос. техн. ун-та им. А. Н. Туполева. 2010. № 1. С. 5–8.
4. Тлеулинов М. К. О методах прямого интегрирования в динамических задачах строительной механики // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. № 2. С. 20–23.
5. Павлов В. А., Тлеулинов М. К. О колебаниях катастрофического изменения формы оперения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2005. № 3. С. 13–15.

*Поступила в редакцию 13/ХІІ 2018 г.,
после доработки — 27/ІІ 2019 г.
Принята к публикации 25/ІІІ 2019 г.*
