Филипковский Сергей Владимирович, д.т.н., с.н.с., профессор, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, sfilipkovskij@gmail.com

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРПУСА ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ РАКЕТЫ

Объект исследования представляет собой летательный аппарат (ЛА) с твердотопливным двигателем, запускаемый с автомобильной пусковой установки. Направляющие пусковой установки не обеспечивают выход ракеты на заданную траекторию. Поэтому сразу после отрыва от направляющих начинается корректировка направления полёта с помощью рулевых двигателей.

Целью работы является исследование динамики ЛА в полете и обеспечение устойчивого и управляемого полёта ЛА по траектории.

ЛА представляет собой полый стержень со ступенчато изменяющимся сечением. В полёте ЛА следует рассматривать как свободное тело. Погонная масса на большей части длины корпуса без топливного заряда равна 35 кг/м. В отсеке полезного груза она равна 147 кг/м, а в отсеке системы управления – 64 кг/м. Длина корпуса равна 7,665 м.

ЛА имеет газодинамическую систему управления полётом с помощью рулей и газоструйную с помощью рулевых двигателей. Рулевые двигатели представляют собой малогабаритные одноразовые твердотопливные двигатели, которые расположены в пять рядов по периметру корпуса ЛА на расстоянии 0,58 м от носа.

Импульс силы тяги рулевого двигателя составляет 200 Н·с, его продолжительность равна 1 с [1]. Форма импульса близка к полуволне синусоиды и его можно описать формулой

$$F(t) = F_1 \sin \omega t, \tag{1}$$

где $F_1 = 1256{,}6$ Н,

ω = 12,56 рад/с.

Динамическая задача вынужденных колебаний в МКЭ описывается матричным уравнением [2]

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\}. \tag{2}$$

Искомые перемещения представим в виде линейной комбинации собственных форм колебаний

$$\{U\} = \left[\{U_0\}_1 \quad \{U_0\}_2 \quad \ldots \quad \{U_0\}_J\right]\{Z(t)\} = [\Delta_0]\{Z(t)\}, \tag{3}$$

где $\{U_0\}_j$ – собственные векторы,

$\{Z(t)\}$ – функции времени при собственных векторах,

$[\Delta_0]$ – матрица собственных векторов,

J – количество степеней свободы.

Собственные векторы находим путём решения обобщённой проблемы собственных значений

$$\left(\left[K\right]-p^2\left[M\right]\right)\left\{U_0\right\}=0, \tag{4}$$

где p – собственные круговые частоты системы. Для этого используем имеющиеся стандартные программы.

Подставив (3) в (2), умножив результат на $\left[\Delta_0\right]^T$ и используя свойство ортогональности собственных форм, из системы (2) получаем совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений

$$p_j^2 Z_j+\ddot{Z}_j=\left\{U_0\right\}_j^T\left\{F(t)\right\}, \tag{5}$$

при этом векторы $\left\{U_0\right\}_j$ должны быть нормированы следующим образом: $\left\{U_0\right\}^T\left[M\right]\left\{U_0\right\}=1$.

Каждое из уравнений (5) решают отдельно при нулевых начальных условиях и получают

$$Z_j=\frac{1}{p_j}\int_0^t\left\{U_0\right\}^T\left\{F(\tau)\right\}\sin p_j(t-\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{6}$$

где τ – переменная интегрирования по времени. Подставляя (1) в (6) получаем выражение для функций времени, которое можно проинтегрировать точно

$$Z_j(t)=\sum_{i=1}^{J}\frac{U_{0ij}}{p_j}F_j\sum_{n=1}^{N}\int_0^t\sin n\omega\tau\sin p_j(t-\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{7}$$

где U_{0ij} – i-я строка j-го собственного вектора системы,

F_j – j-я строка вектора $\left\{F_1\right\}$.

Интегралы, входящие в (7) легко вычисляются. При $t\le\tau_1$ если $n\omega\ne p$, то

$$\int_0^t\sin n\omega\tau\sin p(t-\tau)\mathrm{d}\tau=\frac{p\sin n\omega t-n\omega\sin pt}{p^2-(n\omega)^2},$$

если $n\omega=p$, то

$$\int_0^t\sin n\omega\tau\sin p(t-\tau)\mathrm{d}\tau=\frac{\sin pt}{2p}-\frac{t}{2}\cos pt.$$

При $t\ge\tau_1$ если $n\omega\ne p$, то

$$\int_0^t\sin n\omega\tau\sin p(t-\tau)\mathrm{d}\tau=\frac{n\omega\sin pt-p\sin n\omega\tau_1\cos p(t-\tau_1)-n\omega\cos n\omega\tau_1\sin p(t-\tau_1)}{(n\omega)^2-p^2}$$

если $n\omega=p$, то

$$\int_0^t\sin n\omega\tau\sin p(t-\tau)\mathrm{d}\tau=\frac{\sin p(2\tau_1-t)+\sin pt}{4p}-\frac{\tau_1}{2}\cos pt,$$

где τ_1 – продолжительность импульса.

Зная собственные векторы и функции времени, по формуле (3) получим узловые перемещения.

Литература

1. Колесников К. С. Динамика ракет. М. : Машиностроение, 2003. 520 с.
2. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле : М. : Машиностроение, 1985. 472 с.

Волков Володимир Петрович, д.т.н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Волкова Тетяна Вікторівна, к.т.н.,доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМОБІЛІВ

Автомобільний транспорт (АТ) є найважливішим сектором української економіки, який обслуговує практично всі галузі господарювання та верстви населення, сприяє зростанню мобільності та якості населення.

В даний час автомобільний парк України нараховує понад 10 млн. одиниць автомобілів, структура яких виглядає наступним чином [1]: вантажних автомобілів - 15,5%, автобусів - 2,6%, легкових автомобілів - 81,9%.

Основними системними проблемами АТ на сучасному етапі є [1, 2]:

- втрата адміністративних важелів управління АТ як повністю приватизованого;
- зниження обсягів транспортної роботи;
- збитковість діяльності пасажирського транспорту на автобусних маршрутах загального користування;
- масове старіння рухомого складу та невідпрацьованість механізмів його заміни;
- невідповідність структури вантажного і пасажирського парку попиту на його послуги;
- незадовільний рівень безпеки автомобільних перевезень і значне екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Технічна експлуатація автомобілів (ТЕА), як підсистема АТ знаходиться разом з автомобільною промисловістю на самому початку транспортного конвеєра, забезпечуючи АТ технічно справним рухомим складом (РС) потрібних техніко-експлуатаційних властивостей.

Від функціонування ТЕА в значній мірі залежить ефективність роботи АТ в цілому. Так якщо сфера виробництва забезпечує транспортний процес автомобілями потрібного типажу і якості, то ТЕА перетворює фізичну можливість, закладену в автомобіль проектувальниками, конструкторами, технологами і виробниками, в фактичну, забезпечуючи справність і працездатність автомобілів в процесі, наприклад, комерційного використання.