

задачах строительной механики летательных аппаратов. – М., Высшая школа, 1985. – 392 с. 3. *Andreev A.G., Scepkin A.W., Laugwitz F.* Untersuchung von Spannungen und Deformationen in Eisenbahnradern infolge induktiver Erwärmung bei der Montage. – Technische Mechanik, Bn. 15, H. 4 1995, S. 271-280. 4. *Никольская Э.Н., Гречищев Е.С., Герасимова А.К.* Исследование температурного и напряженного состояний цельнокатаного тепловозного колеса, Труды ВНИИ железнодорожного транспорта, 1970, **34**, 184-197.

*Поступила в редколлегию 08.04.02*

УДК 621.318.3.001.2

**А.Е.БОЖКО**, член-корреспондент НАН Украины; **К.Б.МЯГКОХЛЕБ**;  
ИПМаш НАН Украины

## **ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ**

У роботі пропонується резонансний метод ідентифікації параметрів коливальної системи. Як джерело вібрації використовується електромагнітний збудник вібрації. Розглядаються послідовно коливальну систему з одним ступенем волі і коливальну систему з двома ступенями волі.

В работе [1] предлагается резонансный метод идентификации параметров колебательной системы с двумя степенями свободы. Там же рассматривается колебательная система с одной степенью свободы. В качестве вибровозбудителя используется электродинамический вибростенд (ЭДВ). Однако такой ЭДВ не всегда находится в распоряжении исследователя. В то же время источником вибрации может быть электромагнитный вибровозбудитель (ЭМВ). Однако при использовании ЭМВ из-за нелинейных преобразований входных сигналов в вибрацию якоря (подвижной системы) [2], в указанный метод идентификации должно быть внесено ряд принципиальных коррективов. Остановимся более детально на последних. Рассмотрим последовательно колебательную систему с одной степенью свободы и колебательную систему с двумя степенями свободы.

Согласно выражению (2) из [1] тяговое усилие подвижной системы (якоря) ЭМВ должно иметь вид

$$F_{\Sigma} = F + \Delta m \frac{d^2 x}{dt^2} + \Delta b \frac{dx}{dt} + \Delta c x, \quad (1)$$

где  $F$  – тяговое усилие, создаваемое от действия ЭДС задающего генератора; остальные слагаемые в (1) получаются от действия отрицательных обратных связей;  $x$  – перемещение;  $t$  – время.

Уравнение движения якоря ЭМВ в этом случае имеет вид

$$(m + \Delta m) \frac{d^2 x}{dt^2} + (b + \Delta b) \frac{dx}{dt} + (c + \Delta c)x = F, \quad (2)$$

причем  $\Delta m, \Delta b, \Delta c$  – заданные величины.

Резонансная частота системы (2) равна

$$\omega_p = \sqrt{\frac{c + \Delta c}{m + \Delta m} - \frac{1}{2} \left( \frac{b + \Delta b}{m + \Delta m} \right)^2}. \quad (3)$$

Если менять значения  $\Delta m, \Delta b, \Delta c$ , то  $\omega_p$  также будет меняться.

Для определения параметров  $m, b, c$  необходимо получить три значения резонансной частоты  $\omega_{pk}, k = \overline{1,3}$  путем добавления  $\Delta c, \Delta m$  или  $\Delta b$  с использованием обратных связей  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  [3].

Формирование тягового усилия  $F$  [см. (2)] и перемещения  $x$  более просто можно осуществить электромагнитным возбудителем вибрации (ЭМВ). Однако в этом случае важно учесть тонкости преобразования сигнала задающего генератора  $U_{\Gamma} = U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  – амплитуда;  $\omega$  – круговая частота, в тяговое усилие  $F$ .

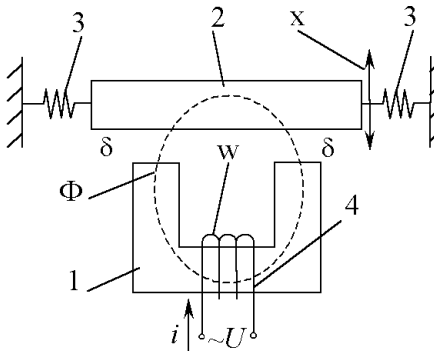


Рис. 1.

Рассмотрим эти преобразования и учтем их при создании тягового усилия  $F$ . Для наглядности приведем схему ЭМВ рис. 1. На этой схеме такие обозначения:

- 1 – магнитопровод;
- 2 – якорь;
- 3 – пружины;
- 4 – электрическая обмотка с током  $i$ ;
- $U$  – входное напряжение;
- $w$  – число витков обмотки 4;
- $\Phi$  – магнитный поток;
- $\delta$  – воздушные зазоры.

Известно [4], что в ЭМВ

$$F = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздушного зазора  $\delta$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения полюсов магнитопровода у зазора  $\delta$ .

Если учесть закон полного тока  $iw = \Phi/G$ , закон Ома

$$i = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad \text{где } G = \frac{\mu_0 S}{2\delta} \text{ – магнитная проводимость ЭМВ; } z, R, L \text{ –}$$

полное активное сопротивление, индуктивность обмотки 4 соответственно, то тогда (4) запишем в виде

$$F = \frac{U^2 L}{2\delta [R^2 + (\omega L)^2]}. \quad (5)$$

Здесь учитывается выражение  $L = w^2 G$  [3]. Обычно  $\omega L \gg R$ . Поэтому

$$F = \frac{U^2}{2\delta L \omega^2}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что  $F$  – величина нелинейная ( $U^2$ ) и обратно пропорциональна  $\omega^2$  и  $2\delta L$ . Подобная нелинейность в ЭМВ проявляется и для сигналов обратных связей  $\Delta m \frac{d^2 x}{dt^2}$ ,  $\Delta b \frac{dx}{dt}$ ,  $\Delta c x$ , хотя по идее метода идентификации [1] нелинейностей не должно быть (см. [1] и выражение (1)).

Предлагается следующая процедура и структура избавления от проведенной нелинейности и обратно пропорциональной зависимости  $U$  от  $2\delta L \omega^2$ .

Для этого дважды продифференцируем выходной сигнал задающего генератора  $\Gamma$  и выходные сигналы звеньев обратных связей. В результате получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U_\Gamma}{dt^2} &= -\omega^2 U_m \sin \omega t & (7) \\ \Delta m \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{d^2 x}{dt^2} \right) &= -\Delta m \omega^4 x_m \sin \omega t \\ \Delta b \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{dx}{dt} \right) &= -\Delta b \omega^3 x_m \cos \omega t \\ \Delta c \frac{d^2}{dt^2} &= -\Delta c \omega^2 x_m \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Все сигналы (7) и (8) складываем и затем пропускаем через усилитель с нечетным числом каскадов с коэффициентом усиления  $2\delta L$ .

Суммарный сигнал пропускаем через звено извлечения квадратного корня и получаем сигнал

$$U = \sqrt{2\delta L \omega^2 \left( U_m \sin \omega t + \Delta m \frac{d^2 x}{dt^2} + \Delta b \frac{dx}{dt} + \Delta c x \right)}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (6), получим

$$F = U_m \sin \omega t + \Delta m \frac{d^2 x}{dt^2} + \Delta b \frac{dx}{dt} + \Delta c x. \quad (10)$$

Как видим (10) – это (1), то есть произошла линеаризация в ЭМВ и теперь легко можно осуществить идентификацию параметров  $m$ ,  $b$ ,  $c$ , пользуясь резонансными частотами (3) на основе метода, представленного в работе [1].

Структура такого преобразования в ЭМВ представлена на рис. 2,

где  $\Gamma$  – генератор;  $\Sigma$  – сумматор;  $>$  – усилитель;  $\frac{d^2}{dt^2}$  – двойной дифференциатор; ЭМВ – вибровозбудитель;  $\sqrt{\quad}$  – звено извлечения квадратного корня; ВД – вибродатчик;  $\int$  – интегратор;  $\Delta m$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  – звенья масштабные.

Такая схема достаточно обеспечивает линейризацию тягового усилия ЭМВ.

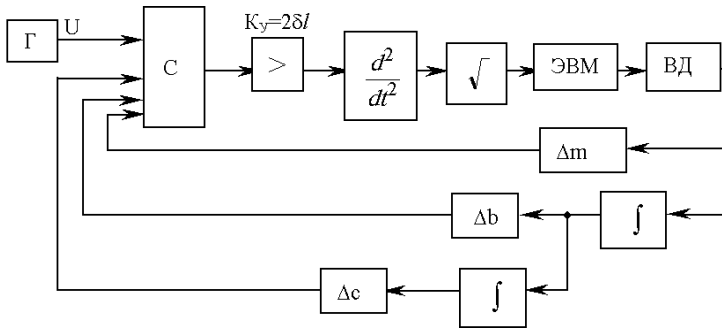


Рис.2

**Список литературы:** 1. Божко А.Е., Иванова З.А., Личкатый Е.А. Резонансный метод идентификации параметров колебательной системы с двумя степенями свободы. // Проблемы машиностроения, 2000. – Т 3-4. – С. 56-61. 2. Божко А.Е., Белых В.И., Мякохлеб К.Б. Улучшение функциональных возможностей электромагнитных вибростендов. // Доповіді НАН України, 2001. – № 10. – С. 100-103. 3. Божко А.Е. О формировании управления электромагнитными вибровозбудителями. // Доповіді НАН України, 2002. – № 2. – С. 99-102. 4. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989.

*Поступила в редколлегию 20.04.02*

УДК 539.3

**С.В.БОНДАРЬ**, канд.техн.наук, **Д.В.ЛАВИНСКИЙ**, канд.техн.наук

### **КОНТАКТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ОПЕРТОЙ НА РАДИАЛЬНОЕ КОЛЬЦО**

Проведено моделювання контактної взаємодії циліндричної оболонки із радіальним кільцем. Надано порівняння результатів чисельного рішення методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу SPACE-T з даними аналітичного рішення.

Технологические операции по изготовлению различных деталей, основанные на способности металлов пластически деформироваться, нашли широкое применение в различных отраслях современной промышленности. Помимо традиционных методов обработки металлов давлением (ОМД), в которых деформирование осуществляется путем контакта заготовки и пуансона, все более популярными становятся “бесконтактные” методы. Такие методы должны применяться, когда недопустимым является загрязнение поверхности обрабатываемой заготовки чужеродными примесями. К “бесконтактным” от-