

Research of electrical power system based on inductive communication channel of telemetry system for temperature measurement of piston in internal combustion engine

The structure of contactless electric power supply system of converter as a part of the telemetric system of internal combustion engines and the results of its research are presented in this article.

Keywords: internal combustion engine piston, contactless electrical power system, resonance, inductive communication channel

Получено: 03.04.13

УДК 539.3+534.1

В. П. Тарануха, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИСКОВОГО УСТРОЙСТВА ЗАПИСИ-ЧТЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

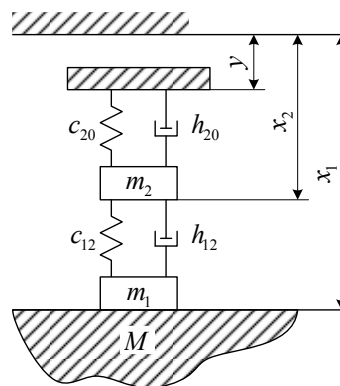
Исследуется динамика основного механического узла устройства резервного копирования: динамическая система – магнитный диск – контактная магнитная головка – упругий держатель головки. Приводится методика идентификации оптимальных механических параметров системы по отношению к поперечным колебаниям диска методом наименьших квадратов.

Ключевые слова: дисковое устройство, механические параметры, инфокоммуникационная система

Статья посвящена исследованию основной механической части устройства резервного копирования (УРК) – динамической системе магнитный диск – контактная магнитная головка – упругий держатель головки. Эта система в теоретическом и экспериментальном, а также в конструктивном и производственном отношении представляет наибольшую сложность в УРК и в настоящее время недостаточно изучена.

В случае контактной магнитной записи магнитная связь между носителем записи и магнитными головками проявляется более сильно. Это позволяет запись и воспроизведение информации вести на более высоких частотах и с большей поперечной и продольной плотностью. В этом неоспоримое преимущество контактной магнитной записи. Обычно контактная магнитная запись применяется для носителей информации, движущихся с линейными скоростями, не превышающими 20 м/с [1]. При больших линейных скоростях магнитные головки и носители информации сильно изнашиваются и быстро выходят из строя. С другой стороны, нельзя допускать отрыва магнитной головки от носителя информации, так как это приводит к искажениям записываемой и воспроизводимой информации. Для совмещения этих противоречивых требований – постоянного контакта головки и магнитного диска и минимальной силы трения между ними – система «диск – головка» должна быть оптимальной в данном смысле. В большинстве случаев конструкторы к решению этой проблемы подходят интуитивно, подбирая конструкции опытным путем. Такой подход объясняется большой сложностью вопроса, так как рассматриваемая система является многомерной нелинейной с распределенными параметрами, подвергаемой случайным возмущением. Аналитическое исследование при помощи дифференциальных

уравнений столь сложной системы затруднено. В качестве первого приближения предлагается реальную систему диск – контактная головка – упругий держатель аппроксимировать линейной динамической многомерной моделью с сосредоточенными параметрами (рис. 1).



Упрощенная динамическая модель системы контактная головка – диск

По отношению к основному виду возмущений – поперечным колебаниям диска – колебательное движение системы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + h_{12} \dot{x}_1 + c_{12} x_1 - h_{12} \dot{x}_2 - c_{12} x_2 &= f_{12}, \\ -h_{12} \dot{x}_1 - c_{12} x_1 + m_2 \ddot{x}_2 + (h_{12} + h_{20}) \dot{x}_2 + (c_{12} + c_{20}) x_2 &= \\ &= h_{20} \dot{y} + c_{20} y + f_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_1 , m_2 – приведенные массы головки и держателя; h_{12} , h_{20} – приведенные коэффициенты сопротивления; c_{12} , c_{20} – приведенные коэффициенты

упругостей пружин; x_1, x_2 – колебания приведенных масс – случайные функции времени t ; $y(t)$ – внешнее возмущение – случайные колебания корпуса держателя; f_1, f_2 – постоянные, характеризующие усилие предварительного прижима головки к поверхности диска.

Как показано на рисунке, перемещения $x_1(t), x_2(t), y(t)$ измеряются, начиная от общей базы. Однако массы колеблются около некоторого положения, совпадающего по значению с математическим ожиданием для соответствующего колебательного процесса. Допущение же, что математическое ожидание $m = 0$ не ограничивает общности задачи, так как, если бы это условие не выполнялось, всегда можно перейти от случайной функции $x(t)$ к ее отклонению от математического ожидания $x(t) - m_x$, для которого все последующие рассуждения остаются в силе. На основании этого без ущерба для общности описания системы дифференциальные уравнения (1) можно рассматривать при нулевых начальных условиях.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований показали, что при нормальной работе устройства входные и выходные сигналы можно рассматривать как стационарные случайные процессы, удовлетворяющие эргодическую гипотезу [2].

Рассмотрим случай, когда пара головка – диск работает без отрыва. Головка при этом повторяет колебательный процесс, совершаемый участками диска, проходящими мимо головки, т. е. выход системы $x_1(t)$ совпадает с поперечными колебаниями диска на соответствующем диаметре. Для идентификации оптимальных механических параметров рассматриваемой системы при этих условиях необходимо установить математическую связь между входом $y(t)$ и выходом $x_1(t)$. Воспользуемся динамической моделью системы головка – диск и системой дифференциальных уравнений (1). Дифференциальные уравнения дают исчерпывающую информацию о характере поведения системы в любых условиях. Поэтому естественно отождествлять физическую систему с ее математической моделью, считая систему заданной при наличии дифференциальных уравнений ее движения. Однако характеристики «вход-выход» в общем случае, полученные при нулевых начальных условиях, могут не отражать некоторых динамических особенностей системы, хотя они и определяются системой дифференциальных уравнений. Связь между системой дифференциальных уравнений и передаточной или весовой матрицами не является взаимно однозначной: одни и те же весовые или передаточные матрицы могут соответствовать различным дифференциальным уравнениям. Передаточная матрица отражает все свойства системы и является исчерпывающей характеристикой лишь в том случае, если динамическая система полностью управляема и наблюдаема. Рассматривать вопросы управляемости

и наблюдаемости в динамической системе удобнее всего, пользуясь описанием системы в терминах пространства состояний, т. е. записывая уравнения движения системы (1) в виде

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = Az + By, \\ x = Cz \end{cases},$$

где z – вектор состояния с компонентами z_1, z_2, \dots, z_n ; A, B, C – числовые матрицы размерами соответственно $N \times N, N \times n, n \times N$; N – порядок системы;

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{c_{12}}{m_1} & \frac{c_{12}}{m_2} \\ 0 & 0 & \frac{c_{12}}{m_1} & -\frac{c_{12} - c_{20}}{m_2} \\ 1 & 0 & -\frac{h_{12}}{m_1} & \frac{h_{12}}{m_2} \\ 0 & 1 & \frac{h_{12}}{m_1} & -\frac{h_{12} + h_{20}}{m_2} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & f_1 \\ c_{20} & f_2 \\ 0 & 0 \\ h_{20} & 0 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_2} \end{pmatrix}.$$

Динамическая система, описываемая системой уравнений в пространстве состояний (2), является полностью управляемой, если клеточная матрица

$$U = (B, AB, A^2B, \dots, A^{N-1}B), \quad (4)$$

и наблюдаемой, если матрица

$$V = (C', A'C', (A')^2C', \dots, (A')^{N-1}C') \quad (5)$$

имеют ранг N , где C' и A' – транспонированные матрицы для матриц C и A .

Нетрудно показать, что ранг матриц U и V равен порядку системы, следовательно, передаточная матрица отражает все ее свойства. Записав уравнения движения системы (1) в операционном виде при нулевых начальных условиях, получим выражение передаточной матрицы системы $G(p)$:

$$G(p) = Q^{-1}(p)P(p) = \frac{1}{|Q(p)|} \tilde{Q}(p)P(p), \quad (6)$$

где

$$Q(p) = \begin{pmatrix} m_1 p^2 + h_{12} p + c_{12} & -(h_{12} p + c_{12}) \\ (-h_{12} p + c_{12}) & m_2 p^2 + (h_{12} + h_{20}) p + c_{12} + c_{20} \end{pmatrix};$$

$$P(p) = \begin{pmatrix} 0 & f_1 \\ h_{20} p + c_{20} & f_2 \end{pmatrix};$$

$\tilde{Q}(p)$ – присоединенная матрица для матрицы $Q(p)$; $|Q(p)|$ – определитель матрицы $Q(p)$.

Далее можно решать обратную задачу, т. е. определить дифференциальные уравнения многомерной системы по известной передаточной матрице. С целью получения единственного решения задачи идентификации многомерной динамической системы по известной передаточной матрице будем разыскивать систему с наименьшим порядком дифференциальных уравнений при заданной передаточной матрице. Если это условие не выполняется, в системе могут появиться произвольные неуправляемые и ненаблюдаемые части.

Существует несколько методов решения задачи идентификации многомерной системы по передаточной матрице. Применим метод, основанный на приведении передаточной матрицы в диагональную форму. Путем элементарных преобразований квадратную неособую матрицу (6) сводим к канонической диагональной:

$$G(p) = S(p) \text{diag} \left\{ \frac{1}{|Q(p)|}, 1 \right\} T(p), \quad (7)$$

где

$$S(p) = \begin{pmatrix} m_1 p^2 + h_{12} p + c_{12} & 1 \\ -(h_{21} p + c_{12}) & 0 \end{pmatrix};$$

$$T(p) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{m_2 p^2 + (h_{12} + h_{20}) p + c_{12} + c_{20}}{h_{12} p + c_{12}} \\ 0 & \frac{1}{h_{12} p + c_{12}} \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} 0 & f_1 \\ h_{20} p + c_{20} & f_2 \end{pmatrix}.$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение четвертого порядка, которое выражает связь между входом системы $y(t)$ – внешним возмущением корпуса держателя головки и выходом системы $x_1(t)$ – колебанием головки. Составляющая $x_2(t)$, непосредственно измерить которую очень трудно, в ходе преобразований исключена.

При определении параметров динамической системы в режиме ее функционирования непосредственная дифференциальная связь между входными и выходными сигналами может иметь весьма ограниченное применение из-за больших трудностей вычислений, связанных со случайной формой сигналов и сложностью их аппроксимации аналитическими выражениями [3]. Следовательно, уравнения необходимо преобразовать с таким расчетом, чтобы вместо случайных сигналов в них фигурировали их хорошо аналитически аппроксимируемые характеристики. В качестве таких характеристик обычно выбирают корреляционные функции или спектральные плотно-

сти. В рассматриваемом случае удобнее использовать корреляционные функции. Умножив левую и правую части уравнения на $y(t + \tau)$, усреднив по времени и приняв математическое ожидание равным нулю, получим следующее дифференциальное уравнение для корреляционных функций:

$$a_1 \ddot{K}_{x_1 y}(\tau) + a_2 \ddot{K}_{x_1 y}(\tau) + a_3 \dot{K}_{x_1 y}(\tau) + a_4 \dot{K}_{x_1 y}(\tau) + K_{x_1 y}(\tau) - a_5 \ddot{K}_y(\tau) - a_4 \dot{K}_y(\tau) = K_y(\tau), \quad (8)$$

где

$$a_1 = \frac{m_1 m_2}{c_{12} c_{20}}; \quad a_2 = \frac{h_{12} (m_1 + m_2) + h_{20} m_1}{c_{12} c_{20}};$$

$$a_3 = \frac{m_1 + m_2}{c_{20}} + \frac{m_1}{m_2} + \frac{h_{12} h_{20}}{c_{12} c_{20}};$$

$$a_4 = \frac{h_{12} c_{20} + c_{12} h_{20}}{c_{12} c_{20}}; \quad a_5 = \frac{h_{12} h_{20}}{c_{12} c_{20}};$$

$K_y(\tau)$ – корреляционная функция входного сигнала;

$K_{x_1 y}(\tau)$ – взаимная корреляционная функция.

Задача, таким образом, сводится к отысканию коэффициентов системы a_i по известным в M точках значениям корреляционных функций $K_{x_1 y}(\tau)$ и $K_y(\tau)$ и их производным при условии, если отклонение корреляционной функции $K_y(\tau)$ (полученной из уравнения (8) в результате замены функций $K_{x_1 y}^{(i)}(\tau)$ и $K_{x_1 y}^{(j)}(\tau)$ их измеренными случайными значениями, в точке m) от значений той же величины, полученной в результате решения уравнения по методу наименьших квадратов в той же точке и равной $\bar{K}_y(\tau_m)$, будет минимальным. Другими словами, должна быть минимальной величина ε_m , определяемая выражением

$$\varepsilon_m = a_1 \ddot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + a_2 \ddot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + a_3 \dot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + a_4 \dot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + K_{x_1 y}(\tau_m) - a_5 \ddot{K}_y(\tau_m) - a_4 \dot{K}_y(\tau_m) - \bar{K}_y(\tau_m). \quad (10)$$

За меру отклонения принимаем сумму квадратов отклонений ε_m и, согласно методу наименьших квадратов, наилучшими коэффициентами считаем те, для которых сумма квадратов отклонений

$$S(a_1, \dots, a_5) = \sum_{m=1}^N \begin{bmatrix} a_1 \ddot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + a_2 \ddot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + \\ + a_3 \dot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + a_4 \dot{K}_{x_1 y}(\tau_m) + \\ + K_{x_1 y}(\tau_m) - a_5 \ddot{K}_y(\tau_m) - \\ - a_4 \dot{K}_y(\tau_m) - \bar{K}_y(\tau_m) \end{bmatrix} \quad (11)$$

является минимальной. Отсюда, используя необходимые условия экстремума функции нескольких переменных, получаем так называемую нормальную систему для определения коэффициентов a_i ($i = 1, 2, \dots, 5$):

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_3} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_4} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_5} = 0. \quad (12)$$

Если система (12) имеет единственное решение, то оно будет искомым. Система уравнений, составленная для всех моментов фиксации, является переопределенной, так как число моментов фиксации входных и выходных сигналов на входах и выходах изучаемого объекта значительно превышает число определяемых параметров a_i . Как показано в работе [4], чем длительнее время испытания, тем точнее определяются параметры объекта. Преобразуем систему (12):

$$\begin{aligned} & [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_1 + [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_2 + [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_3 + \\ & + \left\{ [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_{x_1y}] - [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] \right\} a_4 - [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] a_5 = \\ & = [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] - [\ddot{K}_{x_1y} K_{x_1y}]; \\ & [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_1 + [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_2 + [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_3 + \\ & + \left\{ [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_{x_1y}] - [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] \right\} a_4 - [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] a_5 = \\ & = [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] - [\ddot{K}_{x_1y} K_{x_1y}]; \\ & [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_1 + [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_2 + [\ddot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_3 + \\ & + \left\{ [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_{x_1y}] - [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] \right\} a_4 - [\ddot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] a_5 = \\ & = [\ddot{K}_{x_1y} K_y] - [\ddot{K}_{x_1y} K_{x_1y}]; \\ & [\dot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_1 + [\dot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_2 + [\dot{K}_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_3 + \\ & + \left\{ [\dot{K}_{x_1y} \dot{K}_{x_1y}] - [\dot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] \right\} a_4 - [\dot{K}_{x_1y} \dot{K}_y] a_5 = \\ & = [\dot{K}_{x_1y} K_y] - [\dot{K}_{x_1y} K_{x_1y}]; \\ & [K_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_1 + [K_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_2 + [K_{x_1y} \ddot{K}_{x_1y}] a_3 + \\ & + \left\{ [K_{x_1y} \dot{K}_{x_1y}] - [K_{x_1y} \dot{K}_y] \right\} a_4 - [K_{x_1y} \dot{K}_y] a_5 = \\ & = [K_{x_1y} K_y] - [K_{x_1y} K_{x_1y}]. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь квадратичными скобками обозначены суммы:

$$\begin{aligned} [K_{x_1y}^{(i)} K_{x_1y}^{(j)}] &= \sum_{m=1}^M K_{x_1y}^{(i)}(\tau_m) K_{x_1y}^{(j)}(\tau_m); \\ [K_{x_1y}^{(i)} K_y^{(j)}] &= \sum_{m=1}^M K_{x_1y}^{(i)}(\tau_m) K_y^{(j)}(\tau_m); \end{aligned}$$

$$[K_y^{(i)} K_{x_1y}^{(j)}] = \sum_{m=1}^M K_y^{(i)}(\tau_m) K_{x_1y}^{(j)}(\tau_m); \quad (14)$$

$$[K_y^{(i)} K_y^{(j)}] = \sum_{m=1}^M K_y^{(i)}(\tau_m) K_y^{(j)}(\tau_m);$$

$$[K_{x_1y}^{(i)} K_{x_1y}^{(i)}] = \sum_{m=1}^M [K_{x_1y}^{(i)}(\tau_m)]^2;$$

$$[K_y^{(j)} K_y^{(j)}] = \sum_{m=1}^M [K_y^{(j)}(\tau_m)]^2,$$

где $j = 0, 1, 2$; $i = 0, 1, 2, 3, 4$; M – число дискретных значений коррелятивных функций.

Таким образом, рассмотрено определение параметров дифференциальных уравнений, описывающих поведения динамической системы, по изменениям, полученным при нормальной эксплуатации объекта. В этих условиях возмущения и шумы, неизбежно сопутствующие любому эксперименту, не позволяют точно определить сигналы на входе и выходе системы и, следовательно, установить точные значения параметров. По этой причине оценки параметров, полученные в результате опыта, являются случайными величинами. Следовательно, необходимо определить их точность.

Для определения точности полученных оценок [5] по результатам опыта необходимо рассчитать среднее квадратическое отклонение S (11) и определитель корреляционной матрицы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{15} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{51} & A_{52} & \dots & A_{55} \end{vmatrix}, \quad (15)$$

где буквами A_{ij} обозначены соответствующие выражения, стоящие в левой части уравнений (13) при искомым параметрах a_i .

Определение Δ в развернутом виде здесь не приводится из-за громоздкости выражения.

Оценкой дисперсии оценки коэффициентов a_i служит величина

$$S_i = \frac{S}{M-5} \left| \frac{\Delta_i}{\Delta} \right|,$$

где Δ_i – минор определителя (15), полученный при вычеркивании i -й строки и j -го столбца.

Численный пример реализован для УРК. Корреляционные функции аппроксимированы суммами затухающих косинусов, имеющих производные до необходимого порядка. Задача решалась на компьютере типа «Пентиум-4». Принимая во внимание выражения (9), можно определить оптимальные механические параметры m , c , h , f при известных a_i ($i = 1 \div 5$).

Библиографические ссылки

1. *Фадеев Н. И.* Технология производства узлов электронных вычислительных машин. – М. : Машиностроение, 1967. – 312 с.
2. *Катковник В. Я., Полуэтков Р. А.* Многомерные дискретные системы управления. – М. : Наука, 1966. – 416 с.
3. *Гельфандбейн Я. А.* Методы кибернетической диагностики динамических систем. – Рига : Зинатне, 1967. – 542 с.
4. *Виленкин С. Я.* Статистические методы исследования систем автоматического регулирования. – М. : Совет. радио, 1967. – 200 с.
5. *Романовский В. И.* Основные задачи теории ошибок. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1947. – 116 с.

* * *

V. P. Taranukha, PhD in Engineering, Associate professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Identification of parameters of disk write-read device of info-communication system

The dynamics of the main mechanical unit of the backup device is investigated: dynamic system – magnetic disk – contact magnetic head – elastic head holder. The method is presented for identifying optimal mechanical parameters of the system with respect to the transverse vibrations of the disk by least squares method.

Keywords: disk device, mechanical properties, info-communication system

Получено: 11.04.13

УДК 539.3+534.1

В. П. Тарануха, кандидат технических наук, доцент;
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
О. А. Бирюкова, кандидат технических наук, ведущий инженер
Филиал в Удмуртской Республике ОАО «Ростелеком – Волга»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАССЕЙЯНИЯ ЭНЕРГИИ В МАТЕРИАЛЕ ДИСКА УСТРОЙСТВА РЕЗЕРВНОГО КОПИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Исследовано изменение логарифмического декремента колебаний тонкой изотропной пластинки в зависимости от формы колебаний. Рассматривается пластинка с центральным отверстием, жестко заземленная по внутреннему контуру. Принята форма колебаний с узловыми диаметрами. Для определения логарифмического декремента конструкции применен метод средних напряжений. Построены графики изменения логарифмического декремента. Установлено, что демпфирующие свойства пластинки при повышении порядка формы колебаний снижаются.

Ключевые слова: дисковое устройство, телекоммуникационные системы, рассеяние энергии

При решении задач динамики деформируемых тел механические системы могут быть разделены на две основные группы: системы, в которых решающими факторами являются прочность и устойчивость, и системы, в которых доминирует проблема точности. Механические системы первой группы обычно отмечаются высоким уровнем напряжений. Особенностью систем второй группы является то, что малые напряжения, далекие от предела упругости, вызывают недопустимые «микродеформации». Так, например, деформации, измеряемые микронами, вызывают недопустимые детонации в устройствах звукозаписи, уменьшают плотность записи и скорость выборки информации в устройствах резервного копирования.

Ряд систем второй группы отличается быстротходностью. В связи с этим в определенных режимах работы таких систем наблюдаются высшие формы колебаний. Как указано в [1], наличие высших форм колебаний изменяет характер напряженного состояния, что влечет за собой изменение демпфирующих свойств системы в целом. Это, в свою очередь, приводит к изменению резонансных амплитуд и, следо-

вательно, максимальных напряжений, возникающих в системе.

Настоящая работа посвящается определению зависимости поглощающих свойств от формы колебаний магнитного диска устройства резервного копирования информации.

Исходные предположения и основные уравнения

Магнитный диск рассматривается как круглая тонкая пластинка из изотропного материала. В основу исследования положены следующие допущения:

- 1) пластинка подчиняется гипотезе Кирхгофа – Лява;
- 2) форма резонансных колебаний конструкции с учетом демпфирования не отличается от формы, определяемой при той же частоте без учета демпфирования («правило Видлера»);
- 3) энергия, рассеиваемая за цикл в единице объема данного материала, зависит только от амплитудного значения напряжений;
- 4) рассеяние энергии в единице объема материала, подверженного одновременно циклическому дей-