

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО  
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ

АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. С. П. КОРОЛЕВА

# **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Лабораторные работы*

Утвержден редакционным  
советом института 7/IV-76 г.

Настоящее издание, состоящее из двух частей «Динамика элементов и узлов роторов двигателей летательных аппаратов» и «Методы исследования динамических свойств элементов двигателей летательных аппаратов», подготовлено *А. И. Белоусовым, В. Н. Бузицким, В. П. Ивачовым, Е. А. Паниным, Д. Ф. Пичугиным Д. Е. Чегодаевым.*

Рецензент доцент *М. К. Сидоренко*

## ОСНОВЫ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ. ДИНАМИЧЕСКАЯ ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Цель работы: знакомство с методами измерения относительных деформаций (напряжений) с помощью проволочных датчиков (тензометров) сопротивления, а также с тарировкой тензометрической аппаратуры. Доводка различного типа машин и устройств требует определения величин деформаций и напряжений в деталях при работе. Оценка напряжений (деформаций) может производиться теоретически и экспериментально. Для экспериментального исследования напряжений в настоящее время широко используется метод проволочной тензометрии [1], [2].

### НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИИ

Действие проволочных датчиков основано на изменении омического сопротивления проводников при упругих деформациях растяжения и сжатия. Изменение сопротивления проводника является следствием изменения геометрических размеров и сопротивления материала при деформации. Проволочный датчик (рис. 1) представляет собой несколько плоских петель из круглой проволоки 3 диаметром 0,015—0,06 мм, наклеенных на бумажную подложку 4 толщиной 0,02—0,05 мм, употребляемую в качестве основания и изоляции. Концы проволоки 2 припаиваются или привариваются к выводам 1, изготовленным из более толстого проводника. Датчик наклеивается на очищенную шкуркой и обезжиренную поверхность исследуемой детали. При нормальной и отрицательной рабочей температуре применяют клей — целлулоидный, БФ-2, БФ-4; при повышенной температуре — специальные клеи или цементы.

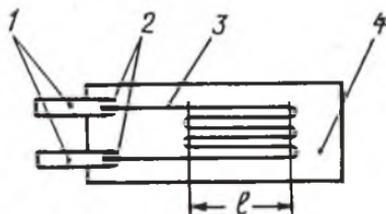


Рис. 1. Схема проволочного тензометрического датчика: 1 — выводы; 2 — место пайки (сварки); 3 — проволока; 4 — бумажная подложка

Деформация детали на величину  $\Delta l$  сопровождается деформацией датчика также на  $\Delta l$ , что приводит к изменению его омического сопротивления на величину  $\Delta R_D$ , которая зависит от на-

чального сопротивления  $R_d$  и относительной деформации  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  датчика:

$$\Delta R_d = S R_{d\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $S$  — коэффициент тензочувствительности.

Основными характеристиками датчиков являются база, начальное сопротивление и коэффициент тензочувствительности. Размер  $l$  (рис. 1) называется базой датчика. Обычно датчики имеют базу 5, 10, 15, 20 мм. Для более точного замера при больших градиентах относительных деформаций желательно выбирать датчики с меньшей базой. Однако их изготовление более сложное. В настоящее время известны датчики с минимальной базой 2,5—3,5 мм.

Датчики изготавливаются партиями. Партией считаются датчики, изготовленные на одном станке, из проволоки, взятой из одной катушки, с применением одной и той же партии клея. Датчики каждой партии разбиваются на группы. В группе разброс сопротивлений датчиков не должен превышать 1—2%. Для каждой группы определяют средний коэффициент тензочувствительности по 5—10% датчиков (но не менее 5 штук) от общего числа входящих в группу. Если разброс тензочувствительности этих датчиков не превышает  $\pm 2\%$ , то значение их средней тензочувствительности приписывается всей группе.

Коэффициент тензочувствительности представляет собой отношение относительного изменения сопротивления  $\frac{\Delta R_d}{R_d}$  к относительной деформации  $\varepsilon$  датчика:

$$S = \frac{\frac{\Delta R_d}{R_d}}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Значение  $S$  для таких материалов, как нихром, константан, хромель и манганин, наиболее часто употребляемых для изготовления датчиков, около 2.

К остальным характеристикам датчиков относятся ширина датчика, коэффициент поперечной тензочувствительности, сопротивление изоляции и температурное приращение сопротивления. Работоспособность наклеенных датчиков зависит также от влагостойкости и ползучести. Ползучесть характеризуется постепенным уменьшением воспринимаемой датчиком деформации при постоянном значении деформации детали. Датчики должны быть механически прочными и иметь по возможности наибольшее значение коэффициента тензочувствительности и удельного сопротивления, наименьшие значения температурного коэффициента сопротивления и термо-ЭДС проволоки в паре с медью (в случае, когда выводы, припаяваемые к проволоке датчика, сделаны из меди).

Таким образом, задача измерения относительной деформации (напряжения) детали при известных  $S$  и  $R_d$  сводится к определению изменения его сопротивления  $\Delta R_d$ . Имеется несколько способов регистрации изменения омического сопротивления датчика, включенного в электрическую схему.

Рассмотрим основные из них.

### Мостовая схема

Мост (рис. 2) составлен из четырех сопротивлений, среди которых:

$R_d$  — сопротивление рабочего датчика,

$R_2$  — переменное сопротивление,

$R_3, R_4$  — постоянные сопротивления.

К одной из диагоналей моста подведено постоянное напряжение  $V$ , а к другой измерительной диагонали подключен гальванометр  $I$ .

До деформации датчика мост балансируют с помощью переменного сопротивления  $R_2$  и добиваются отсутствия тока в диагонали с гальванометром.

Ток отсутствует, если

$$R_2 R_4 = R_d R_3. \quad (3)$$

Вследствие деформации датчика его сопротивление изменится, что повлечет за собой пропорциональное изменение тока в измерительной диагонали. Для моста при  $R_d \approx R_4$  и  $R_2 \approx R_3$

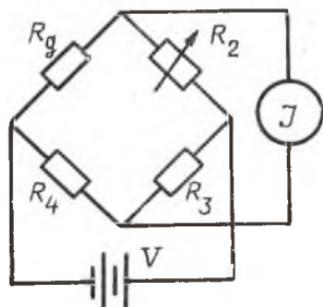


Рис. 2. Мостовая схема включения датчика

$$I = \frac{V}{2(R_1 + R_3)} \frac{\Delta R_1}{R_1}. \quad (4)$$

Сопротивление датчика изменяется не только при деформации детали, но также и при изменении его температуры. Поэтому возникает необходимость температурной компенсации. Для этого в качестве сопротивления  $R_4$  применяется компенсационный датчик, который выбирается из числа рабочих датчиков. Компенсационный датчик наклеивается на отдельную ненапряженную пластину из материала детали и находится в температурных условиях рабочего датчика.

Тогда при изменении температуры сопротивление основного и компенсационного датчиков изменяется на одну и ту же величину, и балансировка моста не нарушается.

Преимуществом рассмотренной схемы является ее простота и отсутствие специальной усилительной аппаратуры. Однако

для увеличения точности замера необходимо применять гальванометр с большой чувствительностью, а возможность регистрации переменных деформаций зависит от его механической инерционности.

### Мостовая схема на несущей частоте

Включение датчика в мостовую схему на несущей частоте показано на рис. 3. Одна диагональ моста питается переменным током несущей частоты с напряжением  $V$ . Изменение сопротивления  $\Delta R_d$  датчика влечет за собой разбаланс моста. Поэтому на другой диагонали появляется модулированный ток  $I$ , который усиливается до значения 2.

Для получения процесса, в котором учитывался бы знак деформации датчика (растяжение — сжатие), необходимо осуществлять выпрямление тока 2 с помощью фазочувствительного детектора, который с изменением фазы несущей частоты изме-

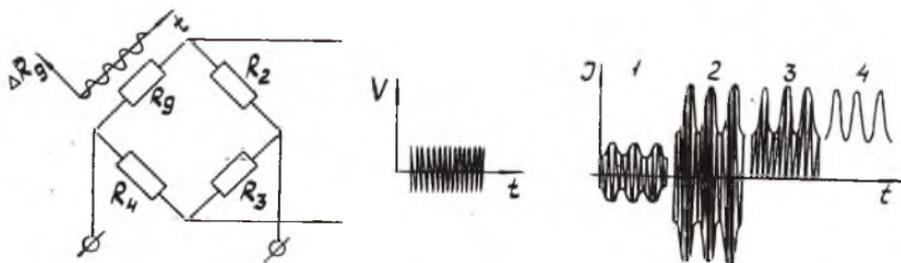


Рис. 3. Мостовая схема на несущей частоте

няет полярность пропускаемого сигнала. Ток после фазочувствительного детектора приобретает вид 3. После фильтра, задерживающего несущую частоту, ток 3 будет соответствовать форме измеряемой деформации.

Рассмотренная схема применяется для измерений как статических, так и переменных деформаций.

Недостаток схемы заключается в том, что частота регистрируемого процесса ограничена величиной несущей частоты, которая должна быть значительно (не менее чем в 8—10 раз) выше регистрируемой.

Обычно несущая частота равна 3,5—7 кГц.

### Потенциометрическая схема

В настоящее время широко используется потенциометрическая схема (рис. 4) включения датчика в измерительную аппаратуру. Эта схема позволяет производить измерение только дина-

мических процессов в широком диапазоне частот (от 20—30 Гц до 15 кГц).

Датчик  $R_d$  и последовательно соединенное с ним добавочное сопротивление  $R_2$  питаются от источника постоянного тока

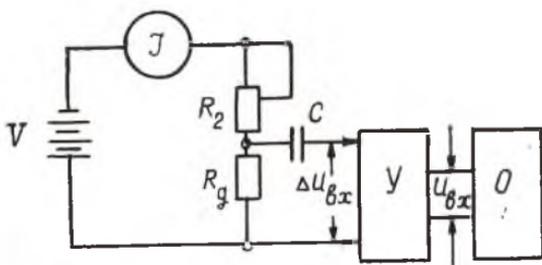


Рис. 4. Потенциометрическая схема включения датчика

напряжением  $V$ . Вследствие изменения сопротивления датчика на нем возникает переменное напряжение

$$\Delta U_{\text{вх}} = I \frac{\Delta R_d R_2}{R_d + R_2}, \quad (5)$$

которое подается через конденсатор «С» на вход усилительной аппаратуры «У» и далее на регистрирующий прибор «О» (например, осциллограф или вольтметр). Контроль за величиной тока осуществляется по миллиамперметру  $I$ , а регулировка тока производится переменным сопротивлением  $R_2$ .

#### ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ПО ИЗВЕСТНЫМ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКА И КОЭФФИЦИЕНТУ УСИЛЕНИЯ (НЕПРЯМАЯ ТАРИРОВКА)

Тарировка тензометрической аппаратуры сводится к нахождению зависимости между амплитудой механического напряжения (относительной деформации) детали в месте наклейки датчика и амплитудой выходного сигнала усилительной аппаратуры при данной частоте динамического процесса. Найдем эту зависимость для датчика, включенного в усилительную аппаратуру по потенциометрической схеме.

Механические напряжения растяжения — сжатия  $\sigma$  в зависимости от относительного удлинения — укорочения  $\epsilon$  определяются по закону Гука:

$$\sigma = E\epsilon, \quad (6)$$

где  $E$  — модуль упругости первого рода.

<sup>1</sup> Предложена В. И. Костиным.

Подставив из формулы (1) относительную деформацию  $\epsilon$ , получим связь между напряжением  $\sigma$  и изменением сопротивления датчика:

$$\sigma = \frac{E}{S} \frac{\Delta R_d}{R_d}. \quad (7)$$

Из рассмотрения потенциметрической схемы (рис. 4) согласно закону Ома можно записать:

$$V = I(R_d + R_2) \quad (8)$$

и

$$U_{\text{вх}} = IR_d, \quad (9)$$

тогда

$$U_{\text{вх}} = \frac{R_d V}{R_d + R_2}. \quad (10)$$

Считая  $R_d$  и  $R_2$  независимыми переменными, определяем из (10) изменение напряжения  $dU_{\text{вх}}$  в измерительной цепи

$$dU_{\text{вх}} = V \left( \frac{dR_d}{R_d} - \frac{dR_2}{R_2} \right) \frac{R_d R_2}{(R_d + R_2)^2}. \quad (11)$$

Для каждого конкретного измерения  $R_2 = \text{const}$ ,  $dR_2 = 0$  и

$$dU_{\text{вх}} = V \frac{\frac{dR_d}{R_d} R_2}{R_d \frac{R_d}{R_2} + 2 \frac{R_d}{R_2} R_2 + R_2} \quad (12)$$

Обозначив  $n = \frac{R_d}{R_2}$ , с учетом зависимости (8) получим

$$dU_{\text{вх}} = V \frac{dR_d}{R_{dn} + R_2(2n + 1)} = \frac{IdR_d}{n + 1}. \quad (13)$$

Перейдем в уравнении (13) от дифференциалов к приращениям

$$\Delta U_{\text{вх}} = \frac{I \Delta R_d}{n + 1}. \quad (14)$$

Подставив значение  $\Delta R_d$  из (14) в (7), получим связь между механическим напряжением и изменением напряжения входного сигнала:

$$= \frac{E(n + 1)}{SR_d I} \Delta U_{\text{вх}}. \quad (15)$$

Введем понятие коэффициента усиления  $K$  усилительной аппаратуры, который выражается отношением величины амплитуды выходного гармонического сигнала  $U_{\text{вых}}$  к соответствующему ему зна-

чению входного гармонического сигнала  $\Delta U_{\text{вх}}$ :

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \quad (16)$$

Подставив в формулу (15)  $\Delta U_{\text{вх}}$  из (16) и учтя поправку на пиковое значение, окончательно будем иметь

$$\sigma = \frac{E(n+1)}{0,707SR_{\text{д}}IK} U_{\text{вых}}, \quad (17)$$

где  $n+1 = \frac{V}{V-IR_{\text{д}}}$ .

Таким образом, получена зависимость (17), позволяющая определить механическое напряжение  $\sigma$  в месте наклейки датчика по величине выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  усилительной аппаратуры. График этой зависимости называется тарифовочным и представляет собой прямую линию, исходящую из начала координат (рис. 5). Для построения тарифовочного графика необходимо знать значения всех величин, входящих в формулу (17).

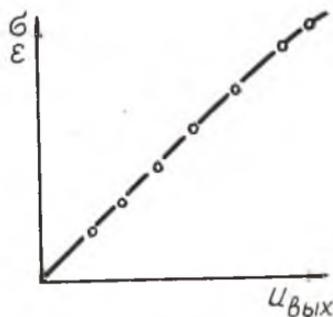


Рис. 5. Тарифовочный график.

Коэффициент тензочувствительности датчиков определяется по формуле (2). Для этого необходимо знать  $\frac{\Delta R}{R_{\text{д}}}$  и  $\varepsilon$ . Поэтому используют консольную балку равного сопротивления 2 (рис. 6), на которую по единой технологии наклеивают отобранные из данной группы датчики 1. Прикладывая силу в точке пересечения боковых сторон балки по величине прогиба  $A$ , измеряемого по риску 3, вычисляют значение относительной деформации:

$$\varepsilon = \frac{h}{b^2} A, \quad (18)$$

где  $h$  — толщина балки,

$b$  — расстояние до риски, по которой измеряют прогиб  $A$  балки.

Относительное изменение сопротивления  $\frac{\Delta R_{\text{д}}}{R_{\text{д}}}$  датчиков определяют с помощью мостовой схемы (рис. 2) из формулы (4). Описанный метод определения коэффициента тензочувствительности часто применяют для статической тарировки датчиков, включенных в мостовую схему.

В качестве усилительной аппаратуры в нашем случае применяется переносная четырехканальная тензометрическая станция.

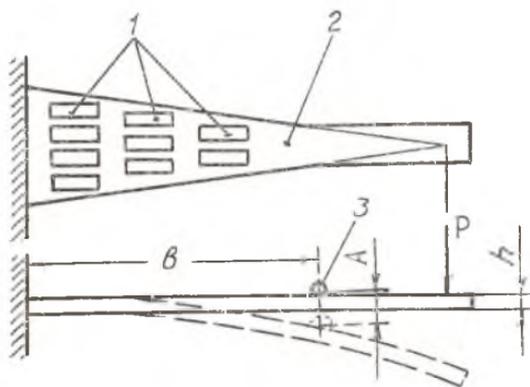


Рис. 6. Балка равного сопротивления:  
1 — датчик; 2 — балка; 3 — риска

Определение коэффициента усиления сводится к непосредственному измерению амплитуд гармонического входного сигнала  $\Delta U_{вх}$ , подаваемого от звукового генератора ЗГ-10, и, одновременно, выходного гармонического сигнала  $U_{вых}$ . Замеряются эти напряжения ламповым вольтметром типа МВА-ЗМ. Для повышения точности замера со звукового генератора снимают напряжение  $\Delta U_{вх}^*$  в 1000 раз большее, чем  $\Delta U_{вх}$ , и подают его на вход в усилитель через делитель напряжений (рис. 7), уменьшающий напряжение  $\Delta U_{вх}^*$  в 1000 раз.

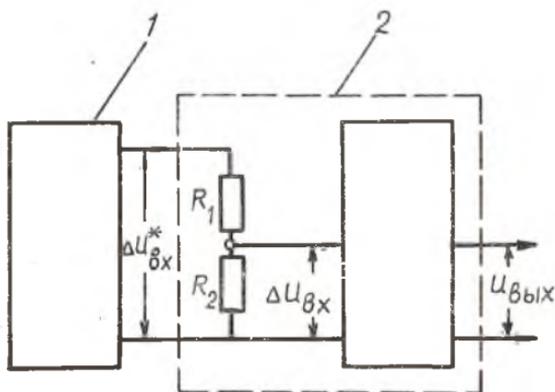


Рис. 7. Делитель напряжений:  
1 — звуковой генератор ЗГ-10; 2 — канал тензометрической станции

Делитель напряжений вмонтирован в корпус усилителя. Величина тока  $I$  питания датчиков тензометрической станции равна 40 мА и контролируется по приборам, установленным на каждом из четырех каналов. Напряжение питания датчиков  $V = 20$  В.

Сопротивление рабочих датчиков  $R_d = 98$  Ом. Заявленный средний коэффициент тензочувствительности  $S = 2$ . Коэффициент усиления  $K$  подсчитывается по формуле (16).

Коэффициент усиления может зависеть от частоты и величины входного сигнала. Поэтому определяются частотные и амплитудные характеристики аппаратуры. Частотной характеристикой канала называется зависимость коэффициента усиления от частоты входного гармонического сигнала.

Амплитудной характеристикой канала называется зависимость коэффициента усиления от амплитуды гармонического входного сигнала.

Диапазон частот, в котором коэффициент усиления остается постоянным или меняется в допустимых пределах, называется рабочим. Имеется также верхняя и нижняя границы рабочего диапазона амплитуд, за которыми нарушается линейность амплитудной характеристики.

Характеристики усилительной аппаратуры систематически проверяются до и после работы с ней.

#### ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ КАМЕРТОННОГО ТАРИРОВОЧНОГО УСТРОЙСТВА (ПРЯМАЯ ТАРИРОВКА)

Сущность этого метода заключается в следующем.

Датчик из партии наклеивается на деталь, у которой амплитуда напряжения или деформации в месте наклейки может быть определена в любой момент времени. Задавая различные амплитуды деформации  $\epsilon$  (напряжения  $\sigma$ ) детали и производя одновременный замер соответствующих величин выходного сигнала  $U_{\text{вых}}$ , по полученным точкам строят тарировочный график (рис. 5). Пользуясь методом прямой тарировки, необязательно знать значения величин параметров ( $R_d$ ,  $S$ ) датчика и усилительной аппаратуры ( $I$ ,  $V$ ,  $K$ ). Достаточно иметь датчики с малым разбросом по сопротивлению и тензочувствительности. Для проведения динамической тарировки прямым методом применяется камертонное тарировочное устройство КТУ-1 (рис. 8), представляющее собой прибор, состоящий из камертона  $1$  и электромагнита  $4$ , с помощью которого в камертоне возбуждаются автоколебания. На ножку камертона наклеиваются датчики  $2$ . Напряжение (деформация) в месте наклейки датчиков подсчитывается по величине размаха колебаний ножки камертона. Размах измеряется с помощью микроскопа  $6$  по риску  $3$ .

Риска представляет собой отверстие в пластине, закрепленной на ножке камертона, освещаемое встречным пучком света от электрической лампочки 5.

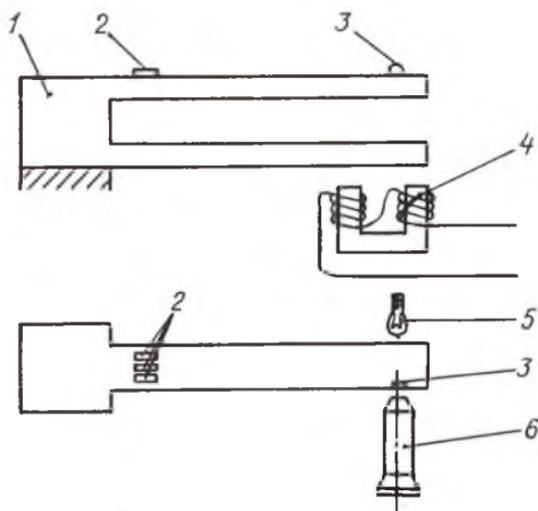


Рис. 8. Схема камертонного тарировочного устройства КТУ-1:

1 — камертон; 2 — датчик; 3 — риска; 4 — электромагнит автоколебательной системы; 5 — электролампа; 6 — микроскоп

Расчет механических напряжений в месте наклейки датчиков сводится к задаче о свободных колебаниях консольного стержня (рис. 9) постоянного сечения.

Воспользуемся готовым решением дифференциального уравнения свободных колебаний стержней [3]:

$$Y_{(x)} = C \left[ U(kx) - \frac{S(kl)}{T(kl)} V(kx) \right], \quad (19)$$

где  $k^4 = \frac{m_1 \omega_{01}^2}{EI}$ ,

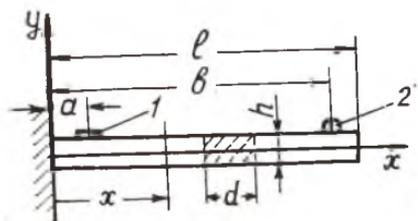


Рис. 9. Консольный стержень постоянного сечения:

1 — датчик; 2 — риска

$Y_{(x)}$  — поперечное смещение стержня в сечении с координатой  $x$ .

$S, T, U, V$  — функции А. Н. Крылова,

$EI$  — жесткость стержня на изгиб,

$E$  — модуль упругости материала,

$I$  — момент инерции сечения балки,  
 $m_1$  — масса единицы длины,  
 $\omega_{01}$  — собственная частота первого тона,  
 $l$  — длина,  
 $C$  — постоянная, определяющая масштаб колебания стержня.

Получив с помощью (19) зависимость между смещениями в сечениях  $a$  и  $b$  стержня и произведя двойное дифференцирование уравнения (19) в сечении  $a$ , определим напряжение  $\sigma$  в месте наклейки датчика:

$$\sigma = -\frac{\partial^2 V(a)}{\partial x^2} EI, \quad (20)$$

где  $W$  — момент сопротивления изгибу,  
 $a$  — расстояние от заделки до датчика.

Выразив напряжение (20) через амплитуду  $A$  смещения сечения риски, получим окончательно

$$\sigma = 2AsEh \frac{(kl)^2}{(2l)^2} \frac{\Theta_a}{\Theta_b}, \quad (21)$$

где  $2A$  — размах колебаний ножки камертона, выраженный в делениях шкалы микроскопа,

$s$  — цена одного деления шкалы микроскопа, мм,

$kl$  — 1,875 — частотный коэффициент,

$h$  — высота сечения,

$b$  — расстояние от заделки до риски,

$$\Theta_a = S(ka) - \frac{S(kl)}{T(kl)} T(ka),$$

$$\Theta_b = U_{(kb)} - \frac{S(kl)}{T(kl)} V_{(kb)}.$$

Характер изменения величин  $\Theta_a$  и  $\Theta_b$  в зависимости от места наклейки датчика  $a$  и расположения риски  $b$  приведен на рис. 10.

Подставив в (21) основные данные камертона

$$(a = 15 \text{ мм}; b = 158,5 \text{ мм}; l = 200 \text{ мм}; d = 20 \text{ мм};$$

$$h = 6,3 \text{ мм}; E = 2,04 \cdot 10^6 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}; s = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{дел}}),$$

получим для нашего случая

$$\sigma = 0,35 \cdot 2A \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}. \quad (22)$$

Тарировочный график, построенный с помощью соотношения (22), пригоден для замера напряжений в деталях, у которых

модуль упругости  $E_d$  материала совпадает с модулем упругости материала камертона  $E$ . В противном случае для пересчета напряжений пользуются соотношением

$$\sigma_d = \frac{E_d}{E} \sigma, \quad (23)$$

где  $\sigma_d$  — механическое напряжение в детали.

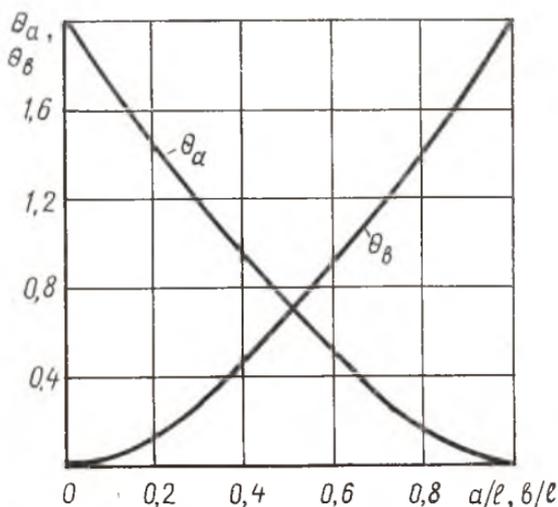


Рис. 10. Графики зависимости  $\theta_a$  и  $\theta_b$

Для удобства практического использования тарировочный график иногда строят в виде зависимости относительной деформации  $\varepsilon$  датчика от  $U_{\text{вых}}$ .

Тогда формула (23) принимает вид

$$\sigma_d = \varepsilon E_d.$$

Недостатком метода тарировки с использованием КТУ-1 является то, что частота колебаний, на которой производится тарировка, фиксирована и равна собственной частоте камертона.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа сводится к построению двух экспериментальных тарировочных графиков, полученных непрямым и прямым методами.

Перед началом опыта, для предварительного прогрева, включить тензометрическую станцию, звуковой генератор ЗГ-10,

камертонное тарировочное устройство КТУ-1 и ламповый вольтметр МВЛ-ЗМ.

### Проведение непрямой тарировки

1. Для выбранного канала тензометрической станции переключатель «род работы» поставить в положение «к. с.» («контрольный сигнал»), а переключатель «ослабление» — в положение «16».
2. Включить на выход из звукового генератора ЗГ-10 ламповый вольтметр, поставив переключатель «Выходной сигнал» в положение «ЗГ», и установить напряжение  $\Delta U_{\text{вх}}^* = 1 \text{ В}$  с частотой  $\omega \approx 130 \text{ Гц}$  (собственная частота колебания камертона). Так как напряжение подается через делитель напряжений (рис. 7) с отношением 1:1000, то на вход в усилительную аппаратуру поступит напряжение  $\Delta U_{\text{вх}} = 1 \text{ мВ}$ .
3. Переключатель «Выходной сигнал» поставить в положение «У» (ламповый вольтметр включается на выход усилительной аппаратуры) и измерить напряжение  $U_{\text{вых}}$ . Результаты занести в протокол.
4. Повторить замеры по пунктам 2 и 3 для нескольких частот (например, 50, 300, 500, 1000, 10000 Гц) и амплитуд напряжений (например, 0,5; 1,0; 1; 5 мВ).
5. Выключить звуковой генератор ЗГ-10.
6. Для каждого замера определить коэффициент усиления  $K$ . Результаты занести в протокол. Убедиться в линейности частотной и амплитудной характеристик тензометрической станции.
7. Подставить в формулу (17) необходимые величины и построить тарировочный график (коэффициент усиления  $K$  брать для частоты, равной частоте колебаний камертона по пункту 2).

### Проведение прямой тарировки

1. Тарировка производится на выбранном ранее канале и ослаблении тензометрической станции. Переключатель «Род работы» поставить в положение «2» (при этом включается один из исследуемых датчиков).
2. Переключатель «Выходной сигнал» поставить в положение «У».
3. Плавным поворотом ручки настройки КТУ-1 возбудить колебания камертона и, убедившись в стабильности его показания, произвести замер размаха  $2A$  и напряжения.

4. Повторить замеры по пункту 3 не менее чем для 10 различных размахов камертона. Результаты опыта занести в протокол.
5. Выключить аппаратуру.
6. По формуле (22) вычислить значения механических напряжений и занести результаты в протокол.
7. На график не прямой тарировки нанести экспериментальные точки и построить по ним график прямой тарировки.
8. При несовпадении непрямого и прямого тарировочных графиков произвести проверку заявленного среднего значения тензочувствительности  $S$  из формулы (17).

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет о выполненной работе должен содержать:  
краткое описание работы;  
потенциометрическую схему включения датчика;  
схему камертонного тарировочного устройства;  
протоколы измерений и обработки результатов опыта;  
графики прямой и не прямой тарировок;  
график зависимости коэффициента усиления  $K$  от частоты  $f$  (частотную характеристику);  
погрешность заявленного среднего коэффициента тензочувствительности датчика в сравнении с тензочувствительностью вычисленной по результатам прямой тарировки;  
анализ полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иорисш Ю. И. Измерение вибрации. М., Машгиз, 1956.
2. Гевондян Т. А., Киселев Л. Т. Приборы для измерения и регистрации колебаний. М., Машгиз, 1962.
3. Бабак ов И. М. Теория колебаний. М., Гостехиздат, 1958.

### *Лабораторная работа № 6*

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Цель работы: знакомство с методами расчетного и экспериментального определения собственных частот и соответствующих им форм колебаний цилиндрической тонкостенной оболочки.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Оболочка как упругое тело с распределенными параметрами (массой, жесткостью) имеет множество собственных частот и соответствующих им форм колебаний. При этом различают балочные и оболочечные формы колебаний.

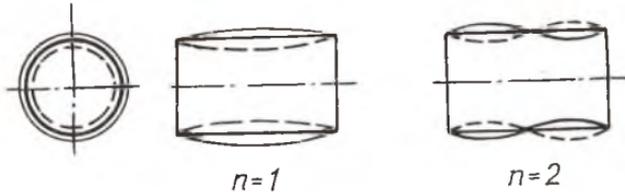


Рис. 1. Первая и вторая формы осесимметричных колебаний оболочки

При балочных формах оболочка совершает поперечные изгибные колебания, как обычная балка.

Оболочечные формы колебаний могут быть осесимметричными и изгибными.

При осесимметричных колебаниях перемещение элементов оболочки по радиусу в данном сечении происходит одновременно в одном направлении, а в разных по длине оболочки сечениях перемещения в данный момент времени могут отличаться не только величиной, но и знаком (рис. 1). Поэтому по длине оболочки может образоваться  $n$  полуволн колебаний, где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — любое целое число.

При изгибных колебаниях перемещение элементов оболочки по радиусу в данном сечении на различных участках длины окружности происходит одновременно в разных направлениях. Поэтому здесь наряду с образованием по длине оболочки  $n$  полуволн колебаний по ее окружности возникает еще  $\nu$  волн колебаний (рис. 2), где  $\nu = 2, 3, 4, \dots$

Собственная частота колебаний оболочки по данной форме зависит от ее геометрических размеров, свойств материала и, в меньшей степени, от вида закрепления ее концов. Для определения этой частоты можно воспользоваться энергетическим методом, согласно которому максимальное значение потенциальной энергии элемента оболочки в отклоненном положении равно максимальному значению его кинетической энергии в момент прохождения поло-

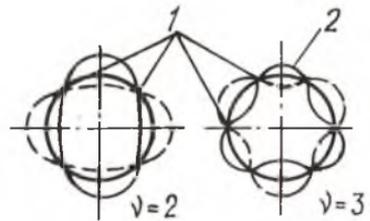


Рис. 2. Первая и вторая формы изгибных колебаний оболочки:

1 — узловые образующие;  
2 — пучность

жения начального равновесия. При этом предварительно необходимо задаться формой упругой линии прогиба оболочки. При изгибных колебаниях в практически важном диапазоне частот по длине оболочки устанавливается одна полуволна ( $n=1$ ). Частота колебаний  $f$  в данном случае для цилиндрической оболочки с учетом действующего на нее избыточного давления  $p$  определится по формуле [1]:

$$f_0 = \frac{\beta}{2\pi} \sqrt{\frac{Eh}{(1-\nu^2)m_1 r^2}} \Gamma \varphi, \quad (1)$$

где  $\beta = \left[ \frac{(1-\nu^2)\lambda^4 + k(\lambda^2 + \nu^2)^4 + \varphi(\lambda^2 + \nu^2)^2(\nu^2 - 1)}{\nu^2 + (\lambda^2 + \nu^2)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$  —

коэффициент, учитывающий влияние свойств материала, геометрических размеров, форм изгиба и избыточного давления на частоту колебаний;

$\varphi = \frac{pr(1-\nu^2)}{Eh}$  — коэффициент, учитывающий влияние избыточного давления на частоту колебаний;

$m_1 = \rho h$  — масса оболочки, отнесенная к единице площади срединной поверхности оболочки;

$r, h, l$  — радиус, толщина и длина оболочки соответственно;  
 $\rho, E, \mu$  — плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки;

$$k = \frac{1}{12} \left( \frac{h}{r} \right)^2;$$

$$\lambda = \frac{\pi r n}{l}.$$

С увеличением  $\nu$  частота колебаний сначала уменьшается, а затем возрастает (рис. 3). Объясняется это следующим образом. Угловая частота свободных колебаний  $\omega_0$  в общем случае

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (2)$$

Из сравнения формул (1) и (2) следует, что коэффициент  $\beta$  характеризует изменение жесткости оболочки при изменении ее формы. При данных размерах оболочки найдется такое значение  $\nu = \nu_{\min}$ , при котором изгибная жесткость оболочки, а сле-

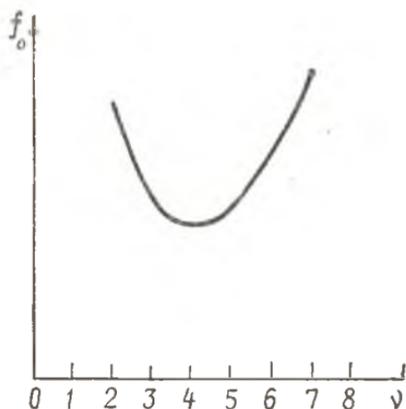


Рис. 3. Зависимость частоты изгибных колебаний оболочки от числа волн

довательно, и собственная частота колебаний будут минимальными.

Внутреннее избыточное давление повышает частоту колебаний и поэтому в формулу (1) оно подставляется с положительным знаком, а наружное — со знаком минус, так как оно снижает частоту колебаний.

При некоторой величине наружного давления, называемой критической ( $p_{кр}$ ), частота колебаний становится равной нулю, что соответствует потере устойчивости оболочки с образованием соответствующего числа волн  $\nu$ . Минимальное значение  $p_{кр}$  соответствует тому числу волн, при котором частота колебаний принимает (при  $p=0$ ) наименьшее значение. При этом  $\nu_{min}$  можно приближенно подсчитать по формуле

$$\nu_{min} = 2,85 \sqrt{\frac{r^3}{hl^2}} \quad (3)$$

Полученное значение  $\nu_{min}$  округляется до ближайшего целого числа.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 4) состоит из оболочки 4, закрепленной на основании 1. Оболочка возбуждается с помощью электродинамического вибратора 2, питаемого перемен-

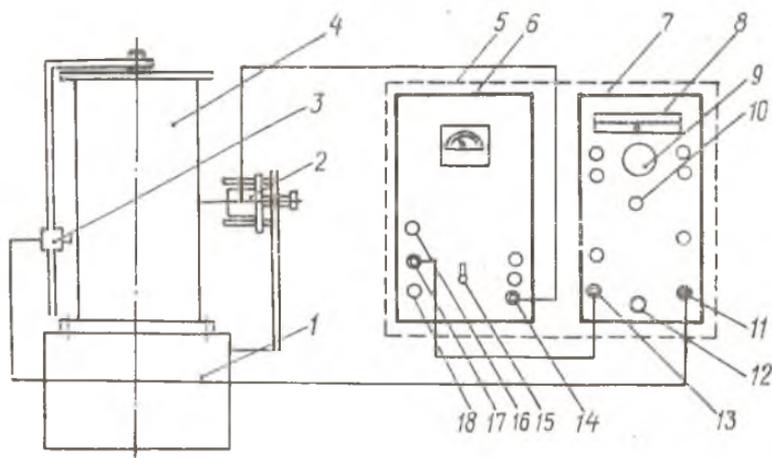


Рис. 4. Схема установки для определения частот и форм колебаний оболочки:

1 — основание; 2 — электродинамический вибратор; 3 — микрофон; 4 — оболочка; 5 — прибор ПВ-3; 6 — блок возбуждения; 7 — измерительный блок; 8 — указатель частоты; 9 — экран осциллографа; 10 — ручка плавного изменения частоты; 11 — гнездо «ЩУП»; 12 — переключатель диапазонов частот; 13 — гнездо «Выход генератора»; 14 — гнездо «Вибратор»; 15 — тумблер включения прибора; 16 — ручка «Мощность генератора»; 17 — гнездо «Генератор»; 18 — ручка «Мощность самовозбуждения»

ным током изменяемой частоты от прибора 5 (ПВ-3). Прибор ПВ-3 состоит из блока возбуждения 6 и блока измерений 7. Измерительный блок имеет звуковой генератор с частотомером и катодный осциллограф с экраном 9, являющийся регистратором колебаний. Звуковой генератор вырабатывает переменный ток, частота которого плавно изменяется вращением ручки 10 и фиксируется указателем 8. Генератор имеет четыре диапазона частот, переключение которых производится переключателем 12. Для обнаружения колебаний служит электродинамический микрофон 3, который может перемещаться по штанге в вертикальном направлении и поворачиваться вместе со штангой вокруг оболочки. Микрофон подключается к гнезду 11 «ЩУП». При колебании оболочки сигналы с микрофона поступают на вертикальные пластины катодной трубки и вызывают отклонения луча на экране по вертикали. На горизонтальные пластины трубки подается сигнал со звукового генератора.

Выход звукового генератора (гнездо 13) соединен с входом усилителя (гнездо 17) блока возбуждения.

Блок возбуждения представляет собой электронный усилитель, предназначенный для усиления сигналов звукового генератора. Сигнал с выхода усилителя (гнездо 14) подается к виткам звуковой катушки вибратора. Регулирование мощности сигнала производится ручками 16 и 18.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Собственные частоты и формы колебаний определяются на режиме резонанса, когда частота возбуждающей силы вибратора совпадает с одной из собственных частот колебаний оболочки. Этот момент характерен тем, что на экране осциллографа появляются эллипс или прямая — первая фигура Лиссажу. Плавно изменяя частоту возбуждения и мощность сигнала, необходимо получить на экране эллипс с минимальными искажениями формы и зафиксировать по указателю частоту. Появление более сложных фигур говорит о кратности возбуждающей и собственной частот.

Для выявления формы колебаний вначале следует определить число волн  $\nu$  по длине окружности. Для этого необходимо установить микрофон на уровне иглы вибратора и, поворачивая штангу вокруг оболочки, отметить на поверхности последней мелом узлы колебаний. На экране осциллографа узлы колебаний фиксируются по смыканию эллипса в прямую с изменением угла наклона большой оси эллипса к горизонтали на противоположный или по перемене местами верхней и нижней кривых искаженного эллипса.

Для определения числа полувольт  $n$  по длине образующей

необходимо установить микрофон в пучность и затем перемещать его по штанге вверх и вниз, фиксируя узлы.

На некоторых резонансах могут выявиться сложные формы колебаний с несколькими полуволнами по длине образующей ( $n=2, 3, \dots$ ).

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить прибор ПВ-3 тумблером 15 на блоке возбуждения и поворотом ручки «Фокус» на измерительном блоке.

2. После прогрева прибора и фокусировки луча осциллографа поворотом ручек «Мощность генератора» и «Мощность самовозбуждения» возбудить колебания оболочки.

3. Установив штангу микрофона рядом с иглой вибратора, поворотом ручки плавного изменения частоты генератора найти первый резонанс и зафиксировать частоту.

4. Определить число волн  $\nu$  по длине окружности оболочки и число полуволн  $n$  по длине образующей (см. предыдущий раздел).

5. Вращением ручки увеличить частоту и найти следующий резонанс, проделав все операции по пункту 4.

6. После отыскания частот и форм колебаний при  $n=1, \nu=2, 3, 4, 5, 6, 7$  найти более сложную форму с  $n=2$  или 3.

7. Построить экспериментальную частотную диаграмму оболочки  $f=f(\nu)$  при  $n=1$ .

8. Рассчитать частоты колебаний и построить расчетную частотную диаграмму для форм, наблюдаемых в эксперименте.

Параметры оболочки:

$$l = 800 \text{ мм}$$

$$r = 200 \text{ мм}$$

$$h = 1,0 \text{ мм}$$

$$E = 2 \cdot 10^4 \text{ кгс/мм}^2.$$

9. Объяснить причины расхождения расчетных и экспериментальных частот.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет по работе должен содержать:  
таблицу частот и форм колебаний оболочки (экспериментальных и расчетных при  $n=1$ );  
частотные диаграммы (расчетную и экспериментальную);  
анализ полученных результатов.

$\nu$	2	3	4	5	6	7
$\beta$						
$f_{0 \text{ расч}}$						
$f_{0 \text{ экспл}}$						

## ЛИТЕРАТУРА

1. Штода А. В. и др. Конструкции авиационных двигателей. Ч. 1. Изд. ВВИА им. Жуковского, 1958.

### Лабораторная работа № 7

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ И АМОРТИЗАЦИИ

Цель работы: ознакомление студентов с некоторыми способами определения упруго-демпфирующих свойств элементов систем демпфирования.

Большинство современных машин в процессе эксплуатации подвергается воздействию значительных динамических нагрузок. По мере развития техники увеличивается энергонапряженность машин и усложняются условия их эксплуатации. Поэтому надежность машин все в большей степени определяется их вибрационной прочностью. Из опыта авиадвигателестроения известно, что до 60—70% всех прочностных дефектов так или иначе связаны с вибрационными явлениями.

Эффективными способами борьбы с опасными колебаниями являются амортизация и демпфирование. Обеспечение высоких демпфирующих и виброизолирующих качеств достигается применением специальных упруго-демпфирующих элементов. Очевидно, что эти элементы должны обладать определенными упругими и демпфирующими свойствами. Точное знание количественных показателей этих свойств совершенно необходимо для правильного включения элементов в систему демпфирующего устройства.

Во многих случаях при решении задач о вынужденных колебаниях предполагается линейная связь между прикладываемой силой  $P$  и деформацией упругого элемента  $y$  (участок 0— $\Delta$  на рис. 1). Для этого случая уравнение вынужденных колебаний

массы  $m$  на упругом элементе с жесткостью  $C$  под действием внешней периодической силы  $P_0 \cos \omega t$  и при отсутствии демпфирования будет иметь вид

$$m\ddot{y} + Cy = P_0 \cos \omega t. \quad (1)$$

Однако любая реальная упругая система, особенно при больших деформациях, обладает нелинейной упругой характеристикой (рис. 1). Для деформации  $y > \Delta$  жесткость  $C$  оказывается зависящей от амплитуды деформации. При этом уравнение (1) становится нелинейным, так как сила упругости будет выражаться функцией деформации:

$$m\ddot{y} + C(y)y = P_0 \cos \omega t. \quad (2)$$

Точное решение уравнения (2) существует только для некоторых частных случаев вида функции  $C(y)$ .

Поэтому обычно при решении таких нелинейных дифференциальных уравнений функцию  $C(y)$  тем или иным способом линеаризуют, т. е. для каждой амплитуды деформации находят значение линеаризованной (эквивалентной) жесткости  $C_n$ , подстановка которой в уравнение (2) вместо  $C(y)$  превращает его в линейное уравнение (1). Очевидно, что частота собственных колебаний, определенная по этой эквивалентной жесткости

( $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_n}{m}}$ ), будет зависеть от амплитуды деформации. В част-

ности, для характеристики упругости, приведенной на рис. 1 (кривая 1—0—1), собственная частота будет возрастать с увеличением деформации; такая характеристика называется «жесткой». В противоположность ей характеристика 2—0—2 является «мягкой».

Решение уравнений (1) или (2) при любой характеристике упругости показывает, что при некоторых значениях  $\omega$  амплитуда вынужденных колебаний становится неограниченно большой.

Как уже отмечалось, для ограничения резонансных амплитуд в упругую систему должно вводиться демпфирование. Тогда в уравнениях (1) и (2) наряду с силами инерции, упругости и внешними силами должны присутствовать и силы трения (демппирование).

Физически присутствие в системе сил трения приводит к тому, что за один цикл деформирования некоторая доля энергии, идущая на деформацию, превращается в тепло и безвозвратно

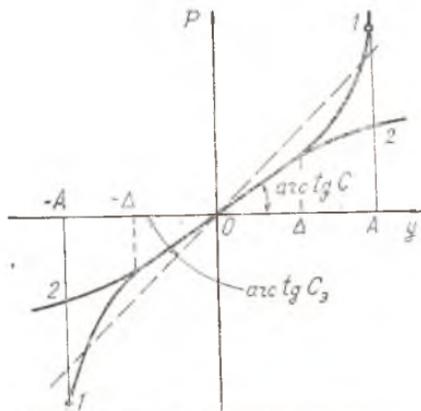


Рис. 1. Типы характеристик упругости

рассеивается. При этом появляется двузначная связь между силой и деформацией, и процесс деформирования будет иметь вид гистерезисной петли (рис. 2). Площадь этой петли численно равна рассеянной за цикл энергии  $\Delta W$ . Форма петли определяется как формой характеристики упругости, так и природой демпфирования.

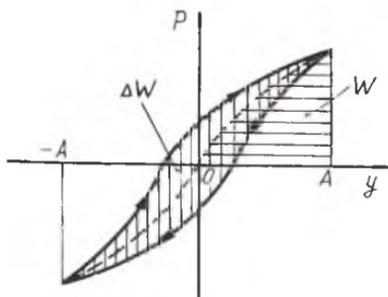


Рис. 2. Петля гистерезиса

Силы трения (или их составляющие) могут совершать работу только в том случае, если они находятся в противофазе с относительной скоростью.

Известны и исследованы несколько физических причин, вызывающих рассеяние энергии при колебаниях. Основными из них являются следующие.

1. Наличие сухого трения при взаимном скольжении трущихся поверхностей. При этом сила трения пропорциональна нормальному давлению  $F = \mu N$  и направлена против движения. Уравнение движения будет иметь вид

$$m\ddot{y} + Cy \pm F = P_0 \cos \omega t. \quad (3)$$

2. Вязкое трение (при движении в жидкости с малой скоростью либо при продавливании жидкости через узкие каналы). Силы вязкого трения пропорциональны скорости. При этом (как и в третьем случае) в статике гистерезисная петля вырождается в линию, а в динамике имеет форму эллипса (рис. 3). Уравнение движения с вязким трением имеет вид

$$m\ddot{y} + Cy + h\dot{y} = P_0 \cos \omega t, \quad (4)$$

где  $h$  — коэффициент вязкого трения.

3. Аэрогидродинамическое демпфирование, возникающее при движении тел в воздухе или жидкости с большими скоростями. Сила трения при этом пропорциональна квадрату скорости, и уравнение движения имеет вид

$$m\ddot{y} + Cy + \nu\dot{y}^2 = P_0 \cos \omega t. \quad (5)$$

4. Внутреннее трение в материале. Принято считать, что сила внутреннего трения пропорциональна деформации, и в уравнении движения она учитывается как

$$i \frac{\psi}{2\pi} Cy,$$

где  $i = \sqrt{-1}$ ;

$\psi = \frac{\Delta W}{W}$  — коэффициент рассеяния энергии в материале;

$W$  — максимальная потенциальная энергия деформации.

Умножение силы трения  $\frac{\psi}{2\pi} C y$  на  $i$  равносильно повороту вектора силы на  $90^\circ$  относительно « $y$ ». При этом петля гистерезиса имеет форму эллипса (рис. 4), а уравнение движения записывается в комплексной форме

$$m\ddot{y}^* + C \left(1 + i \frac{\psi}{2\pi}\right) y^* = P_0^* \cos \omega t, \quad (6)$$

где  $y^*$  и  $P_0^*$  — комплексные величины.

Таким образом, из всех рассмотренных видов демпфирования сухое трение и аэрогидродинамическое сопротивление — уравнения (3) и (5) — превращают уравнения движения в нелинейные по демпфированию. Решение их весьма громоздко и здесь не рассматривается. Для упрощения решения линеаризуют силы трения. При этом энергии рассеяния реальной и линеаризованной по демпфированию систем принимают равными. Следовательно, линеаризация заключается в замене нелинейной (неэллиптической) петли гистерезиса равной по площади эллиптической петлей и нахождении соответствующих эквивалентных коэффициентов вязкого трения  $h$  или рассеяния энергии  $\psi$ .

Очевидно, что наряду с нелинейными силами трения в общем случае уравнения движения могут содержать и нелинейные упругие силы. Одним из способов линеаризации упругих сил является метод «прямой линеаризации». Смысл его, как уже отмечалось выше, состоит в замене истинных значений жесткости эквивалентными, определяемыми для каждого конкретного значения деформации, и в решении соответствующего линейного уравнения. При этом необходимо иметь в виду, что из реальной гистерезисной петли при сложной ее форме и неизвестной заранее природе сил трения экспериментально нельзя выделить отдельно упругую и демпфирующую составляющие.

Следовательно, для проведения динамических расчетов не-

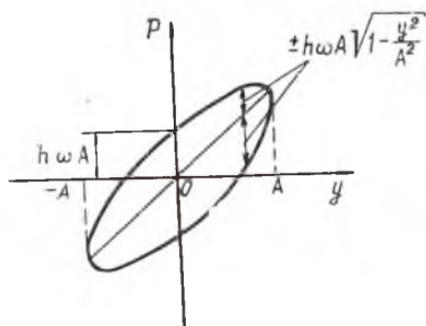


Рис. 3. Динамическая петля гистерезиса при вязком трении

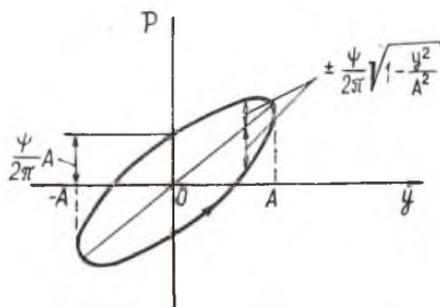


Рис. 4. Петля гистерезиса при внутреннем трении

обходимо предварительно найти зависимости некоторых условных эквивалентных величин жесткости и демпфирования от амплитуды деформации. Ниже рассматриваются несколько возможных способов их экспериментального определения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ

### Статический метод

Этот метод заключается в определении условных параметров жесткости и демпфирования из статической петли гистерезиса. Жесткость для данной амплитуды деформации определяется по упругой характеристике цикла, которая, как уже было сказано, заранее не известна. Если петля близка к эллиптической, то жесткость обычно определяется углом наклона большой оси эллипса к оси деформации, т. е. секущей, проведенной через концы петли. При сложной форме петли (см. рис. 2) за упругую характеристику часто принимают среднюю линию цикла. Тогда, представив ее аналитически, например в виде полинома  $f(y)$ , по методу «прямой линеаризации» можно получить эквивалентную жесткость:

$$C_э = \frac{5}{A^5} \int_0^A f(y) y^3 dy.$$

Для определения величины демпфирования необходимо определить площадь петли  $\Delta W$  и максимальную потенциальную энергию деформации  $W$ . Площадь петли находится планиметрированием цикла, а потенциальная энергия определяется по площади под упругой характеристикой. За параметр демпфирования обычно принимают либо коэффициент рассеяния энергии  $\psi = \frac{\Delta W}{W}$ , либо декремент колебаний  $\delta = \frac{\psi}{2}$  (если демпфирование приводится к вязкому трению).

Очевидно, что параметры упругости и демпфирования должны определяться по большому числу гистерезисных петель; только в этом случае можно построить зависимость этих параметров от амплитуд деформации и использовать эти зависимости для проведения динамических расчетов.

При пользовании статическим методом необходимо точно знать, что параметры, определяемые в статике, полностью сохраняются в динамике; в частности, при наличии вязкого трения статическими параметрами нельзя воспользоваться для проведения динамических расчетов.

## Динамические методы

Динамические методы отличаются большим разнообразием и значительно большей трудоемкостью, чем статические. В то же время именно параметры, определяемые динамическими методами, в действительности реализуются в колебательной системе и поэтому имеют большую ценность, чем статические.

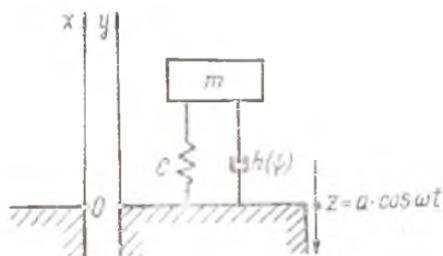


Рис. 5. Схема кинематического возбуждения

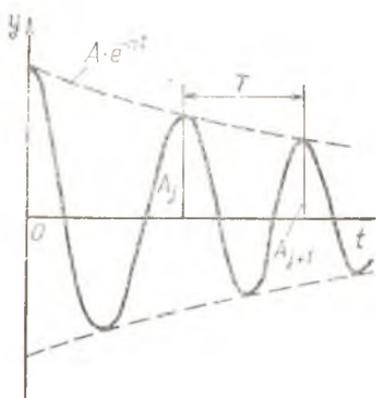


Рис. 6. Развертка свободных колебаний при вязком трении

Для динамических исследований упруго-демпфирующий элемент включается обычно в одномассовую систему с одной степенью свободы, возбуждаемую внешней периодической силой (электромагнитом или дисбалансными массами) либо кинематически, вынужденным движением точки подвеса (рис. 5). Известны следующие способы определения параметров упругости и демпфирования.

1. По динамической петле гистерезиса, наблюдаемой на экране осциллографа при вынужденных колебаниях исследуемого элемента. Необходимые параметры определяются так же, как по статической петле.

2. По свободным затухающим колебаниям. Для этого система тем или иным способом выводится из состояния равновесия и совершает свободные затухающие колебания. Из закона движения во времени, получаемого специальной записывающей аппаратурой, можно определить логарифмический декремент колебаний

$$\delta = \ln \frac{A_j}{A_{j+1}}$$

и период свободных колебаний  $T$  по известному масштабу на оси  $t$  (рис. 6). Зная  $T$ , можно определить эквивалентную жест-

кость  $C_3$  из известного выражения для собственной частоты:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{C_3}{m}}.$$

При малом демпфировании с одной осциллограммы свободных колебаний можно определить несколько значений  $C_3$  и  $\psi = 2\delta$  для различных амплитуд деформаций; при большом демпфировании необходимо иметь несколько осциллограмм для различных начальных амплитуд деформации. Этот метод является весьма грубым и используется обычно для приближенной оценки параметров упруго-демпфирующего элемента.

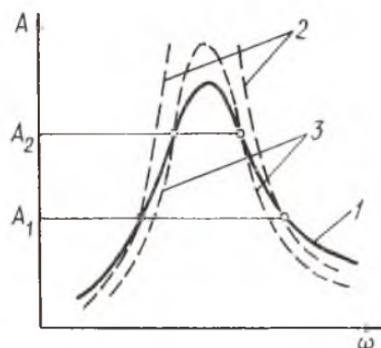


Рис. 7. Схема образования нелинейной резонансной кривой по методу «прямой линейаризации»

3. По резонансной кривой. Параметры упругости и демпфирования из экспериментальной резонансной кривой могут определяться:

- а) по высоте резонансного пика;
- б) по ширине резонансной кривой;

в) по сдвигу фаз между деформацией и силой, вызывающей ее, либо по сдвигу фаз между деформацией и внешней силой.

Для определения этих параметров, очевидно, необходимо иметь аналитическую связь их с некоторыми параметрами экспериментальной кривой.

В соответствии с методом «прямой линейаризации» из рис. 7 видно, что каждая пара точек экспериментальной кривой 1 принадлежит некоторой линейной резонансной кривой 2 (или 3) с определенными для данного уровня деформации  $A_1$  (или  $A_2$ ) параметрами упругости и демпфирования.

Для установления связи искомых параметров с параметрами экспериментальной резонансной кривой рассмотрим одномассовую систему с одной степенью свободы (см. рис. 5). В дальнейшем под жесткостью  $C$  и коэффициентом вязкого трения  $h$  (или коэффициентом рассеяния энергии  $\psi$ ) будем понимать их эквивалентные значения, соответствующие определенному уровню деформации.

Уравнение движения при кинематическом возмущении с частотой  $\omega$  и амплитудой  $a$  для случая вязкого трения имеет вид

$$m\ddot{x} + h(\dot{x} - \dot{z}) + C(x - z) = 0, \quad (7)$$

где  $x$  и  $z$  — перемещения в абсолютном и переносном движениях.

Из него для относительной системы координат ( $y = x - z$ ) получается уравнение

$$m\ddot{y} + h\dot{y} + Cy = -m\ddot{z}. \quad (8)$$

Частное решение уравнения (8), соответствующее установившимся вынужденным колебаниям, ищется в виде

$$y = M \sin \omega t + N \cos \omega t. \quad (9)$$

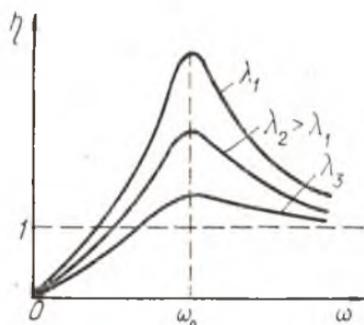


Рис. 8. Общий вид резонансных кривых в относительной системе координат

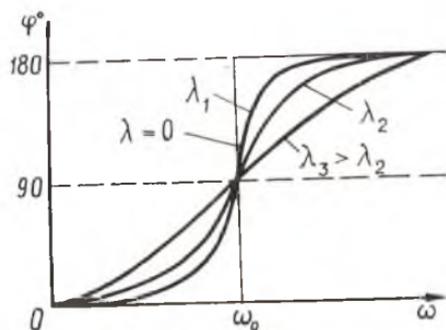


Рис. 9. Общий вид фазовых кривых

После подстановки решения (9) в уравнение (8) и определения постоянных  $M$  и  $N$  получим выражение для закона движения:

$$y = \frac{a\omega^2}{V(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} \cos(\omega t - \varphi) = A \cos(\omega t - \varphi), \quad (10)$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \varphi = \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad (11)$$

$A$  — амплитуда деформации;

$n = \frac{h}{2m}$  — коэффициент затухания;

$\varphi$  — угол, который определяет сдвиг фаз между перемещением точки подвеса  $z$  и деформацией  $y$ .

Введя коэффициент демпфирования  $\lambda = \frac{1}{V1 + 4\left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2} = \frac{n}{\omega_0}$ , по-

лучим выражение для коэффициента усиления:

$$\eta = \frac{A}{a} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{V\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\lambda^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (12)$$

Общий вид резонансных кривых показан на рис. 8, а фазовых кривых — по уравнению (11) — на рис. 9.

Учтем, что полная реакция упругого элемента

$$R = hy + Cy = \frac{m\omega^2 \sqrt{1 + 4\lambda^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\lambda^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \cos(\omega t - \varphi + \alpha), \quad (13)$$

где 
$$\operatorname{tg} \alpha = 2\lambda \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (14)$$

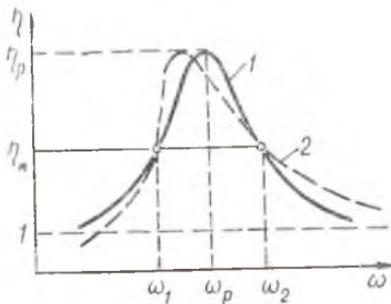
Из уравнений (7) и (8) видно, что  $R = -m\ddot{x}$ , следовательно,  $\alpha$  представляет собой сдвиг фаз между силой инерции массы  $m$  в абсолютном движении и деформацией  $y$ .

Выражение (12) позволяет определить из экспериментальной кривой  $I$  (рис. 10) искомые условные параметры упругости и демпфирования. Для этого найдем из (12) два значения частоты возбуждения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , соответствующие данному коэффициенту усиления  $\eta_{*}$ :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\eta_{*}^2 \omega_0^2 (1 - 2\lambda^2)}{\eta_{*}^2 - 1} + \sqrt{\frac{\eta_{*}^4 \omega_0^4 (1 - 2\lambda^2)^2}{(\eta_{*}^2 - 1)^2} - \frac{\eta_{*}^2 \omega_0^4}{\eta_{*}^2 - 1}}}, \quad (15)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\eta_{*}^2 \omega_0^2 (1 - 2\lambda^2)}{\eta_{*}^2 - 1} - \sqrt{\frac{\eta_{*}^4 \omega_0^4 (1 - 2\lambda^2)^2}{(\eta_{*}^2 - 1)^2} - \frac{\eta_{*}^2 \omega_0^4}{\eta_{*}^2 - 1}}}. \quad (16)$$

Зная значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , полученные из эксперимента, можно из (15) и (16) определить неизвестные параметры  $\lambda$  и  $C$ :



$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \frac{(\omega_1^2 + \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2}} \sqrt{\frac{\eta_{*}^2 - 1}{\eta_{*}^2}}; \quad (17)$$

$$C = m\omega_1 \omega_2 \sqrt{\frac{\eta_{*}^2 - 1}{\eta_{*}^2}}. \quad (18)$$

Рис. 10. К определению параметров упругости и демпфирования из экспериментальной резонансной кривой

Найденные таким образом  $\lambda$  и  $C$  определяют линейную резонансную кривую 2 (рис. 10), пересекающуюся с экспериментальной кривой 1 толь-

ко в двух точках на данном уровне деформаций, определяемом величиной  $\eta_*$ .

Аналогичным образом можно определить значения  $\lambda$  и  $C$  для других уровней деформации.

Таким образом, рассекая экспериментальную резонансную кривую несколькими уровнями деформаций и определяя соответствующие им значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , можно по ширине кривой найти зависимость параметров упругости и демпфирования от амплитуд деформаций.

Учитывая, что на резонансе  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_p$ , получим формулы для определения  $\lambda$  и  $C$  по высоте резонансной кривой:

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\eta_p^2 - 1}{\eta_p^2}} \right)}; \quad (19)$$

$$C = m\omega_p^2 \sqrt{\frac{\eta_p^2 - 1}{\eta_p^2}}. \quad (20)$$

Для случая внутреннего трения уравнение движения (при кинематическом возбуждении с частотой  $\omega$  и амплитудой  $a^*$ ) в относительных координатах запишется следующим образом:

$$m\ddot{y}^* + C \left( 1 + i \frac{\psi}{2\pi} \right) \dot{y}^* = -mz^*. \quad (21)$$

Частное решение его ищется в виде

$$y^* = A^* e^{i\omega t}. \quad (22)$$

После подстановки решения (22) в уравнение (21) и определения  $A^*$  получим выражение для закона движения:

$$y^* = \frac{a^* \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{\sqrt{\left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \left( \frac{\psi}{2\pi} \right)^2}} e^{i(\omega t - \gamma)}, \quad (23)$$

где 
$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\frac{\psi}{2\pi}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (24)$$

Отношение действительных частей величин  $A^*$  и  $a^*$  дает коэффициент усиления

$$\eta = \frac{A}{a} = \frac{\frac{\omega^2}{\omega_0^2}}{\sqrt{\left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \left( \frac{\psi}{2\pi} \right)^2}}. \quad (25)$$

Решая (25) относительно  $\omega$ , получим, как и ранее, значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , из которых после преобразований можно получить формулы для определения жесткости

$$C = m \frac{(\omega_1^2 + \omega_2^2)(\eta_*^2 - 1)}{2\eta_*^2} \quad (26)$$

и коэффициента рассеяния энергии

$$\psi = 2\pi \sqrt{\frac{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 - \eta_*^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{(\eta_*^2 - 1)(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2}} \quad (27)$$

Для других уровней деформаций значения  $C$  и  $\psi$  можно определить аналогичным образом, в частности, для резонанса:

$$C = m\omega_p^2 \frac{(\eta_p^2 - 1)}{\eta_p^2}; \quad (28)$$

$$\psi = \frac{2\pi}{\sqrt{\eta_p^2 - 1}} \quad (29)$$

Определение жесткости и демпфирования по экспериментально определенным углам сдвига фаз  $\varphi$ ,  $\alpha$  или  $\gamma$  из (11), (14) или (24) в одной, произвольно взятой точке резонансной кривой, не представляется возможным, т. к. в каждое из этих равенств входят обе неизвестные величины. Выход может быть найден, если решить совместно равенства (11) и (12) или (24) и (25):

$$\psi = 2\pi \frac{\sin \gamma_{1,2}}{\eta_* \mp \cos \gamma_{1,2}}; \quad (30)$$

$$C = m \frac{\omega_{1,2}^2}{\eta_*} (\eta_* \mp \cos \gamma_{1,2}). \quad (31)$$

Кроме того, для систем с внутренним трением можно определить коэффициент рассеяния энергии (как и в случае вязкого трения) по углу сдвига фаз между силой инерции массы  $m$  в абсолютном движении и деформацией  $y$  из выражения

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\psi}{2\pi}. \quad (32)$$

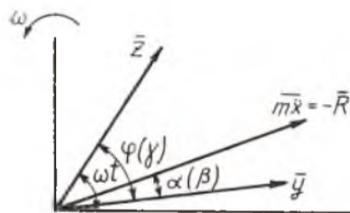


Рис. 11. Фазовая картина движения при кинематическом возбуждении

Как видно, здесь, в отличие от вязкого трения (14), сдвиг фаз не зависит от частоты.

В связи с тем, что углы  $\beta$ , как и  $\alpha$ , не превышают обычно  $10-15^\circ$ , а измерение их с высокой точностью весьма затруднительно, для определения  $\psi$  лучше пользоваться формулой (30), так как углы  $\gamma$  вблизи резонанса име-

ют большое значение, и погрешность измерений их в меньшей степени влияет на определение  $\psi$ . Общая фазовая картина движения показана на рис. 11.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема лабораторной установки приведена на рис. 12. Она включает:

- 1) электродинамический стенд ВЭДС-10А;
- 2) генератор-усилитель возбуждающих колебаний, состоящий из блоков измерения вибраций, генераторов синусоидальных колебаний, усилителя и подмагничивания;
- 3) вибродатчики  $D_1$  и  $D_2$ ;
- 4) частотомер-периодомер цифровой ЧЗ-22;
- 5) блок усилителя-преобразователя, состоящий из трех усилителей-преобразователей типа АВ-4З;
- 6) три измерительные головки типа Ц-28М;
- 7) осциллограф ЭО-07;
- 8) фазометр В5-1.

Все части установки, кроме стенда и блока генератора-усилителя, смонтированы на общем пульте измерений.

Электродинамический стенд (рис. 13) предназначен для преобразования электрических колебаний в механические. Он состоит из неподвижного стола 1, на котором закреплены четыре стойки 2. К одной из них через жесткую систему крепится магнит 3 (шток) вибродатчика  $D_1$ . С помощью этого датчика снимаются переносные колебания  $Z$  виброплощадки 4 стенда. Катушка датчика  $D_1$  крепится на виброплощадке. Шток 5 вибродатчика  $D_2$  закреплен на массе 6, которая подвешивается к исследуемому демпферу 7. Катушка датчика  $D_2$  крепится на виброплощадке 4. Таким образом, относительная координата  $y$  массы 6 фиксируется датчиком  $D_2$ . Частота и амплитуда возбуждающих колебаний задается блоком генератора-усилителя. Усиленный электрический сигнал подается на звуковую катушку динамика 8, которая жестко соединена с виброплощадкой. В результате взаимодействия электромагнитных полей звуковой катушки и постоянного магнита возникают осевые перемещения виброплощадки.

Для точного замера частоты возбуждающих колебаний сигнал от генератора поступает в частотомер. Частотомер имеет шкалу, на которой высвечивается частота колебаний с точностью до 0,1 Гц.

С датчика  $D_1$  сигнал подается через 1-й усилитель-преобразователь на 1-ю измерительную головку. Тем самым с 1-й измерительной головки снимается амплитуда  $a$  возбуждающих колебаний. Сигнал датчика  $D_2$  раздваивается и, проходя через

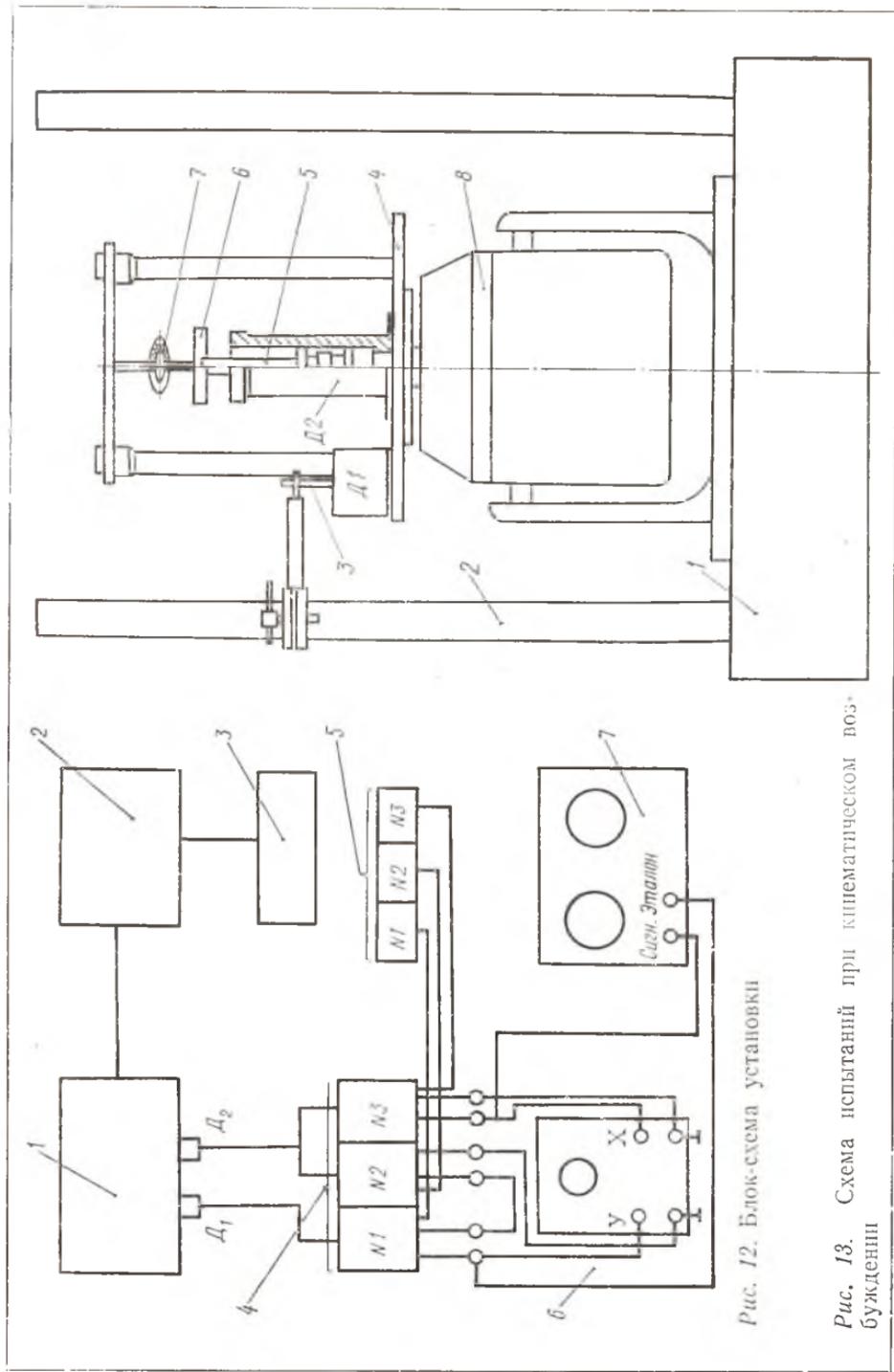


Рис. 12. Блок-схема установки

Рис. 13. Схема испытаний при кинематическом возбуждении

2-й и 3-й усилители-преобразователи, поступает на 2-ю и 3-ю измерительные головки.

Для наблюдения петли гистерезиса в установке используется осциллограф. На горизонтальную развертку его подается сигнал от 3-го усилителя-преобразователя, пропорциональный деформации демпфера. Со 2-го и 1-го усилителей-преобразователей на вертикальную развертку подается суммарный сигнал переносного  $z$  и относительного  $y$  ускорений, пропорциональный действующей силе ( $-mx$ ).

Для наблюдения сдвига фаз  $\varphi$  или  $\alpha$  на горизонтальную развертку осциллографа от 3-го усилителя-преобразователя подается сигнал, пропорциональный деформации демпфера, а на вертикальную развертку — сигнал от 1-го усилителя-преобразователя, пропорциональный перемещению виброплощадки.

Для снятия фазовых кривых используется фазометр, позволяющий измерять сдвиг фаз  $\varphi$  или  $\gamma$  между перемещением виброплощадки и деформацией демпфера.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

### Подготовка к работе

1. Установить переключатели «Делитель» на блоке усилителей-преобразователей в положение «64».

2. Ручку «Уровень» блока усилителя перевести в крайнее левое положение.

3. Подготовить фазометр к работе:

а) тумблер «Калибр — изм.» установить в положение «Калибр»;

б) переключатель «Шкала» установить в положение 15В;

в) регулятор калибровки напряжения установить в среднее положение;

г) переключатель калибровки напряжения установить в положение «20В МАКС»;

д) положение регулятора и переключателя калибровки частоты безразлично;

е) гнездо «Эталон» соединить экранированным кабелем с клеммами 1 и 2, причем земляной штырь (черный) — с клеммой 2;

ж) гнездо «Сигнал» соединить экранированным кабелем с клеммами 5 и 6, причем земляной штырь (черный) с клеммой 6.

4. Подготовить частотомер к работе:

а) тумблер «Память — суммир.» установить в положение «Суммир.»;

б) переключатель «Множ. период» — в положение « $10^4$ »;

- в) переключатель «Род работы» — в положение «Частота А»;
- г) переключатель «Метки времени S» — в положение « $10^{-4}$ »;
- д) переключатель «Вход А» — в положение « $I : I$ »;
- е) переключатели «Вход Б» — в положения « $\bar{1} \_ | \bar{1}$ » и « $I : I$ »;
- ж) переключатель «Время индикации S» — в положение « $I$ »;
- з) с помощью кабеля соединить «Вход А» с клеммами «Внеш. ген.» генератора-усилителя; обратить внимание на то, что земляной штырь кабеля — черная вилка, а земляная точка генератора-усилителя — средняя клемма.

### Порядок включения установки

**ВНИМАНИЕ:** строго соблюдать порядок включения блоков, установленный ниже.

1. Включить тумблер «Сеть» блока генератора синусоидальных колебаний.
2. Включить тумблер «Сеть» блока усилителя.
3. Включить тумблер «Сеть» блока подмагничивания.
4. Включить тумблер «Сеть» на пульте измерений.
5. Включить тумблер «Сеть» частотомера.
6. Включить тумблеры «Сеть» и «Луч» осциллографа.
7. Включить тумблер «Сеть» фазометра.

При включении всех тумблеров должны загораться сигнальные лампочки. Для нормальной работы приборы прогреть 3—5 минут.

### Порядок снятия резонансной и фазовой кривых

Установить ручки «Род работы» усилителей-преобразователей и переключатели на столе пульта измерений в положения «S» — перемещение. После прогрева приборов необходимо ручкой «Уровень» блока усилителя задать необходимую амплитуду *a* возбуждающих колебаний (амплитуду смещения виброплощадки), а ручкой частоты установить первоначальную частоту возбуждающих колебаний (около 15—17 Гц). Показания частоты снимать с частотомера после нажатия кнопки «Сброс» на нем.

**ВНИМАНИЕ:** при задании нагрузки следить за положением стрелки прибора указателя выходного напряжения (тока) на блоке генератора-усилителя. Она должна находиться в левой части шкалы, до красной отметки. Стрелки измерительных головок на пульте измерений не должны зашкаливать.

Установить заданную амплитуду возбуждающих колебаний ручкой «Уровень» по показанию 1-й измерительной головки. В течение всего эксперимента следить за постоянством ее значения. По 3-й измерительной головке снять значение амплитуды

А вынужденных колебаний. Для более точного отсчета показаний регулировать положение стрелок так, чтобы они находились в правой половине шкалы. Регулировка производится переключателями «Делитель».

Установить на фазометре переключатель диапазона частот в положение, соответствующее частоте возбуждения. Перевести переключатель калибровки напряжения поочередно в положения, соответствующие меньшим напряжениям, до максимального возможного приближения стрелки индикатора действительных величин (левого) к красной черте. Регулятором плавной калибровки напряжения «Рег.» установить стрелку индикатора действительных величин точно на красную черту. Регулятором плавной калибровки частоты «Рег.» установить стрелку индикатора мнимых величин (правого) на «О». Перевести тумблер «Калибр — изм.» в положение «Изм.». Переключая последовательно переключатель «Шкала» на меньшие пределы, получить удобочитаемый отсчет, не допуская зашкаливания стрелок. По левому индикатору произвести отсчет действительной ( $U_d$ ), а по правому — мнимой ( $U_m$ ) составляющих вектора измеряемого напряжения. После снятия отсчетов установить ручки фазометра в соответствии с пп. 3а, 3б, 3г раздела «Подготовка к работе» в исходное положение.

Увеличить частоту возбуждающих колебаний примерно на 1 Гц. Плавно меняя нагрузку, добиться заданного значения амплитуды возбуждающих колебаний и фазовой характеристики, строго придерживаясь порядка, описанного выше. Отсчет фазы  $\varphi$  или  $\gamma$  можно производить не на каждой частоте возбуждения.

Аналогичным образом, изменяя частоту примерно на 1 Гц, пройти через резонанс до 35—37 Гц. При необходимости можно снять подобным образом резонансную кривую и фазовую характеристику при другой амплитуде  $a$  возбуждающих колебаний.

## Наблюдение петли гистерезиса

Убрав напряжение возбуждения, освободить клеммы 1, 2, 5 и 6 на пульте измерений от экранированных кабелей. Короткими соединительными проводами подключить клеммы 1, 2, 3, 4, 5 и 6 к гнездам осциллографа (см. рис. 14). Переключатели 7, 8 перевести в положения «1». Ручки «Род работы» 1-го и 2-го усилителей-преобразователей переключить в положения «1» — ускорение. Размеры петли на экране можно менять ручкой «Уровень», ручками усиления X, Y осциллографа и ручками «Делитель». При варьировании размеров петли не допускать зашкаливания стрелок измерительных головок.

## Порядок выключения установки

1. Вывести ручку «Уровень» в крайнее левое положение.
2. Выключить тумблер «Сеть» блока подмагничивания.
3. Выключить тумблер «Сеть» блока усилителя.
4. Выключить тумблер «Сеть» блока генератора синусоидальных колебаний.
5. Выключить тумблеры «Сеть» остальных приборов и пульта измерений в любой последовательности.
6. Отсоединить соединительные провода и кабели.

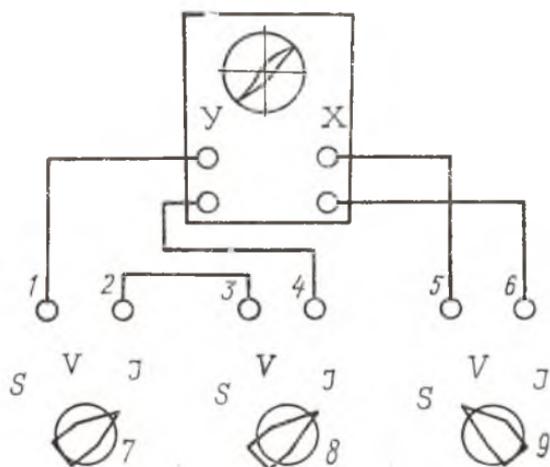


Рис. 14. Схема подключения осциллографа для наблюдения динамической петли гистерезиса

## ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Построить резонансную кривую в координатах « $\eta$ — $\omega$ », где  $\omega = 2\pi f$ , а  $f$  — измеряемая частота колебаний в Гц.
2. Определить значения  $\eta_p$  и  $\omega_p$ .
3. Выбрать значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  на 5—6 уровнях деформаций.
4. По формулам (17), (18), (26), (27) подсчитать значения эквивалентных параметров жесткости и демпфирования для выбранных уровней деформации. Расчеты вести с точностью до 4 значащих цифр.
5. По формулам (19), (20), (28), (29) подсчитать значения этих параметров для резонанса.
6. Подсчитать углы сдвига фаз по формуле  $\varphi$  (или  $\gamma$ ) = 
$$= \arctg \frac{U_M}{U_d}$$
.

7. По формулам (30), (31) подсчитать  $C$  и  $\psi$  по углу сдвига фаз.

8. Построить следующие графики:

а) зависимость  $C=C(A)$  для вязкого и внутреннего трения;

б) зависимость  $\lambda=\lambda(A)$  и  $\psi=\psi(A)$ ;

в) зависимость  $\varphi=\varphi(\omega)$ .

Проанализировать полученные зависимости и сделать выводы.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет о проделанной работе должен содержать:

а) краткое описание исследуемого упруго-демпфирующего элемента;

б) схему определения параметров упругости и демпфирования по резонансной кривой и соответствующие расчетные выражения;

в) все расчеты и графики по разделу V работы;

г) анализ полученных результатов и выводы.

## ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Основная опасность при выполнении лабораторных работ связана с наличием высокого электрического напряжения и вращающихся элементов установок. Неаккуратность, невнимательность, недостаточное знакомство с приборами, электрическими схемами и правилами безопасности работ могут повлечь за собой несчастный случай.

Для предупреждения несчастных случаев, пожаров следует изучать и выполнять правила техники безопасности, производственной санитарии и пожарной профилактики.

1. Перед проведением лабораторных работ преподаватель обязан провести краткий инструктаж по технике безопасности и методам работы студентов на рабочих местах. Обратит при этом внимание на возможные опасности в порученной работе, меры их устранения, защитные средства, приборы включения и выключения, правила и приемы оказания первой помощи.

2. Внимательно ознакомиться с заданием, оборудованием, проверить исправность схемы и предохранительных устройств, надежность заземления, убедиться в правильности подключения приборов, в отсутствии оголенных или неподключенных проводов.

3. Выполнять в лаборатории только ту работу, которая поручена. Категорически воспрещается производить другие работы.

4. Тщательно следить за исправностью изоляции проводов и оборудования. Прикосновение к корпусам электрооборудования, кабелю и проводам схемы безопасно только при исправной изоляции проводов.

5. При обнаружении обрывов, повреждений, искрений в сетевых шлангах лабораторную работу немедленно прекратить и сообщить преподавателю или лаборанту.

### 6. СТРОГО ВОСПРЕЩАЕТСЯ:

- а) включать силовые и осветительные рубильники без разрешения руководителя;
- б) работать с незаземленным электрооборудованием;
- в) закорачивать блокировочные устройства;
- г) снимать и перевешивать предупреждающие и запрещающие плакаты;
- д) пользоваться неисправным оборудованием и инструментом.

7. Запрещается проводить работы одному. Присутствие второго лица необходимо для оказания помощи при несчастном случае, пожаре.

8. При несчастном случае с вашим товарищем следует немедленно оказать ему первую помощь и сообщить об этом руководителю или лаборанту.

9. При работе по настройке измерительной аппаратуры необходимо соблюдать меры предосторожности, чтобы избежать попадания под анодное напряжение и напряжение в сети. Запрещается вскрывать и производить ремонт электронной измерительной аппаратуры без разрешения преподавателя.

10. Будьте осторожны при пользовании стробоскопом! При визуальном наблюдении вращающегося вала с применением стробоскопа создается только впечатление замедления или полного прекращения вращения. В действительности же вал продолжает вращаться с той же скоростью.

11. По окончании снятия эксперимента полностью выключить установку и привести в порядок рабочее место.

12. Не загромождать свое рабочее место оборудованием, не относящимся к выполняемой работе, а также книгами, сумками, портфелями и другими вещами. Загроможденность и захламленность рабочего места могут явиться причиной несчастного случая!

13. Во время выполнения задания нельзя ходить без дела по лаборатории, так как это отвлекает внимание товарищей и оставляет без наблюдения действующие установки, что может повлечь за собой несчастный случай.

14. Не нарушать самим и останавливать нарушающих правила техники безопасности и внутреннего распорядка.

15. Немедленно сообщить руководителю работ или лаборанту о замеченных неисправностях и нарушениях техники безопасности.

16. Запрещается в лаборатории находиться в пальто, а также раздеваться и вешать пальто, головные уборы на лабораторное оборудование.

17. Виновные в нарушении настоящих правил привлекаются к ответственности в установленном порядке в соответствии с законодательством.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Лабораторная работа № 5	Основы тензометрирования. Динамическая тарировка тензометрической аппаратуры . . . . .	3
Лабораторная работа № 6	Определение собственных частот и форм колебаний цилиндрической оболочки . . . . .	16
Лабораторная работа № 7	Экспериментальное исследование упруго-демпфирующих свойств элементов систем демпфирования и амортизации . . . . .	22
	Инструкция по технике безопасности при выполнении лабораторных работ . . . . .	40

*Белоусов Анатолий Иванович, Бузицкий Владимир Николаевич,  
Иванов Вадим Петрович, Панин Евгений Александрович, Пичугин Дмитрий Федорович,  
Чегодаев Дмитрий Евгеньевич*

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

#### *Лабораторные работы*

Редактор Т. К. К р е т и н и н а

Технический редактор Н. М. К а л е н ю к

Сдано в набор 10.V.76 г. Подписано в печать 28.III.77 г.  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 2,75 п. л. Уч.-изд. л. 2,6. Тираж 1000 экз.  
Цена 14 к. Заказ № 6515.

Куйбышевский авиационный институт им. С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. изд-ва «Волжская коммуна», г. Куйбышев, пр. Карла Маркса, 201.