

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА**

ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

КУЙБЫШЕВ 1978

УДК 621.317.7

Составитель доц. О. П. Скобелев

Утверждена редакционно-издательским советом института 6.10.77 г.

ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ

Цель работы: изучение конструкции и исследование характеристик дифференциальных индуктивных датчиков давления и перемещения.

Индуктивные датчики широко используются при автоматизации технологических процессов, экспериментальных исследованиях и производственных испытаниях для преобразования различных физических параметров, в частности, давлений и перемещений.

Во входном измерительном преобразователе (ИП) датчика давления входной параметр преобразуется в перемещение, которое с помощью выходного ИП преобразуется в изменение индуктивности.

Существует большое разнообразие конструктивных вариантов индуктивных преобразователей линейных перемещений [1].

В диапазоне перемещений от сотых до десятых долей мм наибольшее распространение получили ИП с ферромагнитным магнитопроводом и малым воздушным зазором (рис. 1, ИП-1). Подобная конструкция индуктивного преобразователя обычно применяется в датчиках давления.

В диапазоне перемещений от десятых долей до нескольких мм рабочая характеристика такого преобразователя недостаточно линейна. Поэтому в указанном диапазоне приходится использовать другие конструкции и, в частности, ИП с ферромагнитным сердечником плунжерного типа (рис. 2, ИП-2).

Индуктивность катушки

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (1)$$

где Ψ — потокосцепление катушки;
 I — ток, проходящий в обмотке.

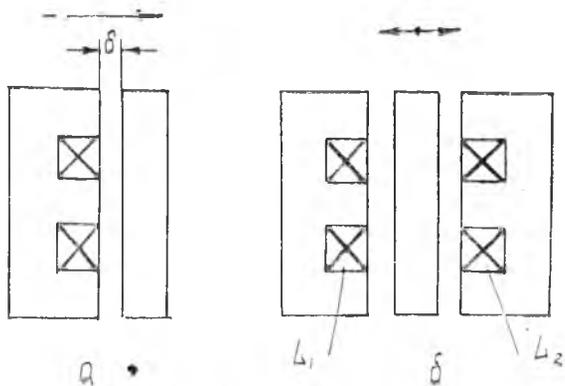


Рис. 1. Конструкции ИП-1: а — недифференциальная; б — дифференциальная

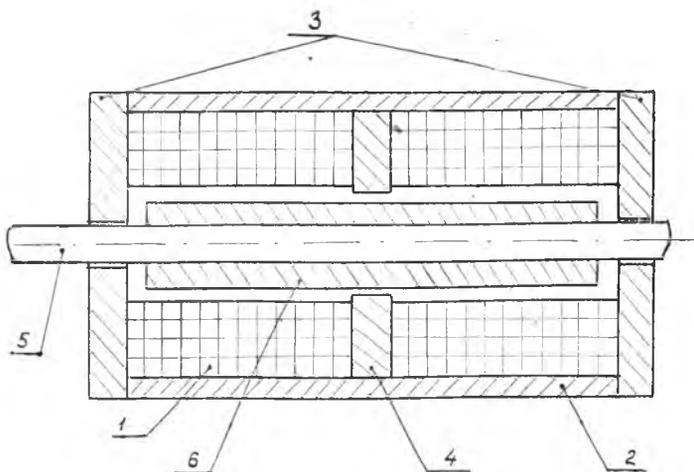


Рис. 2. ИП-2 с ферромагнитным сердечником плунжерного типа

Если пренебречь рассеянием, то

$$\psi = \Phi \omega, \quad (2)$$

где Φ — поток, созданный током в сердечнике;

ω — число витков в катушке.

Магнитный поток определяется магнитодвижущей силой $I\omega$ (I — ток в катушке), а также магнитным сопротивлением $R_{\text{магн}}$. Величина $R_{\text{магн}}$ зависит от конструкции электромагнитного узла. Поэтому основные характеристики обоих вариантов индуктивных преобразователей существенно отличаются.

УРАВНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ЛИНЕЙНОСТЬ ИП-1

Магнитное сопротивление магнитопровода (см. рис. 1, а)

$$R_{\text{магн}} = R_{\text{ст}} + R_{\text{возд}} = \frac{l}{\mu_{\text{ст}} \mu_0 S_{\text{ст}}} + \frac{\delta}{\mu_0 S_{\text{в}}},$$

где l — средняя длина магнитной силовой линии в стали;

δ — длина зазора;

$\mu_{\text{ст}}$ — магнитная проницаемость стали;

μ_0 — магнитная проницаемость в вакууме;

$S_{\text{ст}}, S_{\text{в}}$ — площади поперечного сечения стального магнитопровода и участка зазора, по которому проходит магнитный поток.

Для магнитного потока

$$\Phi = \frac{I\omega}{R_{\text{магн}}} = \frac{I\omega}{\frac{l}{\mu_{\text{ст}} \mu_0 S_{\text{ст}}} + \frac{\delta}{\mu_0 S_{\text{в}}}}. \quad (3)$$

После подстановки выражений (3), (2) в (1), полагая $S_{\text{в}} = S_{\text{ст}} = S$, получим

$$L = \mu_0 S \omega^2 \frac{1}{\delta + l/\mu_{\text{ст}}} = K \frac{1}{\delta + l/\mu_{\text{ст}}}, \quad (4)$$

где $K = \mu_0 S \omega^2$ — коэффициент пропорциональности.

При уменьшении воздушного зазора $\Delta \delta$ индуктивность L увеличивается на ΔL :

$$L = L + \Delta L = K \frac{1}{\delta - \Delta \delta + l/\mu_{\text{ст}}}. \quad (5)$$

Из (5), (4) следует, что связь L и δ нелинейна. Исключая K из (4), (5), имеем

$$1 + \frac{\Delta L}{L} = \frac{\delta + l/\mu_{\text{ст}}}{\delta - \Delta \delta + l/\mu_{\text{ст}}}.$$

Тогда относительное отклонение индуктивности

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} - \frac{1}{1 - \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}}}. \quad (6)$$

Раскладывая уравнение (6) в ряд для случая $\frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} \ll 1$:

$$\Delta L/L = \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} \left[1 + \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} \right)^2 + \dots \right] \quad (7)$$

Аналогично, при увеличении воздушного зазора наблюдается уменьшение индуктивности L на ΔL ,

$$L = L - \Delta L = K \frac{1}{\delta + \Delta \delta + \frac{l}{\mu_{ст}}}. \quad (8)$$

Дальнейшие преобразования (8), аналогичные преобразованиям (5), приводят к ряду

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + l/\mu_{ст}} \left[1 - \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} + \left(\frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} \right)^2 - \dots \right]. \quad (9)$$

Полученные выражения (9), (7) содержат линейный член

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}}$$

и члены его высших степеней, которые характеризуют нелинейность преобразования:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} + \Delta_{нел};$$

$$\Delta_{нел} = \left(\pm \frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{l}{\delta \mu_{ст}}} \right)^2 + \dots$$

$\Delta_{нел}$ — погрешность нелинейности.

В недифференциальных ИП погрешность $\Delta_{нел}$ — велика. Ее удастся уменьшить благодаря использованию дифференциальных конструкций (см. рис. 1, б). При перемещении якоря

индуктивность одной катушки растет ($+\Delta L/L$), другой уменьшается ($-\Delta L/L$). Обычно оба плеча дифференциального ИП (L_1, L_2) включаются в мостовую схему. Выходное напряжение при этом пропорционально разности изменений индуктивностей:

$$U_{\text{вых}} \equiv \frac{\Delta L}{L} - \left(-\frac{\Delta L}{L}\right) = 2 \frac{\Delta L}{L}.$$

Тогда члены четного порядка в выражениях (7), (9) исчезают. Следовательно, погрешность нелинейности дифференциальных ИП меньше, чем в недифференциальных ($\Delta_{\text{нел. диф.}} < \Delta_{\text{нел. недиф.}}$).

На рис. 3 показаны кривые, иллюстрирующие комбинированный эффект катушек, соединенных по дифференциальной схеме.

Линейный член (7), (9) при бесконечно малых $\Delta\delta$ характеризует чувствительность ИП:

$$S_1 = \frac{\Delta L/L}{\Delta \delta/\delta} = -\frac{1}{1 + \frac{\delta^2}{\delta_{\text{ст}}^2}}, \quad (10)$$

которая может быть получена путем логарифмирования и дифференцирования (4). Отрицательный знак показывает, что $\Delta L/L$ увеличивается с уменьшением $\Delta\delta/\delta$ и наоборот.

Из (10) следует, что чувствительность ИП увеличивается при уменьшении $\frac{l}{\delta_{\text{ст}}}$. Это достигается уменьшением длины l сердечника, увеличением $\mu_{\text{ст}}$ до возможно большего значения. Но если $\frac{l}{\delta_{\text{ст}}} \ll 1$, то дальнейшее повышение S_1 невозможно.

Чтобы обеспечить хорошую линейность, относительное изменение длины воздушного зазора должно быть небольшим, потому что только при этом условии высшими степенями $\frac{\Delta\delta}{\delta}$ можно пренебречь. Это, с другой стороны, снижает чувствительность и вызывает необходимость поиска компромиссного решения. Обычно в датчиках относительное изменение индуктивности 0,1–0,2, а нелинейность при этом не более 1–2%.

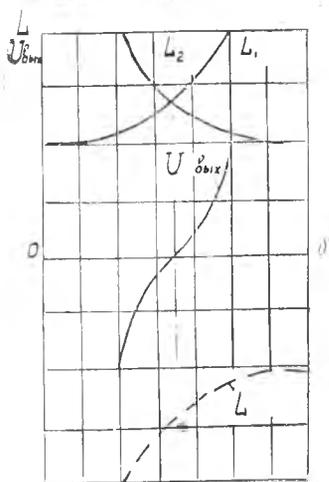


Рис. 3. Зависимость $U_{\text{вых}}(\delta)$.

УРАВНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.
 ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ЛИНЕЙНОСТЬ ИП-2

Индуктивный преобразователь ИП-2 используется в датчике перемещений ЧИЗ-Д (см. рис. 2). Электромагнитный узел датчика представляет дифференциальную систему из двух катушек 1, магнитопровода, состоящего из внешнего цилиндрического феррита 2, торцовых ферритовых шайб 3 и внутренней разделительной ферритовой шайбы 4, а также плунжера из стального стержня 5 и ферритового цилиндра 6. Ферритовая шайба 4 устраняет взаимное влияние катушек датчика.

При перемещении плунжера вправо площадь перекрытия витков правой катушки увеличивается и индуктивность возрастает. Росту индуктивности способствует также уменьшение воздушного зазора между торцевой ферритовой шайбой 3 и ферритовым цилиндром 6. Индуктивность левой катушки при этом уменьшается, так как уменьшается площадь перекрытия витков и увеличивается воздушный зазор между левой торцевой шайбой 3 и ферритовым цилиндром 6 плунжера.

Теоретический анализ преобразователя с сердечником плунжерного типа (см. рис. 2) представляет серьезные трудности. Они вызваны сильным влиянием потоков рассеяния катушки, а также сложной геометрии воздушных зазоров в торцевой части магнитопровода. Поэтому, принимая упрощающие

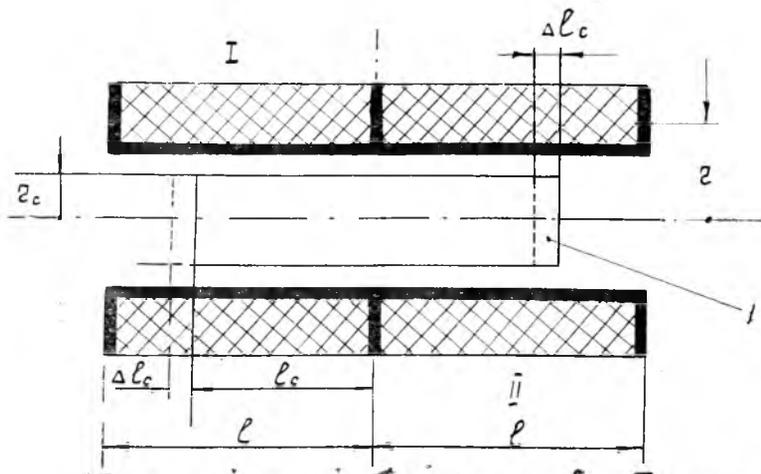


Рис. 4. Модель преобразователя без внешнего магнитопровода

допущения, мы ограничимся качественным анализом основных характеристик преобразователя.

Представим конструкцию преобразователя в виде двух моделей. Первая — не имеет внешнего магнитопровода, а состоит только из удлиненной катушки и плунжера (рис. 4).

Вторая модель — с внешним магнитопроводом (рис. 5). Магнитный поток в основном определяется зазором между плунжером и торцевой шайбой.

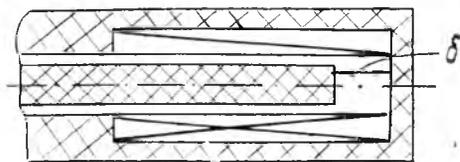


Рис. 5. Модель преобразователя с внешним магнитопроводом

В реальном преобразователе проявляется суммарное действие обеих моделей, причем при больших зазорах реальная конструкция ближе к первой модели, при малых — ко второй.

Рассмотрим более подробно первую модель (см. рис. 4). Если пренебречь неравномерностью магнитного поля удлиненной катушки и предположить однослойную обмотку катушки радиусом r и длиной l , то ее индуктивность

$$L = \frac{w^2 r^2}{l}.$$

Если ферромагнитный плунжер радиусом r_c имеет ту же длину, что и катушка, то индуктивность возрастает

$$L = \frac{w^2}{l} [r^2 + (\mu_c - 1)r_c^2],$$

где μ_c — магнитная проницаемость сердечника. При длине сердечника l_c , меньшей длины катушки

$$\begin{aligned} L &= \frac{w^2}{l_c} \frac{l_c^2}{l^2} [r^2 + (\mu_c - 1)r_c^2] + \frac{w^2}{l - l_c} \left(\frac{l - l_c}{l}\right)^2 r^2 = \\ &= \frac{w^2}{l^2} [l r^2 + (\mu_c - 1)l_c r_c^2]. \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) видно, что при увеличении l_c на величину Δl_c , т. е. при перемещении сердечника внутри катушки на величину Δl_c (см. рис. 4), индуктивность L получает приращение ΔL :

$$L + \Delta L = \frac{w^2}{l^2} [l r^2 + (\mu_c - 1)r_c^2(l_c + \Delta l_c)], \quad (12)$$

а изменение индуктивности

$$\Delta L = \frac{w^2}{l^2} r_c^2 (\mu_c - 1) \Delta l_c.$$

Относительное изменение индуктивности

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta l_c}{l_c} \frac{1}{1 + (l/l_c)(r^2/r_c^2) \frac{1}{\mu_c - 1}}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что при принятых допущениях рабочая характеристика $L=f(l)$ линейна (рис. 6), а чувствительность постоянна

$$S = \frac{\Delta L/L}{\Delta l_c/l_c} = \frac{1}{1 + (l/l_c)(r^2/r_c^2) \frac{1}{\mu_c - 1}}. \quad (14)$$

Для увеличения чувствительности необходимо, чтобы

$$l/l_c; r/r_c \rightarrow 1.$$

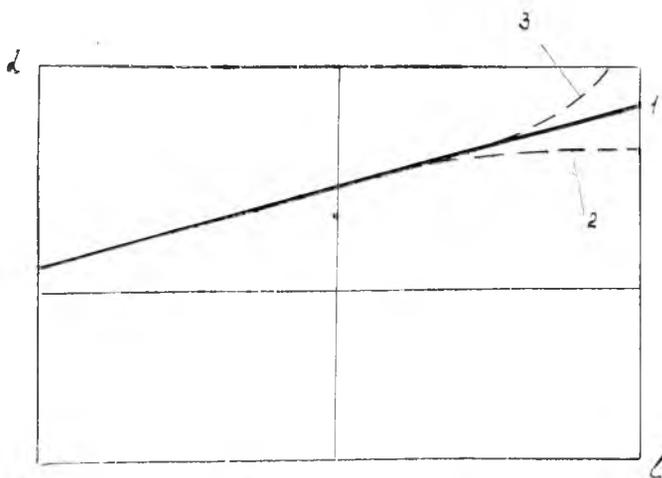


Рис. 6. Характеристика $L=f(l)$

С учетом неравномерности распределения поля катушки ограниченной длины характеристика $L=f(l)$ становится нелинейной, а чувствительность уменьшается в конце диапазона (см. рис. 6, кривая 2). Вторая модель преобразователя (см. рис. 5) — характеризует реальную конструкцию при крайних правых положениях плунжера. Подобно конструкции на рис. 1 характеристика $L=f(l)$ нелинейна, причем чувствительность возрастает при уменьшении зазора (см. рис. 6, кривая 3).

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Индуктивный ИП характеризуется не только индуктивным, но и активным сопротивлением. Активное сопротивление катушки с сердечником (R_s) определяется активным сопротивлением обмотки (меди) R_m и потерями в магнитопроводе на перемагничивание и вихревые токи R_3 .

Величина этих потерь зависит от величины магнитного потока Φ , следовательно, от величины тока и воздушного зазора.

Эквивалентная схема катушки индуктивности датчика представлена на рис. 7.

Потери в сердечнике на вихревые точки определяются по

$$P_v = \sigma_v G j^2 B^2, \quad (15)$$

где σ_v — коэффициент потерь на вихревые токи;

G — вес сердечника;

j — частота тока в катушке;

B — магнитная индукция в магнитопроводе.

Потери на перемагничивание

$$P_n = \sigma_n G j B^2, \quad (16)$$

где σ_n — коэффициент потерь на перемагничивание.

Суммарные потери

$$P = (\sigma_n + \sigma_v j) j G B^2. \quad (17)$$

Учитывая, что $B = \frac{\Phi}{S}$, а также (3)

$$P = (\sigma_n + \sigma_v j) j G \frac{I^2 \omega^2}{S^2 R_{\text{магн}}^2}.$$

В эквивалентной схеме (см. рис. 7) в сопротивлении R_3 должна расходоваться мощность, равная мощности потерь в сердечнике. Так как мощность потерь в сопротивлении $P = I^2 R_3$, то для преобразователя датчика ИП-1

$$R_3 = \frac{P}{I^2} = \frac{A}{[(C_1/\mu) + \delta]^2}, \quad (18)$$

где $A = (\sigma_n + \sigma_v j) G j \omega^2 \mu^0$ — постоянная величина (при $j = \text{const}$) для данного датчика, не зависящая от зазора. Из выражения (18) следует, что R_3 зависит от зазора. При уменьшении зазора магнитопровода катушки L_1 эквивалентное сопротивление

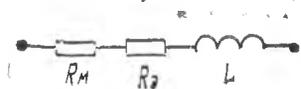


Рис. 7. Эквивалентная схема катушки датчика

R_{31} увеличивается на ΔR_3 ,

$$R_{31} = R_3 + \Delta R_3 = \frac{A}{\left(\bar{\delta} - \Delta \bar{\delta} + \frac{l}{\mu_{ст}}\right)^2}. \quad (19)$$

Наоборот, при увеличении зазора катушки L_2 эквивалентное сопротивление R_{32} уменьшается на ΔR_3 ,

$$R_{32} = R_3 - \Delta R_3 = \frac{A}{\left(\bar{\delta} + \Delta \bar{\delta} + \frac{l}{\mu_{ст}}\right)^2}. \quad (20)$$

Изменение сопротивления катушек датчика необходимо учитывать при расчете измерительной цепи.

Магнитопровод ИП-2 выполнен из феррита, в котором потери на вихревые токи и перемагничивание значительно меньше в сравнении с потерями в стали магнитопровода ИП-1. Поэтому потери в магнитопроводе ИП-2 проявляются на значительно более высоких частотах (несколько десятков кГц), причем они вызваны главным образом стальным элементом плунжера (см. рис. 2).

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПИТАНИЯ НА ДОБРОТНОСТЬ ИП

Как известно, добротность катушек определяется выражением

$$Q = \frac{\omega L}{R_3}.$$

Если бы R_3 определялось только сопротивлением меди R_M , то добротность была бы линейно связана с частотой f . Поскольку R_3 зависит от частоты, то изменения функции $Q(f)$ имеют более сложный характер.

Рассмотрим зависимость затухания (величины обратной Q) от частоты. Затухание, связанное с R_M , определяется по выражению

$$D_M = \frac{R_M}{2\pi f L} = K_M \frac{1}{f}, \quad (21)$$

где

$$K_M = \frac{R_M}{2\pi L}.$$

Затухание, связанное с потерями на перемагничивание и вихревыми токами (18), будем рассматривать в отдельности.

Тогда затухание, связанное с перемагничиванием, определяется с учетом (17), (18) и (4) выражением.

$$D_n = \frac{R_3}{2\pi fL} = \frac{G_n G w^2 \mu_0^2 f}{2\pi R_{\text{магн}} K f} = K_n. \quad (22)$$

Из (22) следует, что D_n инвариантно к изменениям f . Затухание, связанное с вихревыми токами, определяется с учетом формул (17), (18) и (4) выражением

$$D_v = \frac{R_3}{2\pi fL} = \frac{G_v G w^2 \mu_0^2 f^2}{2\pi R_{\text{магн}} K f} = K_v f. \quad (23)$$

На рис. 8 представлены затухания D_m , D_n , D_v и общее затухание D в функции частоты:

$$D = K_m \frac{1}{f} + K_n + K_v f. \quad (24)$$

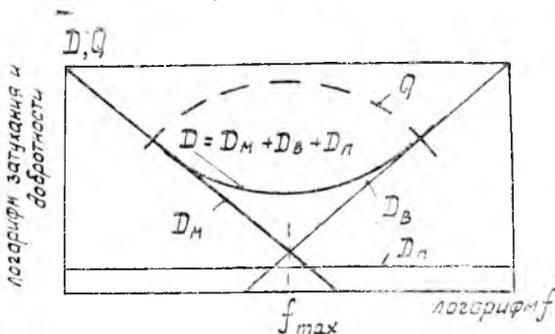


Рис. 8. Зависимость добротности и затухания от частоты

Из (24) следует, что D в функции частоты f имеет минимум, а добротность максимум. При выборе частоты питания измерительной цепи необходимо учитывать это обстоятельство. Частота питания выбирается из условия получения максимума Q .

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка содержит:

датчик давления ИД-0,8, преобразующий давление в диапазоне 0—0,8 кг/см². Датчик перемещения ЧИЗ-Д, преобразующий линейные перемещения в диапазоне $\pm 0,5$ мм;

образцовый грузопоршневой манометр МТ-60;
 стойку для крепления датчика ЧИЗ-Д с часовым индикатором КИ 0—2 мм для контроля перемещений;
 мост переменного тока ЕЗ-3 для измерения индуктивности и добротности датчика ИД-0,8;
 измеритель добротности низкочастотный ИДН-1 для определения характеристик ЧИЗ-Д;

Технические характеристики и правила пользования ИДН-1 приведены в таблице, закрепленной на корпусе прибора.

На рис. 9 схематически изображена конструкция индуктивного датчика давления дифференциального типа (ИД-0,8).

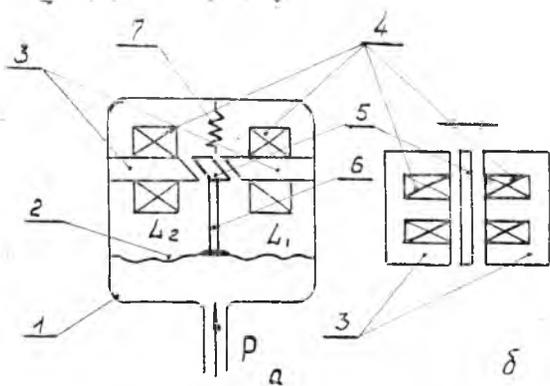


Рис. 9. Конструкция датчика ИД-0,8

В корпусе 1 расположены входной и выходной ИП. На первом этапе давление P преобразуется в силу F ,

$$F = P \cdot S_{\text{эфф}},$$

где $S_{\text{эфф}}$ — эффективная площадь поверхности.

Очевидно, что на этом этапе точность преобразования определяется только стабильностью $S_{\text{эфф}}$.

В качестве входного ИП в изучаемом датчике используется упругий элемент — мембрана 2.

Сила F , пропорциональная давлению, действуя на мембрану, вызывает ее прогиб, определяемый эффективной площадью и жесткостью. Связь между прогибом центра плоской мембраны x и давлением P для случая, когда прогиб x значительно меньше толщины мембраны $\delta/\delta \gg x/\delta$, определяется соотношением [1]

$$\frac{PR^4}{E\delta^4} = 5,86 \frac{x}{\delta}, \quad (25)$$

где R — радиус мембраны;
 E — модуль упругости.

Для больших прогибов ($x \gg \delta$) пропорциональная связь P и x нарушается и характеристика $x=f(P)$ становится нелинейной:

$$\frac{PR^4}{E\delta^4} = 3,58 \frac{x^3}{\delta^3}.$$

Для получения стабильной характеристики $x=f(P)$ желательно иметь возможно мягкую мембрану и создать противодействующее усилие добавочным упругим элементом.

В датчике на рис. 9 снижению жесткости способствуют кольцевые гофры на мембране, а противодействующее усилие создается пружиной 7.

Гофрированные мембраны применяются при измерении давлений меньших, чем плоские [1], но допустимые перемещения центра гофрированной мембраны при достаточно хорошей линейности значительно больше и достигают 1—2% от диаметра.

Перемещение центра диафрагмы передается с помощью штока 6 на индуктивный преобразователь типа ИП-1, представляющий два «Ш»-образных магнитопровода 3 с двумя катушками 4 (см. рис. 9).

Оба магнитопровода замыкают якорь 5.

При увеличении давления шток 6 перемещает якорь 5 вверх. При этом воздушный зазор в левой части системы увеличивается (индуктивность уменьшается), а зазор правой части уменьшается (индуктивность увеличивается).

Магнитопроводы выполняются из электротехнической листовой стали для уменьшения потерь. Для увеличения чувствительности датчика воздушный зазор стараются выполнить возможно меньше (0,5—1,0) мм).

Индуктивный преобразователь ИП-2 определяет конструкцию датчика перемещений типа ЧИЗ-Д. Его описание приводилось ранее (см. рис. 2).

Образцовый поршневой манометр МТ-60 предназначен для измерения и создания давления. Манометр МТ-60 в настоящей работе используется как источник давления. Его конструкция представлена на рис. 10. Манометр содержит измерительный блок A , питающий насос B , маслбак C , клапаны 1, 2, 3, 4. К измерительным штуцерам 5 крепятся датчик давления и стрелочный манометр M . Применение стрелочного ма-

номера необязательно, так как измерение давления возможно с помощью собственного измерительного блока МТ-60. Однако стрелочный манометр более удобен и требует меньше

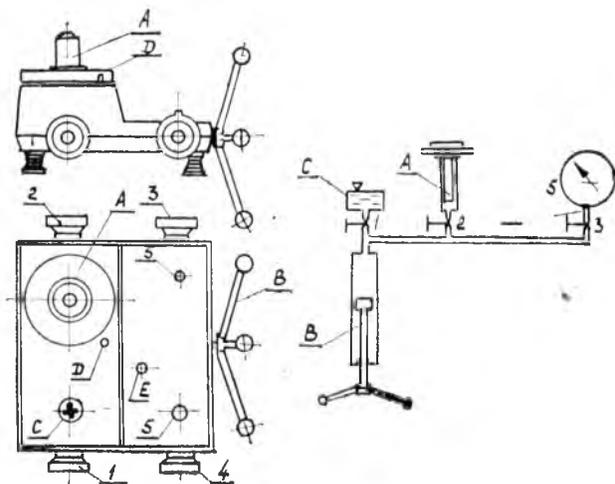


Рис. 10. Общий вид и принципиальная схема манометра МТ-60

времени на измерение. Манометр закреплен на плите и снабжен уровнем *E* для проверки установки в горизонтальной плоскости. При работе МТ-60 как источника давления изменение давления производится поворотом ручки *B* питающего насоса. Номинальное давление датчика ИД-0,8—0,8 кг/см².

Поэтому во избежание повреждения давление в насосе не должно превышать 0,8 кг/см². Пределы измерения стрелочного манометра 0—1,0 кг/см².

В качестве стойки для крепления датчика и создания перемещения используется штатив оптиметра ИКПВ. Штатив состоит из следующих частей (рис. 11): стальной колонки *1*, закрепленной в основании *2*, стола *3* с гайкой *4* подъемного микрометрического механизма с зажимным винтом *5*, кронштейна *6*. Кронштейн с помощью гайки *7* можно перемещать в вертикальном направлении и закреплять винтом в любом положении. Кронштейн имеет отверстия, в которые крепятся датчик ЧИЗ-Д *8* и часовой индикатор *9*.

Во всех случаях измерений поверхность стола *3* должна быть перпендикулярна к линии измерения. На поверхность

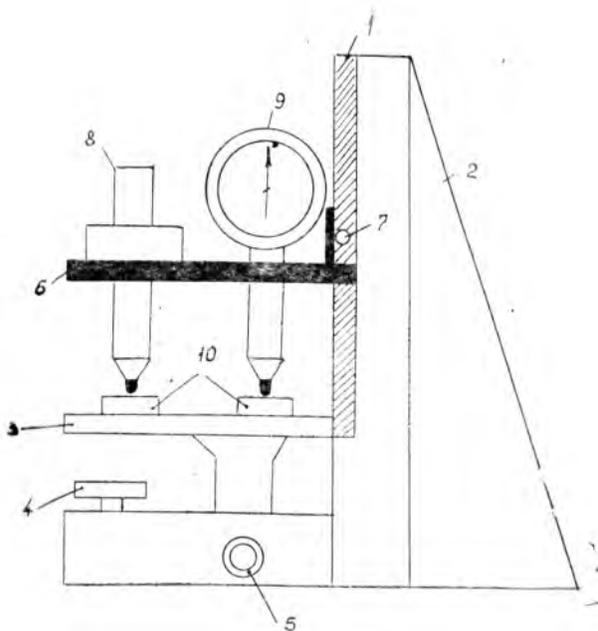


Рис. 11. Общий вид стойки для крепления датчика ЧИЗ-Д

стола кладут плоскопараллельные плитки 10 (5—7 мм) под датчик и индикатор. Стол при помощи подъемного микрометрического механизма (гайка 4) поднимается до тех пор, пока наконечники датчика и часового цилиндра одновременно не войдут в контакт с плитками. Момент контакта фиксируется часовым индикатором, один оборот стрелки которого соответствует 1 мм.

Прибор ЕЗ-3 предназначен для измерения параметров катушек индуктивности. Он состоит из измерительного моста с индуктивно-связанными плечами, генератора, индикатора и блока питания, подключаемого к мосту при измерении катушек с токами подмагничивания (рис. 12).

Измерительная часть ЕЗ-3 состоит из двух блоков, расположенных в общем кожухе друг под другом (рис. 13). В первом блоке помещены генератор и индикатор, в нижнем — мостовая измерительная схема. На переднюю панель блока ин-

дикатора и генератора выведены следующие органы управления и устройства:

ручка переключения частоты, служащая для одновременной коммутации частотных цепей в генераторе и индикаторе «Частота Hz »;

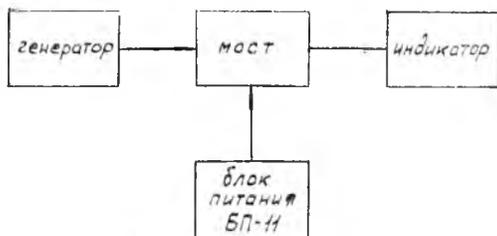


Рис. 12. Блок-схема прибора ЕЗ-3

ручка плавной регулировки выходного напряжения генератора «Напряжение генератора»;

гнездо «Выход генератора»;

ручка регулировки фазы напряжения, подаваемого на вход горизонтального усилителя «Фаза X »;

экран электронно-лучевой трубки;

ручка потенциометра регулировки яркости свечения трубки «Яркость»;

переключатель множителя шкалы вольтметра, «Шкала вольтметра $x1$, $x2$ »;

ручка потенциометра плавной регулировки размера развертки по горизонтали «Усиление X »;

ручка потенциометра плавной регулировки усилителя по вертикали «Усиление Y »;

ручка потенциометра подстройки частоты резонанса избирательной системы индикатора «Подстройка частоты»;

гнездо для подключения индикатора к мосту «Вход Y »;

тумблер включения сети «сеть»;

лампочка индикации включения прибора;

держатели предохранителей 1 А и 0,5 А.

На переднюю панель нижнего блока прибора выведены следующие органы управления:

шкала отсчетного аттенюатора с надписью «Отсчет A »;

нижняя часть шкалы закрыта шильдиком с формулами отсчетных величин;

ручка переключателя диапазонов и шкалы вольтметра «Множитель K_z » и «Пределы шкалы V »;

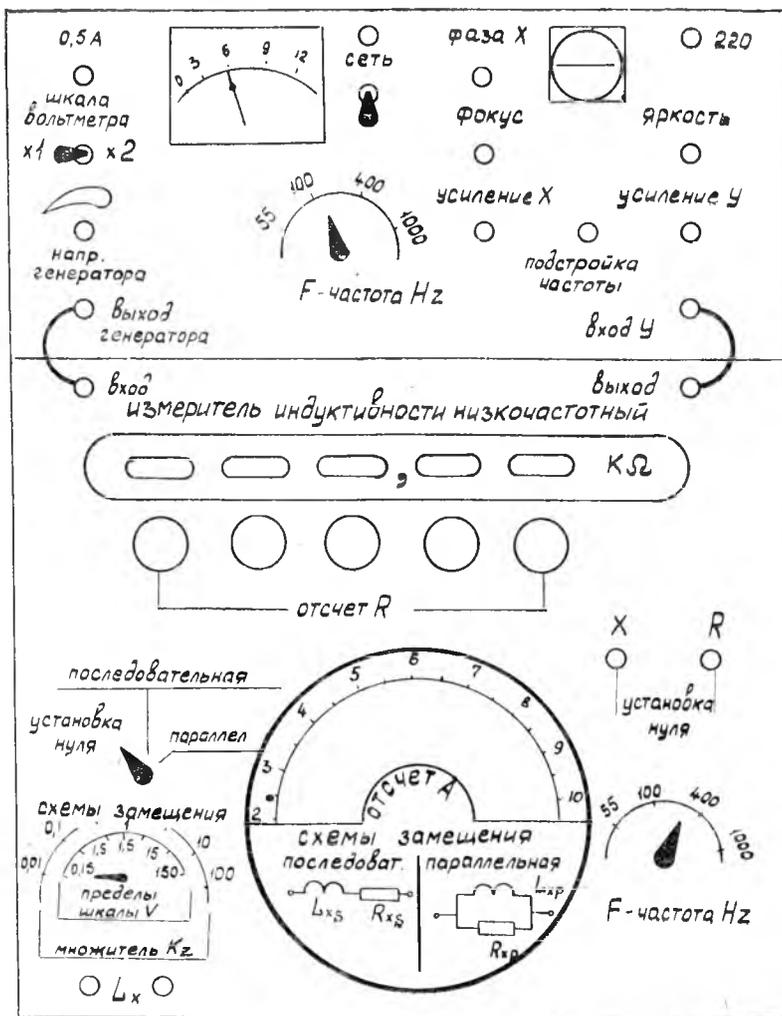


Рис. 13. Передняя панель прибора E3-3

ручка переключателя выбора схемы измерения «Схемы замещения»;

ручка переключателя частотных элементов «F — частота Hz»;

ручка балансировки моста перед измерением «Установка нуля X, R »;

гнезда для подключения измерительного объекта « L_x »;

ручка переключателей магазина активных сопротивлений «Отсчет $R - \kappa\Omega$ »;

гнездо для подключения генератора на вход моста «Вход».

Низкочастотный измеритель индуктивности ЕЗ-3 измеряет индуктивность от 0,1 до 1000 Г на частотах 55 и 100 Гц и от 0,01 до 10 Г на частотах 400 и 1000 Гц.

Прибор позволяет одновременно измерять сопротивление активных потерь катушек индуктивности, добротности которых лежат в пределах от 1 до 100.

Параметры катушек измеряются по последовательной и параллельной схемам замещения в зависимости от добротностей измерительных катушек.

Измеряемая индуктивность как по последовательной, так и по параллельной схемам замещения отсчитывается при уравновешенном мосте по шкале плавного аттенюатора «Отсчет A » умножением на цифру переключателя «Множитель K_z » и величину индуктивности образцовой меры.

Сопротивление активных потерь измеряемой катушки при измерении по последовательной схеме замещения отсчитывается при уравновешенном мосте. Действительное значение его находят перемножением величин

$$R_{Xs} = K_z A (R + R_K),$$

где R_{Xs} — сопротивление катушки в последовательной схеме замещения, Ом;

K_z — отсчет по шкале «Множитель K_z »;

A — отсчет по шкале «Отсчет A ».

Величины R_K на различных частотах:

частота 100 Гц $R_K = 30$ Ом;

400 Гц $R_K = 35$ Ом;

1000 Гц $R_K = 50$ Ом.

Уравновешивание моста определяется по экрану электронно-лучевой трубки, расположенной на передней панели измерителя ЕЗ-3 и производится ручками «Отсчет A », «Отсчет R » и переключателем «Множитель K_z ».

При измерениях с помощью ЕЗ-3 придерживаются следующего порядка:

1. Поставить переключатель «схемы замещения» в положение «Установка нуля», переключатель «Множитель K_z » — 0,01. Регуляторами «Частота H_z » на панели моста и блока ге-

ператора и индикатора установить требуемую частоту. Регулятором «Напряжение генератора» установить по вольтметру требуемое напряжение (5 В) и регулятором «Усиление X » установить требуемое отклонение луча трубки по оси « X » (размах развертки должен быть немного меньше диаметра экрана). Регулятор «Усиление Y » повернуть по часовой стрелке до отказа и регуляторами «Установка нуля» (« X » и « R ») получить на экране горизонтальную линию. Повернуть регулятор «Установка нуля — R » так, чтобы максимальное отклонение от осевой линии составило 2—5 мм. При этом на экране получается наклонная линия или эллипс. В последнем случае поворачивать регулятор «Фаза X » до тех пор, пока на экране не будет наклонная прямая линия. Теперь при вращении регулятора «Установка нуля — R » прямая линия на экране будет вращаться около своей оси. Ручкой «Установка нуля R » вновь добиться горизонтальной линии. При всех указанных выше операциях к выходным гнездам моста « L_x » нельзя подключать объект измерения — они должны быть разомкнуты. При переходе на другую частоту следует повторить все операции, приведенные выше.

При измерении параметров катушек надо установить переключателем «Частота H_z » требуемую частоту, переключатель «Множитель K_z » установить на 0,01. Подключить к гнездам « L_x » объект измерения и регулятором «Напряжение генератора» установить требуемое напряжение 5 В. Переключателем «Схемы замещения» установить требуемую схему. Если на частоте 100, 400, 1000 Гц добротность меньше 17 — последовательную, выше — параллельную. Выбрав схему замещения регулятором «Усиление Y », устанавливают требуемое отклонение по оси « Y » (размах немного меньше диаметра экрана трубки), регулятором «Отсчет R » выбирают сопротивление, близкое к R катушки и, поворачивая «Отсчет A », добиваются получения наклонной прямой на экране. Затем регулятором «Отсчет R » добиваются поворота этой линии в горизонтальное положение. Если нужна большая точность, то поворотом по часовой стрелке регулятора «Усиление Y » устанавливают максимальное отклонение по оси « Y » (меньше диаметра трубки, либо определяемое крайним положением регулятора) и повторяют уравнивание по обем составляющим в указанном порядке.

До измерения обязательно должна быть выполнена операция установки нуля.

Для всех измерений в лабораторной работе $K_z = 0,1$; $L_z = 1$ гн.

Для последовательной схемы $L_{\Sigma} = K_z AL_s$;
 $R_{\Sigma} = K_z A(R_1 + R_k)$; $Q = \omega L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучение конструкции датчиков ИД-0,8 и ЧИЗ-Д.

На препарированных образцах датчиков ИД-0,8 и ЧИЗ-Д изучить конструкции и назначение элементов.

2. Исследование характеристик датчика ИД-0,8. Напряжение на выходных зажимах достигает 150 В. Поэтому, работая с мостом, необходимо соблюдать действующие правила по технике безопасности при работе на электроустановках. Подключения и отключения катушки производить только при выведенном напряжении питания моста, контролируемом вольтметром на передней панели.

Устанавливая давление грузопоршневым манометром (0,1; 0,2; ... 0,8 кг/см²), с помощью моста ЕЗ-3 на частоте 400 Гц снять характеристики $L_1 = f(P)$, $L_2 = f(P)$, а также $R_{s1} = f(P)$, $R_{s2} = f(P)$.

По полученным данным определить $Q_1 = f(P)$; $Q_2 = f(P)$, а также $\Delta L_1 = L_1 - L_0$; $\Delta L_2 = L_2 - L_0$; $\Delta R_{s1} = R_{s1} - R_{s0}$; $\Delta R_{s2} = R_{s2} - R_{s0}$. Свести результаты в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	P , кг/см ²	L_1 , Гн	L_2 , Гн	R_{s1} , Ом	R_{s2} , Ом	Q_1	Q_2	ΔL_1	ΔL_2	ΔR_{s1}	ΔR_{s2}

Установить датчики на нулевое положение ($P=0$). Изменяя частоту питания моста ЕЗ-3, снять зависимость добротности одной из катушек датчика в функции частоты $Q = F(f)$ и занести в табл. 2.

Частота, соответствующая максимальному значению добротности

$$f = 700 \text{ Гц}; Q_{\max} = 3,2.$$

3. Исследование характеристик датчика ЧИЗ-Д. Установить датчик в крайнее положение и, изменяя частоту ИНД-1, снять зависимость $Q = F(f)$ для одной из катушек. занести результаты в табл. 2. Определить частоту, соответствующую максимуму добротности.

Сравнить f_{\max} и Q_{\max} для обеих конструкций датчиков. На частоте f_{\max} снять характеристики $Q_1 = F_1(l)$; $Q_2 = F_2(l)$;

$$L_1 = F_1(l); L_2 = F_2(l).$$

Результаты занести в табл. 3 и найти по $Q(l)$ и $L(l)$ функцию $R_{s1} = F(l)$, $R_{s2} = F(l)$.

Таблица 2

№	f	Q

Таблица 3

№	$l, \text{мм}$	Q_1	Q_2	L_1	L_2	ΔL_1	ΔL_2

Сравнить $L = j(P)$ и $L = j(l)$, а также $R_s = j(P)$ и $R_s = F(l)$ для обеих конструкций ИП.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схематическое изображение датчика ИД-0,8.
2. Графики $L_1 = j(P)$, $L_2 = j(P)$, представленные аналогично рис. 3.
3. Графики $R_{s1} = j(P)$, $R_{s2} = j(P)$, при $f = \text{const}$.
4. График $Q = F(f)$.
5. Схематическое изображение датчика ЧИЗ-Д.

6. Графики $Q_1=f(l)$, $Q_2=f(l)$.
7. Графики $L_1=f(l)$, $L_2=f(l)$.
8. Графики $R_{s1}=f(l)$, $R_{s2}=f(l)$ при $f=\text{const}$.
9. Таблицы с результатами эксперимента и расчета.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие требования предъявляются к входному ИП датчика давления?
2. Изобразите схематично конструкцию индуктивного датчика давления и объясните назначение элементов.
3. Изобразите схематично конструкцию датчика перемещения плунжерного типа и объясните назначение элементов.
4. Какие конструктивные меры принимаются для линеаризации рабочих характеристик выходных ИП датчиков ИД-0,8 и ЧИЗ-Д? Для ИП датчика ИД-0,8 эффективность принятых мер докажите аналитически, для датчика ЧИЗ-Д — графически.
5. Изобразите эквивалентную схему электромагнитного узла индуктивного датчика. Как зависит индуктивность и активное сопротивление от зазора (конструкция ИД-0,8)?
6. Как зависит добротность от частоты? Поясните ответ графически и аналитически.
7. Сопоставьте характеристики датчиков давления и перемещений по чувствительности, линейности и добротности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Д. И. и др. Датчики контроля и регулирования. М., 1965.
2. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. М., «Энергия», 1970.

Составитель *Олег Петрович Скобелев*

ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК

Лабораторная работа № 4

Редактор П. М. Чулкова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Л. М. Соколова

Сдано в набор 17.04.78 г. Подписано в печать 5.06.78 г.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага белая оберточная.
Гарнитура литературная. Высокая печать.
Усл. п. л. 1,45. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 1000 экз.
Заказ № 476. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.
Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.