

**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

$$L = \frac{\Psi}{I}$$

(1)

где  $\Psi$  — потокосцепление катушки;  
 $I$  — ток, проходящий в обмотке.

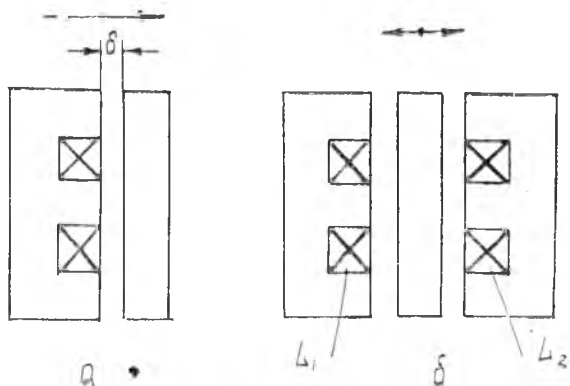


Рис. 1. Конструкции ИП-1: а — недифференциальная; б — дифференциальная

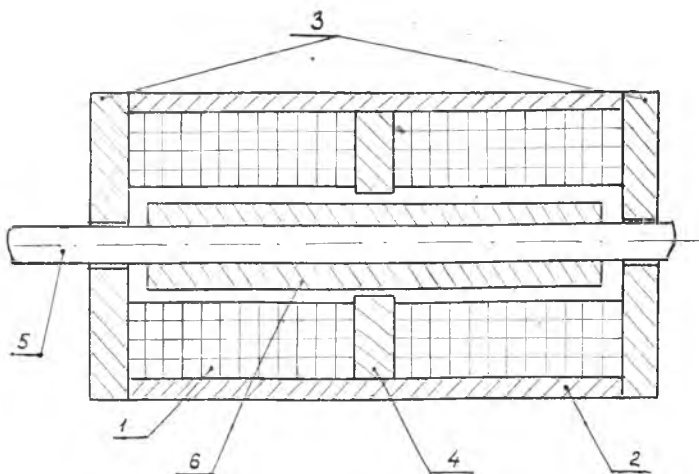


Рис. 2. ИП-2 с ферромагнитным сердечником плунжерного типа

Если пренебречь рассеянием, то

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

где  $\Phi$  — поток, созданный током в сердечнике;

$\omega$  — 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;

$\delta$  — длина зазора;

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

$\mu_0$  — 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  $\Delta L$ :

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

Из (5), (4) следует, что связь  $L$  и  $\delta$  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  $\Delta L$ ,

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

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  $\frac{\delta}{\delta_{\text{ст}}}$ . Это достигается уменьшением длины  $l$  сердечника, увеличением  $\mu_{\text{ст}}$  до возможно большего значения. Но если  $\frac{\delta}{\delta_{\text{ст}}} \ll 1$ , 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%.

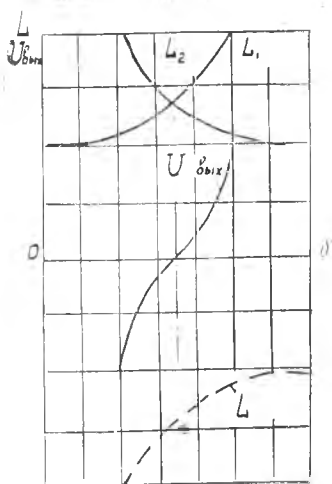


Рис. 3. Зависимость  $U_{\text{вых}}(\delta)$ .  
L.(δ)

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

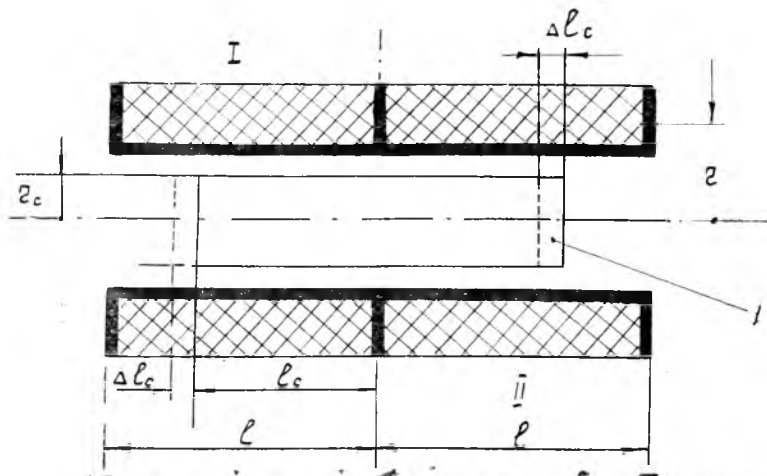


Рис. 4. Модель преобразователя без внешнего магнитопровода



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  $\mu_c$  — 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  $\Delta l_c$ , т. е. при перемещении сердечника внутри катушки на величину  $\Delta l_c$  (см. рис. 4), индуктивность  $L$  получает приращение  $\Delta L$ :

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

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

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

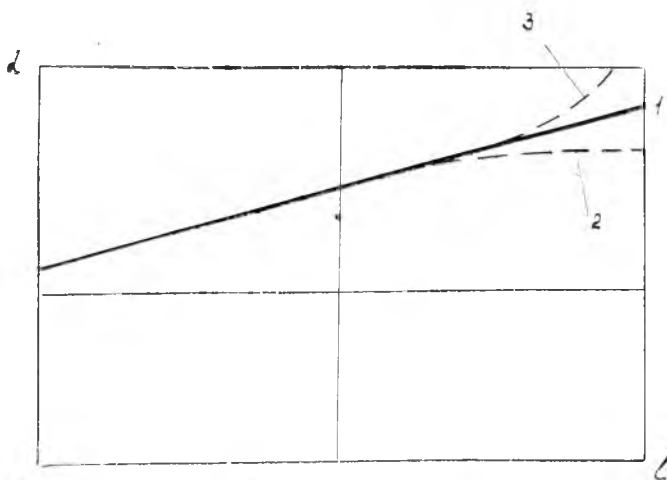


Рис. 6. Характеристика  $L=f(l)$

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  $\Phi$ , следовательно, от величины тока и воздушного зазора.

Эквивалентная схема катушки индуктивности датчика представлена на рис. 7.

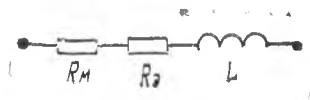


Рис. 7. Эквивалентная схема катушки датчика

Потери в сердечнике на вихревые точки определяются по

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

где  $\sigma_v$  — 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  $\sigma_n$  — 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

$R_{31}$  увеличивается на  $\Delta R_3$ ,

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

Наоборот, при увеличении зазора катушки  $L_2$  эквивалентное сопротивление  $R_{32}$  уменьшается на  $\Delta R_3$ ,

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

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:

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

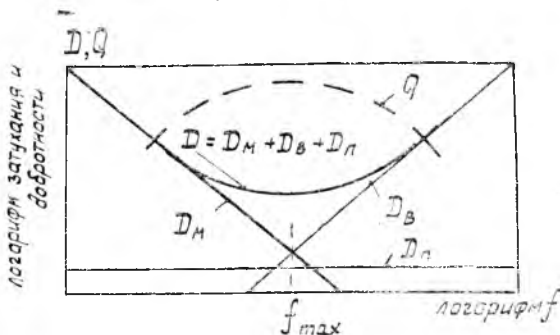


Рис. 8. Зависимость добротности и затухания от частоты

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/см<sup>2</sup>. 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).

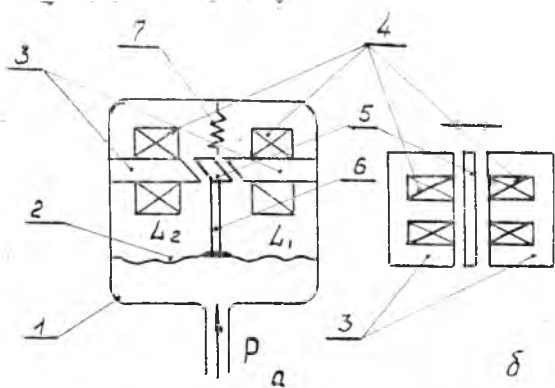


Рис. 9. Конструкция датчика ИД-0,8

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

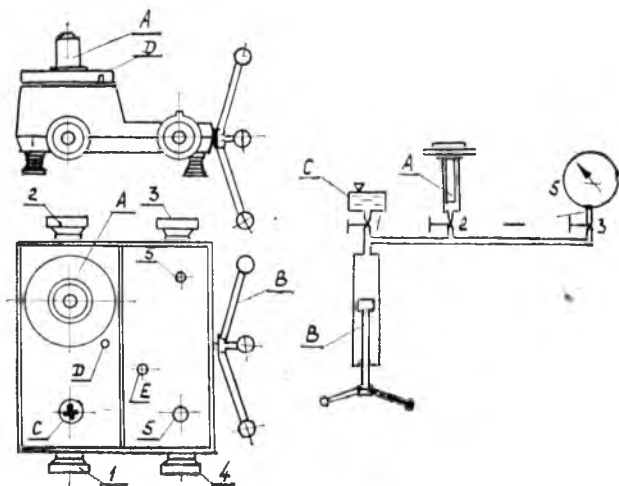


Рис. 10. Общий вид и принципиальная схема манометра МТ-60

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/см<sup>2</sup>.

Поэтому во избежание повреждения давление в насосе не должно превышать 0,8 кг/см<sup>2</sup>. Пределы измерения стрелочного манометра 0—1,0 кг/см<sup>2</sup>.

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



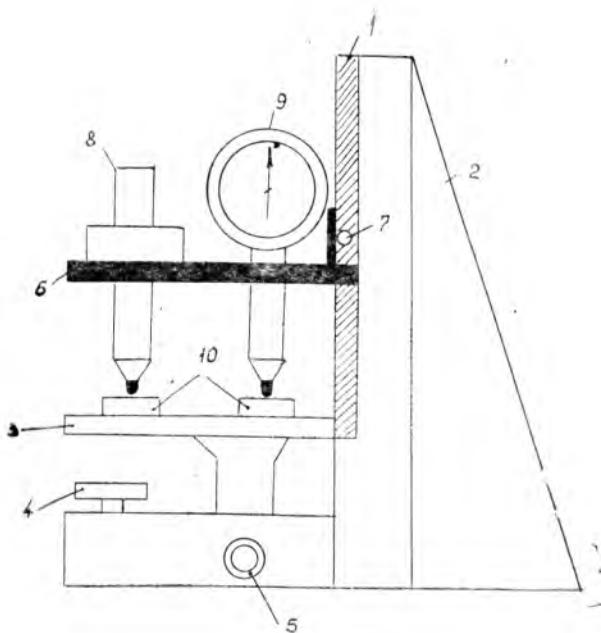


Рис. 11. Общий вид стойки для крепления датчика ЧИЗ-Д

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  $Hz$ »;

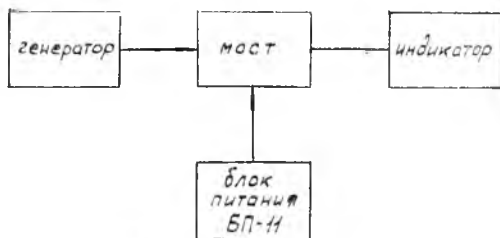


Рис. 12. Блок-схема прибора ЕЗ-3

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  $V$ »;

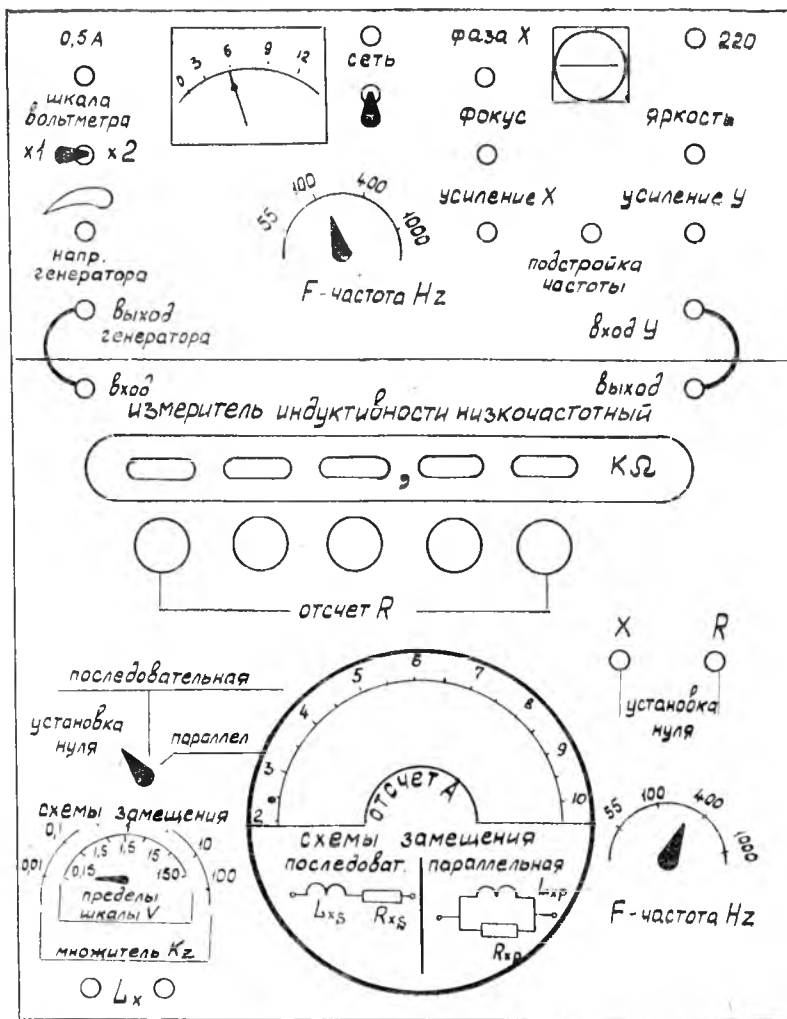


Рис. 13. Передняя панель прибора E3-3

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/см<sup>2</sup>), 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 <sup>2</sup>	$L_1$ , Гн	$L_2$ , Гн	$R_{s1}$ , Ом	$R_{s2}$ , Ом	$Q_1$	$Q_2$	$\Delta L_1$	$\Delta L_2$	$\Delta R_{s1}$	$\Delta R_{s2}$

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

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

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 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. 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.