

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

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

ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ УРОВНЯ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

КУЙБЫШЕВ 1979

ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ УРОВНЯ

Цель работы: изучение конструкции и исследование основных характеристик емкостных датчиков уровня.

Емкостные датчики уровня нашли широкое применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами, экспериментальными исследованиями и производственными испытаниями. Это в значительной степени объясняется исключительной конструктивной простотой, возможностью работы при больших давлениях и температурах, а также в сильно агрессивных средах. В большинстве существующих конструктивных вариантов емкостных датчиков электроды имеют цилиндрическую или плоскую форму. Изменение емкости конденсатора, образованного такими электродами, происходит при изменении степени заполнения межэлектродного пространства средой, диэлектрическая проницаемость которой отличается от диэлектрической проницаемости воздуха.

Среди емкостных датчиков уровня можно выделить две группы: непрерывного и дискретного действия.

В лабораторной работе рассматриваются датчики как первой так и второй группы, предназначенные для преобразования уровня жидкой среды.

Из датчиков первой группы изучаются и исследуются два варианта. В первом электроды выполнены в виде коаксиальных цилиндров (труб), а во втором — в виде плоских пластин, расположенных в резервуаре с жидкостью, уровень которой преобразуется. Как пример датчиков дискретного действия в лабораторной работе рассматривается емкостной преобразователь с плоско-параллельными электродами.

Эквивалентная схема

Эквивалентная схема емкостного датчика приведена на рис. 1. Основным информативным параметром схемы является емкость C_p , которая определяется конструкцией датчика,

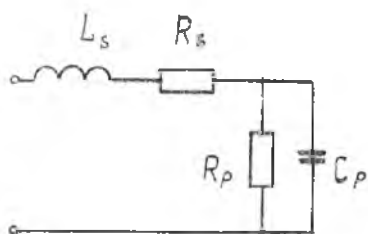


Рис. 1. Эквивалентная схема емкостного датчика

оно становится соизмеримым с сопротивлением X_{Cp} на рабочих частотах измерительных цепей. Кроме того, сопротивление R_p изменяется в широких пределах при изменении температуры.

В эквивалентной схеме (рис. 1) L_s , R_s — индуктивность и активное сопротивление токопроводов. Их влияние проявляется только на очень высоких частотах, намного превышающих рабочие частоты датчиков уровня.

Уравнение преобразования и чувствительность датчика непрерывного действия

На рис. 2 представлен первый вариант конструкции датчика с цилиндрическими электродами. Внутри цилиндр покрыт

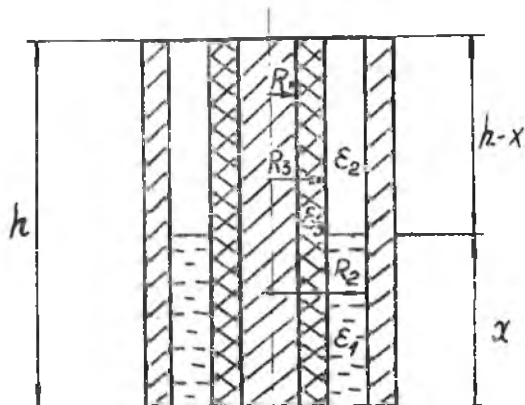


Рис. 2. Конструкция датчика с цилиндрическими электродами

диэлектрической проницаемостью и уровнем жидкости. Сопротивление R_p характеризует потери и утечки в диэлектрике.

В воздухе потери и утечки невелики, сопротивление $R_p \rightarrow \infty$ и его влиянием можно пренебречь. В электропроводных жидкостях величина R_p резко снижается и

слоем диэлектрика для предотвращения замыкания электродов через электропроводную жидкость.

Уравнение преобразования связывает входную величину — уровень жидкости X с выходной емкостью датчика C . С учетом известного выражения емкости коаксиальных цилиндров [1], длина которых существенно больше диаметров, составляется уравнение преобразования. Оно представлено в виде двух слагаемых, характеризующих емкость верхней и нижней частей датчика:

$$C = \frac{2\pi X}{\frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{R_2}{R_3}} + \frac{2\pi(h-X)}{\frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R_2}{R_3}}; \quad (10)$$

где X — уровень жидкости;

h — высота цилиндров;

R_1, R_2, R_3 — радиусы внутреннего, внешнего цилиндра и слоя изоляции;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — диэлектрическая проницаемость жидкости, воздуха и слоя изоляции (соответственно).

Преобразуя выражение (1), получим:

$$C = \frac{2\pi h}{\frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R_2}{R_3}} + SX, \quad (2)$$

$$\text{где } S = 2\pi \left(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{R_2}{R_3}} - \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R_3}{R_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R_2}{R_3}} \right) \quad (3)$$

— чувствительность датчика.

Из выражения (3) следует, что чувствительность возрастает при уменьшении зазора между внешним и внутренним цилиндром. Однако минимум зазора ограничен вязкостью жидкости.

Если слой изоляции отсутствует, то, полагая $R_3 = R_1$, имеем:

$$C = 2\pi h \varepsilon_2 (\ln R_2/R_1)^{-1} + SX, \quad (4)$$

где $S = 2\pi (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (\ln R_2/R_1)^{-1}$. (5)

При $X = 0$ $C = C_{\min} = 2\pi h \varepsilon_2 (\ln R_2/R_1)^{-1}$.

При $X = h$ $C = C_{\max} = 2\pi h \varepsilon_1 (\ln R_2/R_1)^{-1}$.

Из выражения (4) и рис. 3 (зависимость 1) следует, что уравнение преобразования датчика линейно, причем

$$C_{\max}/C_{\min} = \varepsilon_1/\varepsilon_2.$$

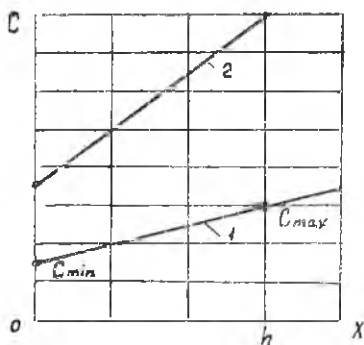


Рис. 3. График уравнений преобразования

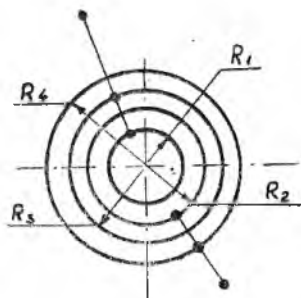


Рис. 4. Конструкция датчика с повышенной высокой чувствительностью

Чтобы увеличить чувствительность датчика, используют несколько коаксиальных цилиндров, которые через один соединяются друг с другом (рис. 4), что эквивалентно параллельному соединению конденсаторов [2].

При этом

$$C = 2\pi X \left(\frac{1}{\varepsilon_1 \ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{\varepsilon_1 \ln \frac{R_3}{R_2}} + \dots \right) + 2\pi (h - X) \left(\frac{1}{\varepsilon_2 \ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{\varepsilon_2 \ln \frac{R_3}{R_2}} + \dots \right)$$

или

$$C = 2\pi h \varepsilon_2 [(\ln R_2/R_1)^{-1} + (\ln R_3/R_2)^{-1} + \dots] + SX,$$

$$\text{где } S = 2\pi (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) [(\ln R_2/R_1)^{-1} + (\ln R_3/R_2)^{-1} + \dots] \quad (6)$$

— чувствительность датчика.

Сравнение формул (5) и (6) показывает, что чувствительность в случае нескольких концентрических цилиндров возрастает. Пусть диаметры цилиндров значительно больше зазора, а число цилиндров равно 4, тогда чувствительность датчика увеличится примерно в 3 раза. Минимальное и максимальное значения емкости также увеличиваются, однако соотношение $C_{\max}/C_{\min} = \varepsilon_1/\varepsilon_2$ сохраняется неизменным (рис. 3, зависимость 2).

На рис. 5 представлен второй вариант емкостного датчика непрерывного действия. Одна из плоских пластин покрыта слоем диэлектрика для работы в электропроводной среде.

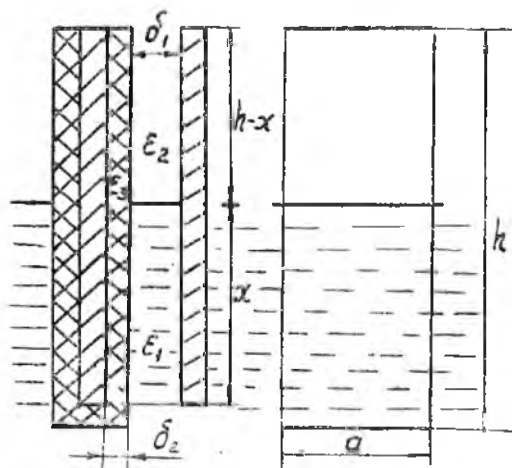


Рис. 5. Конструкция датчика непрерывного действия

При условии, что $\delta < 0,1 a$ уравнение преобразования датчика можно представить в виде двух слагаемых, характеризующих емкость верхней и нижней частей:

$$C = \frac{X a}{\frac{\delta_1}{\epsilon_1} + \frac{\delta_3}{\epsilon_3}} + \frac{(h-X) a}{\frac{\delta_1}{\epsilon_2} + \frac{\delta_3}{\epsilon_3}} = \frac{h a}{\frac{\delta_1}{\epsilon_2} + \frac{\delta_3}{\epsilon_3}} + SX. \quad (7)$$

где X — уровень жидкости;
 a — ширина пластин;
 h — высота;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — диэлектрическая проницаемость жидкости, воздуха и слоя изоляции (соответственно);

$$S = a \left(\frac{1}{\frac{\delta_1}{\epsilon_1} + \frac{\delta_3}{\epsilon_3}} - \frac{1}{\frac{\delta_1}{\epsilon_2} + \frac{\delta_3}{\epsilon_3}} \right) \text{ — чувствительность.}$$

При $\delta_2 \ll \delta_1$ или $\delta_2 = 0$ $C = \frac{h a \epsilon_2}{\delta_1} + XS, \quad (8)$

где $S = \frac{a (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\delta_1}. \quad (9)$

Из выражений (8), (9) следует, что уравнение преобразования представляет собой линейную функцию, а чувствительность определяется размерами пластин и зазором между ними. Чувствительность тем выше, чем меньше зазор, причем величина зазора также ограничена вязкими свойствами жидкости. Чтобы увеличить чувствительность датчиков, собирают батареи конденсаторов, соединяя четные и нечетные пластины, что аналогично соединению концентрических цилиндров на рис. 4.

Уравнение преобразования и чувствительность датчика дискретного действия

Рис. 6 поясняет принцип работы емкостного датчика дискретного действия.

Пластины располагают на расстоянии ΔX — шага квантования. Величина ΔX зависит от точности преобразования уровня. Обычно в таких датчиках высота пластин h меньше ширины a , а зазор $\delta > 0,1 h$. При таких соотношениях выражение (7) не обеспечивает точности расчета, поскольку на величину емкости оказывают влияние краевые эффекты (неравномерность электрического поля в электроде). При этом минимальное значение емкости (в воздухе) можно записать в виде

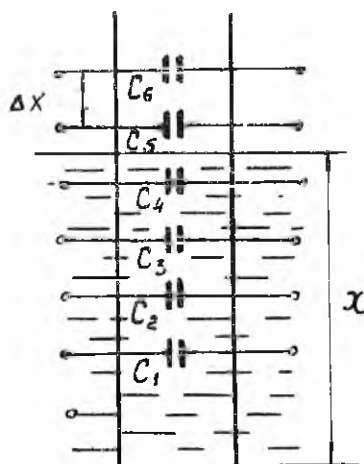


Рис. 6. Конструкция датчика дискретного действия

$$C_{\min} = \frac{ha \epsilon_2}{\delta_1} + \epsilon_2 f(a, h, c, \delta_1),$$

где $f(a, h, c, \delta)$ — некоторая функция, методика определения которой приводится в работе [3];

c — толщина пластины.

Максимальное значение емкости (в жидкости) —

$$C_{\max} = \frac{ha \epsilon_1}{\delta_1} + \epsilon_1 f(a, h, c, \delta_1).$$

Соотношение емкостей определяется соотношением диэлектрической проницаемости жидкости и воздуха:

$$C_{\max}/C_{\min} = \epsilon_1/\epsilon_2.$$

Для увеличения емкостей C_{\max} ; C_{\min} пластины соединяют параллельно, однако их соотношение сохраняется неизменным.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В состав экспериментальной установки входят: емкостные датчики уровня непрерывного и дискретного действия, стенд для исследования основных характеристик датчиков, универсальный мост Е7-4 для измерения индуктивностей, емкостей и сопротивлений.

Конструкции емкостных датчиков уровня

В лабораторной работе изучаются конструкции и исследуются характеристики датчиков емкостных топливомеров.

Конструкция датчика Д-1 представлена на рис. 7. Электроды датчика Д-1 выполнены в виде концентрических цилиндров (труб). Цилиндры профилируются путем вырезания окон различной конфигурации (рис. 8). Профилирование труб не-

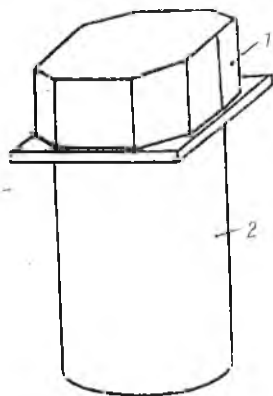


Рис. 7. Общий вид датчика Д-1: 1 — головка с фланцем; 2 — электроды

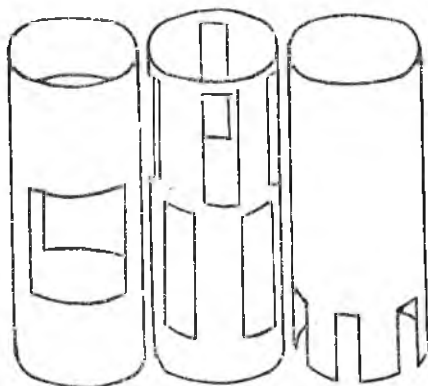


Рис. 8. Различные виды профилированных электродов датчика Д-1

обходимо для того, чтобы получить нужную зависимость изменения рабочей поверхности электродов и емкости конденсатора от высоты уровня топлива с целью согласования характеристики датчика с формой топливного бака.

Датчик Д-1 предназначен для измерения количества топлива V в самолетных топливных баках, имеющих сложную форму, определяемую формой крыла.

Согласование характеристик необходимо для получения линейной зависимости выходного параметра емкости датчика C и количества топлива:

$$C = K V.$$

Если уровень X связан с количеством топлива нелинейной зависимостью

$$X = F(V),$$

определяемой геометрией бака, то для получения пропорциональной зависимости $C = K V$ необходимо, чтобы X и C были связаны функцией

$$X = F\left(\frac{C}{K}\right).$$

Эта функция лежит в основе определения необходимой конфигурации окон, вырезаемых на поверхности труб при их профилировании (рис. 8). Профилированием электродов объясняется нелинейность уравнения преобразования датчика Д-1, получаемого в экспериментах.

На рис. 9 представлена конструкция датчика Д-2. Его электроды выполнены в виде плоских пластин, причем четные и нечетные пластины соединены электрически. Это увеличивает емкость и чувствительность датчика. Ширина пластин в нижней части датчика больше, чем в верхней части, что также связано с формой топливного бака.

На рис. 10 представлен фрагмент конструкции датчика дискретного действия Д-3, которая состоит из трех конденсаторов, набранных из большого числа плоско-параллельных электродов. В реальных датчиках число таких конденсаторов велико и составляет десятки и сотни. В экспериментальной установке определяется минимальное и максимальное значение емкости в воздухе и жидкости.

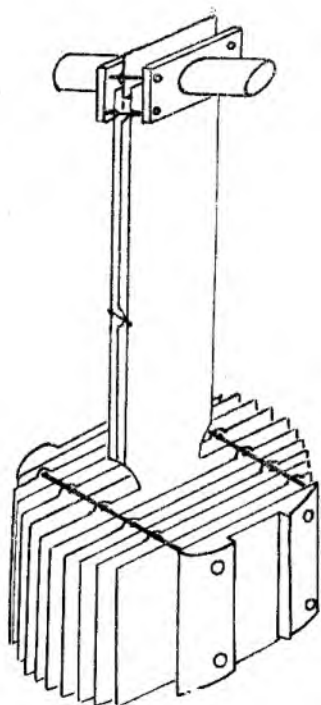


Рис. 9. Общий вид датчика Д-2

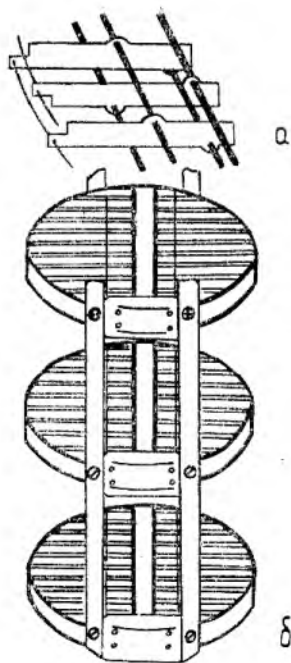


Рис. 10. Датчик Д-3: а— конструкция пластин; б— общий вид

Стенд для исследования основных характеристик датчиков (рис 11).

Датчики Д-1, Д-2, Д-3 крепятся на подвижной панели 1, которая с помощью направляющих стоек 2 и червячной передачи 3 может перемещаться внутри аквариума 5. В аквариуме расположены три химических стакана 4 с керосином. Подвижная панель 6 закрывает аквариум и одновременно служит для крепежа переключателей 7 (П1 и П2), коммутирующих выходы датчиков.

При вращении ручки 8 червячной передачи панель 1 перемещается вместе с датчиками Д-1, Д-2, Д-3, которые поднимаются или погружаются в стаканы с керосином. Это перемещение эквивалентно изменению уровня керосина относительно

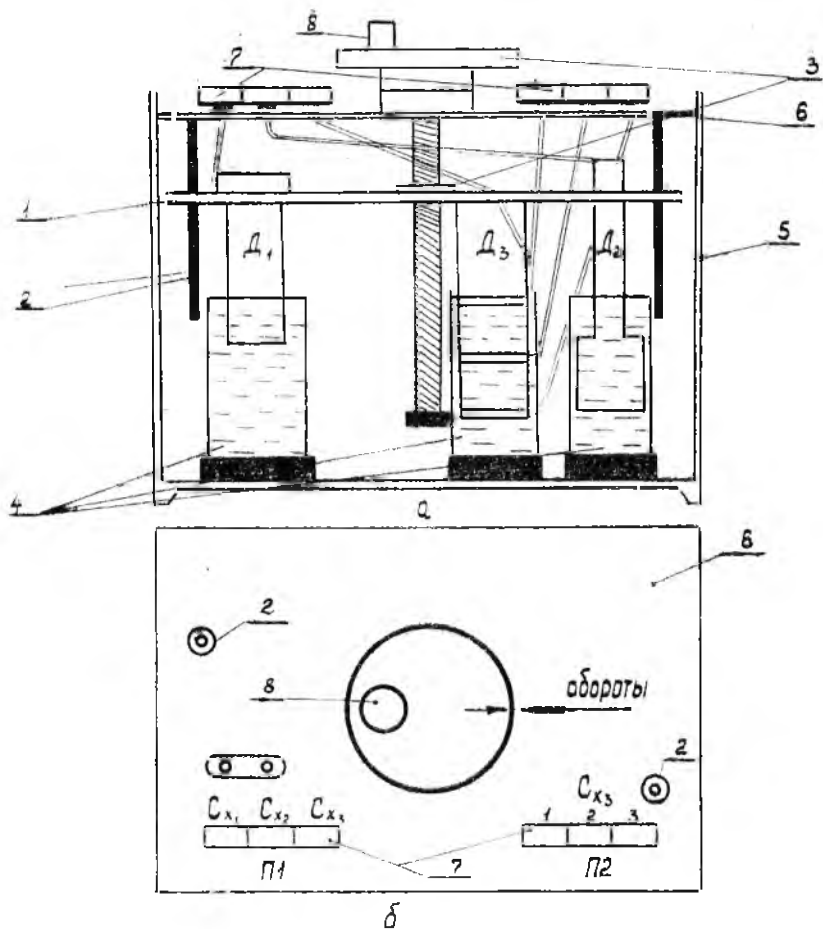


Рис. 11. Стенд для исследования основных характеристик датчиков:
 а — общий вид стенда; б — лицевая панель

но датчиков. Измерение перемещения, а следовательно уровня жидкости, производится по числу оборотов ручки 8, причем одному полному обороту соответствует перемещение датчиков на шаг резьбы, равный 1,5 мм. На рис. 12 представлена схема электрических соединений. С помощью переключателя П1 измеритель емкости Е7-4 соединяется с каждым из трех датчиков. Переключатель П2 обеспечивает выбор одного из конденсаторов датчика Д-3.

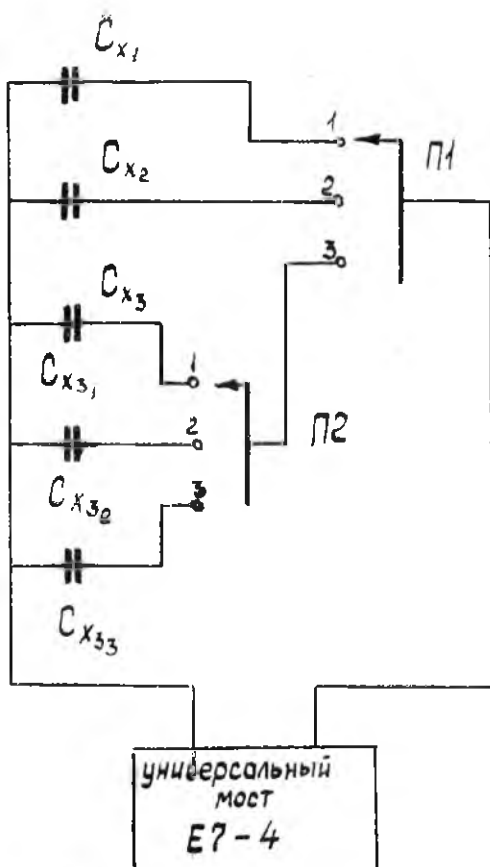


Рис. 12. Схема электрических соединений

Универсальный мост Е7-4

Универсальный мост Е7-4 предназначен для измерения емкости, индуктивности, сопротивления, добротности и тангенса угла потерь (рис. 13). Прибор позволяет измерять величины, приведенные в табл. 1. На переднюю панель прибора выведены следующие органы управления и индикации:

1. Ручка переключателя «ОТСЧЕТ», находящаяся под окном с числами отсчета от 0 до 10 (П1).

Мост универсальный Е7-4

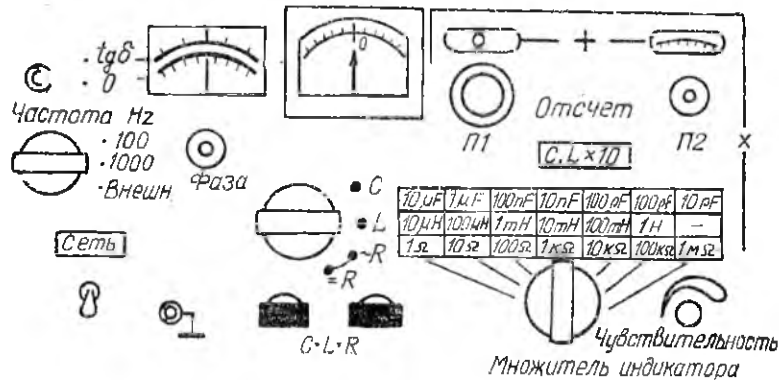


Рис. 13. Общий вид лицевой панели универсального моста Е7-4

2. Ручка переменного резистора «ОТСЧЕТ», расположенная под окном с числами отсчета от 0 до 1 (П2).

3. Ручка переключателя поддиапазонов «МНОЖИТЕЛЬ», расположенная под таблицей с множителями для поддиапазонов.

Таблица 1

| Сопротивление R, Ом | Емкость C, пФ | Индуктивность L, Гн | Добротность Q |
|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------|
| 0,1 ÷ 10 ⁷ | 10 ÷ 10 ⁸ | 10 ⁻⁵ ÷ 100 | 1 ÷ 130 |

4. Ручка переключателя рода работ «C, L, ~ R, —R».

5. Ручка переключателя отсчетных шкал добротности и тангенса угла потерь «tg δ, Q».

6. Ручка переменного резистора «ФАЗА», расположенная под окном со шкалами «tg δ, Q».

7. Ручка переключателя частоты генератора «ЧАСТОТА Hz».

8. Ручка переменного резистора «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИНДИКАТОРА».

9. Тумблер сети со световым табло индикации включения прибора и надпись «СЕТЬ».

10. Гнезда для подключения измеряемого объекта с надписью «C, L, R».

11. Стрелочный индикатор равновесия моста.

12. Клемма общего заземления со знаком $\frac{1}{\text{г}}$

На задней панели моста расположены:

1. Клемма для подключения внешнего генератора.

2. Ручка регулировки напряжения генератора.

3. Корпус предохранителя.

4. Шнур питания.

При измерениях с помощью моста придерживаются следующего порядка:

1. Подготовка прибора к работе:

а) ручка тумблера «СЕТЬ» — в нижнем положении;

б) ручка переключателя «ОТСЧЕТ» (П1) — в положении 3;

в) ручка переменного резистора «ОТСЧЕТ» (П2) — в крайнем левом положении;

г) ручка переключателя «МНОЖИТЕЛЬ» — в крайнем левом положении;

д) ручка переменного резистора «ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИНДИКАТОРА» — в крайнем левом положении;

е) ручка-переключатель «C, L, ~ R, = R» — в положении «~ R»;

ж) ручка переключателя «ЧАСТОТА Hz» — в положении «100»;

з) ручка переключателя «tg δ, Q» — в положении «tg δ»;

и) ручка переменного резистора «ФАЗА» — в крайнем левом положении;

к) ручка переменного резистора «ВЫХ. НАПР. ГЕНЕРАТОРА» — в крайнем правом положении (на задней панели прибора).

2. Порядок работы:

а) включить прибор тумблером «СЕТЬ».

ВНИМАНИЕ! В случае отсутствия контакта переключателей «tg δ Q» «ЧАСТОТА Hz», «ОТСЧЕТ» и «C, L, —R, ~ R» при первом включении произвести повторные включения до появления цепи;

б) измерить емкость.

Измеряемую емкость C_x подключить к зажимам «C-L-R»; установить переключатель «C, L, ~ R, —R» в положение «C»;

установить переключатель «Q, tg δ» в положение «tg δ»;

установить переключатель «ЧАСТОТА Hz » в положение «1000»;

ручкой «Чувствительность индикатора» установить стрелку прибора в пределах $2/3$ шкалы;

ручкой переключателя «МНОЖИТЕЛЬ» добейтесь минимального показания прибора.

Постепенно увеличивая чувствительность до максимальной, но так, чтобы стрелка прибора оставалась в пределах шкалы, ручками, объединенными надписью «ОТСЧЕТ» П1 и П2 и «ФАЗА» добейтесь наименьшего показания на указателе равновесия.

Произвести отсчет измеряемой величины емкости и $\operatorname{tg} \delta$. Измеренная величина емкости равна сумме отсчетов по шкалам переключателя (П1) и потенциометра «ОТСЧЕТ» (П2), умноженной на соответствующий множитель. Измеренная величина тангенса угла потерь отсчитывается непосредственно по шкале $\operatorname{tg} \delta$.

При измерении емкости в диапазоне $10^{-5} - 10^{-4}$ мкФ отсчет $\operatorname{tg} \delta$ необходимо разделить на 10.

Техника безопасности

Внутри прибора имеется напряжение 220 В. При работе с прибором следует заземлить клемму $\frac{1}{III}$, расположенную на передней панели прибора.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Изучить конструкции датчиков Д-1, Д-2, Д-3.
2. Изучить стенд для исследования основных характеристик датчика, описание универсального моста Е7-4 и инструкцию по эксплуатации Е7-4.
3. Снять характеристику $C = f(X)$ датчиков Д-1, Д-2. Перемещение X определяется числом оборотов n и шагом резьбы червячной передачи $t = 1.5$ мм ($X = nt$). В процессе измерений используется переключатель П1 (положение 1-Д-1, положение 2-Д-2). Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

| № п.п. | $X = nt$ мм | C_{x_1} | C_{x_2} |
|--------|----------------|-----------|-----------|
| | | | |

4. Определить соотношение C_{\max}/C_{\min} для каждого из трех конденсаторов датчика дискретного действия (Д-3). В процессе измерений используются переключатели П2 и П1. Результаты измерений внести в табл. 3.

Таблица 3

| Параметр | Номер конденсатора | | |
|---------------------|--------------------|-----|-----|
| | 3—1 | 3—2 | 3—3 |
| C_{\max} | | | |
| C_{\min} | | | |
| C_{\max}/C_{\min} | | | |

5. Отчет должен содержать:

схематическое изображение стенда для исследования характеристик датчика;

таблицы результатов измерений;

характеристики $C = f(X)$ для датчиков Д-1 и Д-2 с указанием максимальной и минимальной чувствительности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К СОБЕСЕДОВАНИЮ

1. Поясните конструкцию емкостных датчиков уровня непрерывного и дискретного действия.

2. С какой целью на поверхности цилиндрических электродов выполняются окна различной конфигурации?

3. Проанализируйте уравнение преобразования датчика с электродами в виде цилиндров и плоских пластин.

4. Как повысить чувствительность емкостных датчиков уровня?

5. Стенд для исследования характеристик емкостного датчика уровня. Назначение элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боднер В. А. Авиационные приборы. М., 1969.
2. Браславский Д. А. Приборы и датчики летательных аппаратов. М., 1970.
3. Феррейр Н. Емкостные датчики нелинейных величин. М., 1966.

Составитель *Олег Петрович Скобелев*

ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ УРОВНЯ

Лабораторная работа № 1

Редактор Н. К а с а т к и н а
Техн. редактор Н. К а л е н ю к

Сдано в набор 15.5.79 г. Подписано в печать 7.6.79 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага газетная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. п. л. 0,97.
Уч.-изд. л. 0,93. Тираж 500 экз. Бесплатно. Заказ № 584.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт им. С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.