

Министерство высшего и среднего  
специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ имени С. М. КИРОВА

---

Метрология.

Технологические измерения отрасли



# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности 21.03

ЛЕНИНГРАД  
1990

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания составлены для лабораторных работ по измерительным преобразователям. Эти работы позволяют студентам изучить конструкции, принцип действия, в основном, преобразователей перемещения, рассчитать и исследовать их статические характеристики, аппроксимировать статические характеристики обычным «ручным» методом и с помощью ЭВМ. В результате студенты должны знать особенности изучаемых преобразователей, области их применения на лесопромышленных комплексах.

### Лабораторная работа № 1

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Цель работы:** изучить конструкции, принцип действия, схемы включения, основные характеристики и параметры резистивных преобразователей.

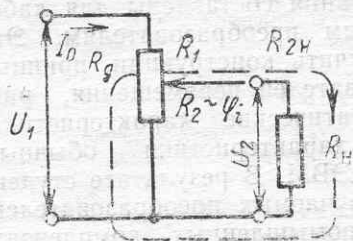
#### Описание лабораторной установки

Резисторным преобразователем называют резистор, движок которого перемещается в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины. Входной величиной резисторных преобразователей является перемещение движка, которое может быть либо угловым, либо линейным, а выходной величиной активное сопротивление.

Простейшие резисторные преобразователи состоят из проволочных реостатов с непрерывной обмоткой и движка, скользящего по свободной от изоляции поверхности. Обмотка из манганина, константана или сплавов наматывается на плоские, цилиндрические или кольцевые каркасы из изоляционного материала. Наряду с общими требованиями к измерительным преобразователям к резисторным преобразователям предъявляются индивидуальные: плавное изменение сопротивления между подвижным и неподвижным контактами, малая зависимость сопротивления резистора от режима окружающей среды, малое усилие, необходимое для переме-

щения подвижного контакта, устойчивость к коррозии, износу и др.

Резисторные преобразователи включаются по реостатной потенциметрической, потенциметрической с отводом и мостовой схемам. Наиболее распространенной является потенциметрическая схема (рис. 1.1). В этой схеме сопротивление датчика  $R_d$  подключается к источнику постоянного напряжения  $U_1$ . Измеряемый сигнал снимается с движка.



Представляя преобразователь как делитель напряжения  $R_d = R_1 + R_2$ , можно записать для выходного напряжения

Рис. 1.1. Потенциметрическая схема включения резисторного преобразователя

$$U_{2н} = U_1 \frac{R_{2н}}{R_{2н} + R_1}, \quad (1.1)$$

где  $R_{2н}$  — эквивалентное сопротивление параллельных сопротивлений  $R_2$  и  $R_n$ ;  $R_n$  — сопротивление нагрузки (например, вольтметра),

$$R_{2н} = \frac{R_2 R_n}{R_2 + R_n}, \quad (1.2)$$

Подставляем (1.2) в (1.1), получаем

$$U_{2н} = U_1 \frac{\frac{R_2 R_n}{R_2 + R_n}}{R_1 + \frac{R_2 R_n}{R_2 + R_n}} = \frac{R_2 R_n}{R_1 R_2 + R_1 R_n + R_2 R_n}. \quad (1.3)$$

Так как  $R_2 = x R_d$  и  $R_1 = (1-x) R_d$ , где  $x$  — в относительных единицах перемещение подвижного контакта, то подставляя их в (1.3), имеем

$$U_{2н} = U_1 \frac{x}{1 + x(1-x)\alpha}, \quad (1.4)$$

где  $\alpha = R_d/R_n$ ,  $x = R_2/R_d = \varphi_i/\varphi_d$ ,  $\varphi_i$  — текущее значение угла поворота,  $\varphi_d$  — полный угол поворота датчика.

При ненагруженном датчике ( $R_n = \infty$ ) выходное напряжение

$$U_2 = U_1 x = U_1 \cdot R_2/R_d = U_1 \cdot \varphi_i/\varphi_d. \quad (1.5)$$

Зависимость  $U_2=f(\varphi)$  линейна, а зависимость  $U_{2н}=f(\varphi)$  нелинейна.

Приведенная погрешность от нелинейности

$$\delta_U = \frac{U_2}{U_1} - \frac{U_{2н}}{U_1} = \frac{x^2(1-x)\alpha}{1+x(1-\alpha)\alpha}. \quad (1.6)$$

Малая приведенная погрешность (практическая линейная зависимость) достигается при условии  $\alpha=R_d/R_n=0,1 \div 0,01$ .

Пренебрегая в знаменателе выражения (1.6) членом  $\alpha x(1-x)$ , т. к.  $\alpha < 1$ ,  $x < 1$ , получаем

$$\delta_U = \alpha x^2(1-x). \quad (1.7)$$

Величину  $\delta_{U_{max}}$  можно найти, подставляя в (1.7) экстремальное значение функции. Схема макета лабораторной установки приведена на рис. 1.2.

С помощью переключателя  $S1$  в первом положении коммутируется потенциометрическая схема, во втором — потенциометрическая с отводом и в третьем — мостовая. Питание  $R_d$  и  $R_3$  осуществляется от источника стабилизированного напряжения на стойке, причем величину этого напряжения нужно принимать 2...5 В. Переключателем  $S2$  коммутируется сопротивление нагрузки  $R_n$ , значения которого указаны на макете. Выходное напряжение измеряется с помощью лампового вольтметра ВК7-9. Выходное напряжение для потенциометрической схемы совпадает по знаку с питающим, т. е. преобразование однополярное. В схеме с отводом для выходного напряжения справедливо выражение (1.4) при изменении  $x$  от 0 до  $\pm 0,5$ . Выходной сигнал для потенциометрической с отводом и мостовой схем двуполярный.

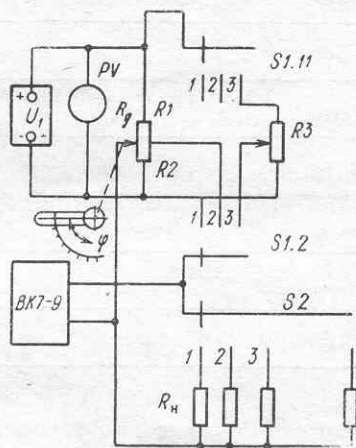


Рис. 1.2. Схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

1. Подключить лабораторный макет согласно рис. 1.2. Включить источник питания, ламповый вольтметр и прогреть их в течение 5 мин.

2. Исследовать статическую характеристику потенциометрической схемы включения резисторного преобразователя.

2.1. Рассчитать и занести в табл. 1.1 значения для выходного напряжения  $U_2$  и  $U_{2н}$  при  $R_n = \infty$  и  $R_n$  по величине, соизмеримой с сопротивлением датчика  $R_d = 47$  кОм ( $R_n = 20 \div 60$  кОм).

Каждый студент делает расчет для своего сопротивления нагрузки по формулам (1.4) и (1.5).

Таблица 1.1

$\varphi_i$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$x$												
$U_2$ расч												
$U_{2н}$ расч												
$\delta U_{расч}$												
$U_2$ эксп												
$U_{2н}$ эксп												
$\Delta U_{эксп}$												
$\delta U_{эксп}$												

2.2. Экспериментально получить  $U_2$  и  $U_{2н}$  для тех же значений сопротивлений нагрузки. Переключатель  $S1$  установить в положение 1, а переключатель  $S2$  в положение соответствующего  $R_n$ . Значения  $\Delta U_{эксп}$ ,  $\delta U_{эксп}$  определяются из выражений  $\Delta U_{эксп} = U_{2 эксп} - U_{2н эксп}$ ,  $\delta U_{эксп} = \frac{\Delta U_{эксп}}{U_2}$ .

3. Экспериментально исследовать статические характеристики потенциометрической схемы с отводом при тех же сопротивлениях нагрузки (переключатель  $S1$  в положении 2). Результаты занести в табл. 1.2.

4. Аналогично п. 3 произвести экспериментальные исследования мостовой схемы включения. Результаты занести в таблицу, аналогичную табл. 1.2.

$\varphi_i$	0	15	45	75	105	135	165
-------------	---	----	----	----	-----	-----	-----

Положительное направление

$U_2$

$U_{2н}$

Отрицательное направление

$U_2$

$U_{2н}$

### Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.

2. Результаты расчетов при исследовании потенциометрической схемы включения и экспериментальных зависимостей потенциометрической с отводом и мостовой схемы.

3. Графики зависимостей  $U_2=f(\varphi)$ ;  $U_{2н}=f(\varphi)$ ;  $\delta U=f(\varphi)$  для исследуемых схем и расчетных зависимостей.

4. Вывод к работе.

### Контрольные вопросы

1. Конструкция, принцип действия резисторных преобразователей?

2. Причина отклонения статической характеристики от линейной зависимости при малых сопротивлениях нагрузки?

3. Соотношение  $R_n$  и  $R_d$ , при котором статическая характеристика линейна?

4. Как определить максимальную приведенную погрешность от нелинейности статической характеристики при малых  $R_n$ ?

5. Что такое чувствительность измерительного преобразователя, чувствительность измерительной схемы?

6. Примеры применения резисторных преобразователей в деревообрабатывающей промышленности.

# Лабораторная работа № 2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА

**Цель работы:** изучение принципа действия, характеристики, точности индуктивного датчика.

### Описание лабораторной установки

Схема установки для исследования индуктивного датчика представлена на рис. 2.1. Генератор звуковой частоты  $G$  через развязывающий трансформатор  $T$  питает мостовую измерительную схему с выходом на постоянном токе. Плечи

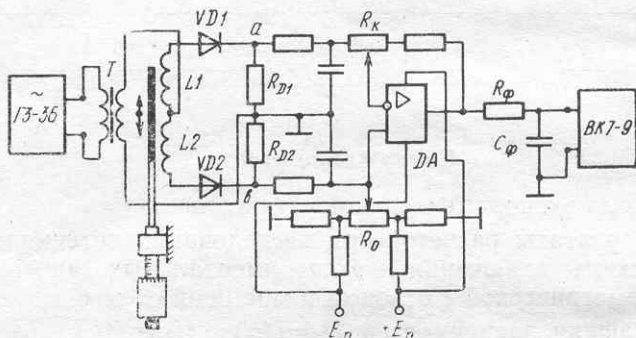


Рис. 2.1. Схема установки для исследования

моста составлены из индуктивностей  $L_1$ ,  $L_2$  датчика и резисторов  $R_{D1}$ ,  $R_{D2}$ , а также диодов  $VD1$ ,  $VD2$ . Выходной сигнал измерительной схемы с точек  $a$ ,  $b$  через сглаживающие цепи  $RC$  подается на нормирующий усилитель на операционном усилителе  $DA$ . С помощью резисторов установки нуля  $R_0$  и калибровки  $R_k$  необходимо добиться изменения выходного сигнала в одном из рекомендуемых ГСП диапазонов —  $-1 \div 0 \div 1$  В. Расчет плунжерного датчика сложен из-за сложности распределения его поля, поэтому рассмотрим вариант расчета, основанный на использовании экспериментальных зависимостей  $L_1 = f_1(x)$ ,  $L_2 = f_2(x)$ . Из курса электротехники известно, что индуктивности катушек зависят не только от числа витков  $W$ , но и степени их связи. При согласованном включении катушек магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции совпадают по направлению, что эквивалентно увеличению их индуктивности и наоборот. Поэтому чув-

ствительность датчика будет зависеть от степени связи между катушками, а также от того, как они включены — встречно или согласно. Для повышения чувствительности стараются при разработке датчика уменьшить индуктивную связь между катушками, экранируя их друг от друга. В работе студентам предлагается измерить (при среднем положении сердечника) индуктивность каждой катушки  $L_1(x_0)$  и  $L_2(x_0)$ , а также их взаимную индуктивность  $M$ . Последнюю можно вычислить по результатам измерения индуктивности последовательно соединенных катушек при согласном  $L_c$  и встречном  $L_b$  включении:

$$M = \frac{L_c - L_b}{4}.$$

Если значение  $M$  не превышает 5% от  $(L_c + L_b)/2$ , дальнейший анализ можно проводить без учета взаимоиндукции. Необходимо, отключив датчик от схемы, исследовать зависимости индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  от положения сердечника  $x$ . Значение  $x_0$ , при котором  $L_1(x_0) = L_2(x_0)$ , следует принять за начальное.

В результате предварительной самостоятельной работы студент должен получить уравнения и программу для расчета зависимости напряжений в точках  $a$  и  $b$  от положения плунжера. Расчет напряжения на резисторах  $R_{D1}$ ,  $R_{D2}$  от положения источника синусоидального сигнала осложняется наличием в цепи нелинейностей в виде диодов. Примем, что диоды имеют идеальные характеристики, т. е. при положительной полуволне они имеют нулевое сопротивление, а при отрицательной — бесконечно большое. Тогда ток в цепи  $L_1$ ,  $VD1$ ,  $R_{D1}$  можно рассчитать, например, с помощью интеграла Дюамеля:

$$i(t) = U(0)y(t) + \int_0^t U'(\tau)y(t-\tau)d\tau = 0,$$

где  $U(\tau) = U_m \sin \omega_0 t$ ;  $U'(\tau) = \omega_0 U_m \cos \omega_0 \tau$ ;  $U_0 = 0$ ;  $\omega_0 = 2\pi f$ ,  $f$  — частота генератора, Гц;  $y(t) = 1/R \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$  — переходная функция тока цепи, составленной из  $L$  и  $R$ ;  $R$  — общее активное сопротивление цепи;

$$y(t-\tau) = 1/R \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-\tau)} \right].$$



Подставляя эти уравнения в интеграл Дюамеля, имеем

$$i(t) = 0 + \int_0^t \omega_0 U_m \cos \omega_0 \tau \cdot 1/R \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-\tau)} \right] d\tau =$$

$$= \frac{\omega_0 U_m}{R} \left[ \left( \frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right)_0^t - e^{-\frac{R}{L}t} \int_0^t e^{-\frac{R}{L}\tau} \cos \omega_0 \tau d\tau \right].$$

Интеграл в правой части является табличным вида

$$\int e^{ax} \cos bx dx = \frac{a \cos bx + b \sin bx}{a^2 + b^2} e^{ax}.$$

Подставляя, после преобразований имеем

$$i(t) = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}} \left[ \sin(\omega_0 t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t} \right],$$

где  $\varphi = \text{arctg} \frac{\omega_0 L}{R}$ .

$$U_a(t) = i(t, L_1) \cdot R_{D1},$$

Отсюда

$$U_b(t) = i(t, L_2) \cdot R_{D2}.$$

Наличие фильтров и очень высокое выходное сопротивление усилителя приводит к заряду конденсатора фильтра до максимального напряжения  $U_{a \max}$  и  $U_{b \max}$ .

Аналитическое определение максимального значения импульсов  $U_a(t)$  и  $U_b(t)$  сложно, т. к. требует решения трансцендентного уравнения. Поэтому студентам предлагается составить программу построения графиков  $U_a(t)$  и  $U_b(t)$  для микроЭВМ и «Электроники БК 0010» или другого типа и определить эти значения графически. Приближенно можно считать, что максимум имеет место в момент, когда выполняется условие  $\omega_0 t - \varphi = \pi/2$ , т. е. при  $t = \frac{\varphi + \pi/2}{2\pi f}$ . В результате такого расчета должен быть получен график зависимости  $U_{bx} = U_{a \max} - U_{b \max}$  от положения сердечника  $x$ , т. е. статическая характеристика измерителя. Однако в этих расчетах мы не учли такие факторы, как влияние потерь на вихревые токи, наличие емкостной составляющей сопротивления катушек, неидеальность питающего генератора, неидеальность диодов и др. Все это приводит к отличию расчетной характеристики от экспериментальной.

Прежде всего необходимо оценить оптимальную частоту генератора, для чего сдвинуть сердечник относительно нейтральной точки, исследовать, как изменяется выходной сигнал в зависимости от частоты генератора и при какой частоте он максимален. Затем надо исследовать экспериментальную характеристику схемы и оценить ее погрешность.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить взаимную индуктивность катушек  $L_1$  и  $L_2$  и индуктивности их при центральном положении сердечника.
2. Исследовать зависимость индуктивности катушек  $L_1$  и  $L_2$  от положения сердечника.
3. Занести и отладить программу расчета статической характеристики.
4. Собрать схему лабораторной установки.
5. Установить сердечник в центральное положение  $x_0$ , резистором  $R_0$  установить нулевой выходной сигнал.
6. Определить оптимальную частоту генератора.  $u = f(f)$
7. Установить сердечник в одно из крайних положений и затем резистором  $R_k$  добиться выходного напряжения в 1 В.
8. Исследовать статическую характеристику установки.  $u = f(x)$
9. Оценить погрешность измерителя, назначить класс точности.

### Содержание отчета

1. Схема измерения индуктивности и взаимной индуктивности катушек, результаты измерений.
2. Зависимости  $L_1(x)$  и  $L_2(x)$  в виде таблиц и графиков.
3. Аналитическое выражение для напряжений  $U_a(t)$  и  $U_b(t)$  отлаженной погрешности вычисляется по статической характеристике измерителя.
4. График зависимости выходного напряжения от частоты  $U = F(f)$  и значение оптимальной частоты.
5. Таблица и график статической характеристики при оптимальной частоте генератора.
6. Вычисление номинальной статической характеристики методом наименьших квадратов, оценка погрешности и класса точности в соответствии с приложением.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия индуктивного датчика.
2. Почему чувствительность датчика имеет максимум на некоторой частоте?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Цель работы:** изучить принцип действия, конструкцию, характеристики, параметры, схемы включения и особенности применения емкостного преобразователя.

## Описание лабораторной установки

Емкостные преобразователи представляют собой электрические конденсаторы, емкость которых зависит от площади перекрытия обкладок  $S$  (см<sup>2</sup>), диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ , расстояния между обкладками  $h$  (см). Для плоскопараллельного емкостного преобразователя

$$C = \frac{\epsilon S}{h}.$$

В общем случае изменение параметров измерительного преобразователя имеет вид

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \epsilon} d\epsilon + \frac{\partial C}{\partial S} dS + \frac{\partial C}{\partial h} dh,$$

Переходя к конечным приращениям, имеем

$$\Delta C = \frac{S_0}{h_0} \Delta \epsilon + \frac{\epsilon_0}{h_0} \Delta S - \frac{\epsilon_0 S_0}{(h + \Delta h)^2} \Delta h$$

или

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{1}{(1 + \Delta h/h_0)^2} \frac{\Delta h}{h_0},$$

где  $C_0$ ,  $\epsilon_0$ ,  $S_0$ ,  $L_0$  — соответственно начальные значения емкости, диэлектрической проницаемости, площади пластин, и расстояния между ними.

В лабораторной установке исследуется емкостный преобразователь угла поворота, состоящий из механического устройства перемещения подвижной секции преобразователя и электрической схемы измерения его емкости.

Преобразователь представляет собой конденсатор переменной емкости, одна из пластин которого неподвижна, а другая поворачивается относительно нее на измеряемый угол. Вследствие изменения площади перекрытия меняется емкость между ними, которая и является мерой угла поворота. Поскольку одним из преимуществ емкостного преобразователя является возможность измерения высокочастотных перемещений (вибраций) в лабораторной установке применена высокочастотная измерительная схема, которая позволяет производить измерения перемещений, если их частота примерно на порядок ниже частоты питающего преобразователя напряжения. Питающее преобразователь напряжение от высокочастотного генератора через разделительный кон-

денсатор  $C_0$  подается на параллельный резонансный контур, состоящий из емкостного преобразователя  $C_1$ , подстроечного конденсатора  $C_2$  и катушки индуктивности  $L$  (рис. 4.1). При изменении емкости преобразователя сопротивление контура на частоте питания резко меняется. При начальной расстройке контура, когда рабочая точка находится в точке перегиба

резонансной кривой, малые изменения емкости вызывают пропорциональные изменения напряжения на контуре, поэтому статическая характеристика схемы оказывается линейной. Она описывается выражением

$$U = U_0 \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 \Delta C^2}},$$

Рис. 4.1. Схема макета лабораторной установки

где  $U_0$  — напряжение питания;  $R$  — эквивалентное сопротивление потерь контура;  $\omega = 2\pi f$ ;  $\Delta C$  — изменение емкости преобразователя,  $\Delta C = C - C_p$ ;  $C_p$  — емкость преобразователя при резонансе;  $C$  — текущее значение емкости.

Высокочастотное напряжение детектируется последовательным амплитудным детектором на диоде  $VD$  и конденсаторе  $C_3$ . Выпрямительное напряжение подается на ламповый вольтметр ВК7-9.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему в соответствии с рис. 4.1 и включить приборы для прогрева.

2. Исследовать частотную характеристику резонансного контура при нулевом угле поворота преобразователя, для этого:

$$U = f(f)$$

2.1. Установить напряжение высокочастотного генератора, равное 1 В, и, изменяя его частоту, снять показания лампового вольтметра. Данные занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

$f$

$U$

2.2. Построить резонансную кривую контура и определить частоты точек перегиба и сопротивление потерь  $R$ . Частоты точек перегиба кривой  $f_1$  и  $f_2$  определяются графически, а сопротивление по формуле  $U = 0,707 \cdot U_p$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad R = \omega_p LQ, \quad (4.1)$$

где  $\omega_p$  — резонансная частота контура;  $Q = \frac{f_p}{f_2 - f_1}$  — добротность контура.

3. Рассчитать и исследовать статическую характеристику преобразователя:

3.1. Рассчитать статическую характеристику емкостного преобразователя  $U = f(\Delta C)$  по формуле (4.1) и расчетные данные занести в табл. 4.2. Расчеты и эксперимент проводить для одной половины резонансной кривой.

3.2. Получить экспериментальную статическую характеристику емкостного преобразователя. Для этого, изменяя положение его ротора, снять показания лампового вольтметра. Данные занести в табл. 4.2.

$$C_p = 254 \text{ [нФ]}$$

Таблица 4.2

$\alpha$
$\Delta C$
$U_{\text{эксп}}$
$U_{\text{расч}}$

3.3. Экспериментальную статическую характеристику аппроксимировать методом наименьших квадратов.

### Содержание отчета

1. Схема лабораторной установки.
2. Частотная характеристика преобразователя и ее параметры  $f_p, f_1, f_2$  (точки перегиба).
3. Статические характеристики емкостного преобразователя  $U_2 = f(\Delta C)$  — расчетные и экспериментальные.
4. Результаты аппроксимации экспериментальной статической характеристики.
5. Выводы к работе.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ТОЛЩИНОМЕРА

**Цель работы:** изучить конструкцию, принцип действия, области применения вихревого толщиномера, произвести его настройку и градуировку.

#### Описание лабораторной установки

Вихревой датчик толщины представляет собой высокочастотный индуктивный преобразователь с катушкой индук-

тивности  $L$ , намотанной на ферромагнитном сердечнике (рис. 6.1), питаемый ток высокой частоты. В качестве якоря используется базовая (неподвижная) металлическая поверхность (пластина). В зависимости от расстояния  $X$  от катушки индуктивности  $L$  до металлической пластины меняется величина потерь в резонансном контуре  $LC$  на вихревые токи в пластине. Это приводит к изменению сопротивления потерь контура  $R$  и соответственно к изменению добротности  $Q$ , а следовательно, и значения выходного напряжения  $U_2$ . Напряжение  $U_2$ , определяется выражением  $U_2 = \dot{K}U_1$ , где  $\dot{K}$  — коэффициент передачи эквивалентной схемы (рис. 6.1);  $U_1$  — напряжение питающего генератора.

Коэффициент передачи по эквивалентной схеме (рис. 6.1) определяется выражением  $\dot{K}(j\omega) = \frac{Z(j\omega)}{R_i + Z(j\omega)}$ , где  $Z(j\omega)$  — полное сопротивление датчика;  $R_i$  — внутреннее сопротивление питающего генератора;  $\omega$  — круговая частота питающего напряжения.

Выражая  $Z(j\omega)$  через параметры контура, получаем

$$Z(j\omega) = \frac{(R + j\omega L)(-1/j\omega C)}{R + j(\omega L - 1/\omega C)}.$$

Пренебрегая величиной  $R$  в числителе, так как  $R/j\omega C$  мало и учитывая что измерительные схемы такого типа работают при резонансе, чему соответствует  $\omega L = 1/\omega C$ , после преобразований получаем

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{L}{L + R_i RC}.$$

Эта зависимость показывает наличие обратно пропорциональной зависимости между выходным напряжением  $U_2$  и сопротивлением потерь.

В лабораторной установке, приведенной на рис. 6.2, питание преобразователя осуществляется от высокочастотного генератора на операционном усилителе (ОУ) DA1. В этой

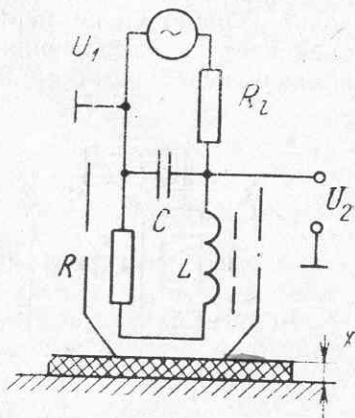


Рис. 6. 1. Эквивалентная схема высокочастотного индуктивного преобразователя



схеме неинвентирующий вход соединен с выходом через резистивный делитель  $R_2, R_1$ , так что коэффициент передачи сигнала по петле положительной обратной связи равен:  $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ . ОУ с таким включением представляют собой самовозбуждающийся автогенератор, амплитуда выходного напряжения которого равна напряжению насыщения выходного каскада ОУ. При одинаковых уровнях ограничения выходного напряжения период генерируемого сигнала можно определить из выражения  $T = 2R_3C_1 \ln(1 + R_2/R_1)$ . Через ограничивающий резистор  $R_4$  и разделительный конденсатор

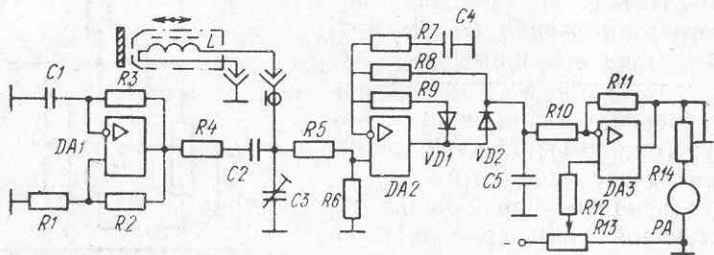


Рис. 6.2. Схема макета лабораторной установки

$C_2$  переменное напряжение подается на вихревой измерительный преобразователь, состоящий: из катушки индуктивности  $L$ , помещенной в корпус, соединенный со схемой с помощью высокочастотного кабеля, и подстроечной емкости  $C_3$ . Колебательный контур  $LC_3$  настраивается емкостью  $C_3$  на резонанс. Напряжение с контура поступает на линейный детектор  $DA_2$ . И далее подается на усилитель  $DA_3$  и с его выхода на показывающий микроамперметр  $PA$ . Линейный детектор выполняет как однополупериодный выпрямитель на ОУ, в котором диод используется как нелинейный элемент в цепи отрицательной обратной связи. Для отрицательных полуволн диод  $VD_2$  закрыт. Отрицательным выходным напряжением ОУ для положительных полуволн входного сигнала  $VD_2$  открывается, и выпрямитель работает как неинвертирующий усилитель. Емкость  $C_5$  служит для фильтрации выпрямленного напряжения. Выходной усилитель сигнала постоянного тока выполняем по инвертирующей схеме. Его нагрузкой являются сопротивление регулировки чувствительности  $R_{14}$  («Калибровка») и показывающий микроамперметр  $PA$ . Установка нуля прибора осуществляется резистором  $R_{13}$

Резисторы «Уст. 0» и «Калибровка» выведены на лицевую панель прибора.

### Порядок выполнения работы

1. Включить прибор тумблером «Сеть».

2. Произвести настройку толщиномера.

2.1. Прижать датчик непосредственно к металлической пластине и ручкой «Калибровка» установить максимальное показание микроамперметра (100 мкА).

2.2. Отвести датчик от металлической пластины на расстояние 200...300 мм и ручкой «Уст. 0» установить нулевое показание микроамперметра.

2.3. Повторить операции по п. 2.1 и 2.2 до полной калибровки прибора (повторяемости калиброванных значений 0...100 мкА).

3. Экспериментально получить и построить статическую характеристику толщиномера.

3.1. Для этого необходимо отсчитывать показания прибора при разных толщинах калиброванных пластин из оргстекла, подкладываемых под датчик на металлическую пластину. Данные занести в таблицу при всех возможных сочетаниях калиброванных толщин:

$x$ , мм

$I$ , мкА

3.2. По полученным значениям построить график статической характеристики  $I=f(x)$ . Статическая характеристика имеет нелинейный характер. Аппроксимировать ее плавной кривой и определить среднеквадратическую погрешность.

4. Определить основную погрешность толщиномера.

4.1. Выключить прибор, а затем через некоторый интервал времени снова его включить и произвести настройку по п. 2.

4.2. Определить составляющие основной погрешности толщиномера. Для этого выбирают три калиброванные пластины из оргстекла или их сочетания, значения толщин  $h_k$  которых равномерно распределены по шкале настроенного диапазона. На каждой  $h_k$  проводят не менее чем пять наблюдений, снимая датчик и пластины из оргстекла, с металлической пластины и устанавливая их вновь для новых наблюдений. Результаты наблюдений заносят в таблицу:

Номер наблюдения	Показания поверяемого толщиномера		Разность показаний $\Delta_i = h_i - h_k$	$\overset{\circ}{\Delta}_0 = \overset{\sim}{\Delta}_s$	$\overset{\circ}{\Delta}_0$
	по току $I$ , мкА	по градуировочному графику $h_i$ , мм			
1					
2					
⋮					
10					

При данном методе поверки вариация отсутствует, поэтому систематическая составляющая основной погрешности толщиномера определяют по формуле

$$\Delta_{оср} = \tilde{\Delta}_s = 1/n \sum_{i=1}^n \Delta_i,$$

где  $\Delta_i$  — разность показания поверяемого толщиномера при наблюдении, полученная по градуировочному графику, и значения толщины калиброванной пластины из оргстекла,  $\Delta_i = h_i - h_k$ .

Случайную составляющую погрешности толщиномера определяют по формуле

$$\Delta_{ор} = 2 \cdot \sigma(A^\circ) \quad \sigma_{(\Delta)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\overset{\circ}{\Delta}_i)^2 / (n-1)} \quad K = \frac{2 \cdot \sigma(A^\circ)}{X_N} \cdot 100\%$$

Основную погрешность толщиномера определяют в соответствии с прилож. 2. (ф. 5)

### Содержание отчета

1. Принципиальная схема толщиномера.
2. Таблица и график градуировочной характеристики.
3. Таблица и расчеты основной погрешности, ее составляющие.
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Принцип действия высокочастотного индуктивного преобразователя.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО САМОПИШУЩЕГО МОСТА КСМЗ

### Цель работы

Изучить устройство и принцип действия, электрическую схему и конструкцию автоматического моста, произвести его поверку, определить основную погрешность, систематическую и случайную составляющие основной погрешности.

### Описание лабораторной установки

Автоматический уравновешенный мост предназначен для измерения и записи температуры или других величин, изменения значений которых могут быть преобразованы в изменения активного сопротивления.

В лабораторной установке исследуется автоматический мост типа КСМЗ, работающий в комплекте с платиновым термопреобразователем сопротивления типа ТСП градуировки 21 ( $R_0=46$  Ом). Принципиальная электрическая схема КСМЗ приведена на рис. 8.1. Питание измерительной схемы моста осуществляется напряжением 6,3 В переменного тока от одной из обмоток силового трансформатора через резистор  $R_6$ , снижающим напряжение до 1,5 В. Сопротивление реохорда  $R_p$

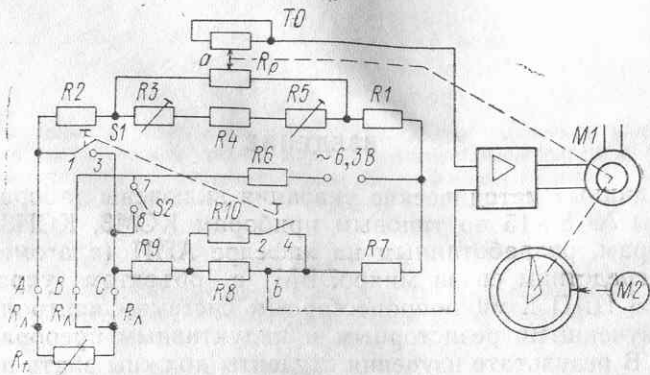


Рис. 8.1. Принципиальная электрическая схема КСМЗ

для всех градуировок и пределов шкал одинаково и составляет приблизительно 130 Ом (для намоток из манганина) или 270 Ом (для намоток из сплава ПдВ-20). Токоотвод ТО (токошьем) имеет такое же сопротивление. Обмотка реохорда шунтируется сопротивлением  $R_4$ , величина которого подбирается отдельно к каждому реохорду в зависимости от градуировки и пределов измерения.

Резисторы  $R_3$  и  $R_5$  служат для точной регулировки размаха шкалы прибора, а также для компенсации погрешности, вызванной износом обмотки реохорда.

Сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  мостовой схемы определяются расчетным путем для каждой градуировки и предела измерений.

Так как длина и сечение проводов, соединяющих термометр сопротивления с прибором  $R_L$ , могут быть различными в зависимости от места установки, то в измерительную схему моста введены уравнивательные катушки  $R_2$  и  $R_9$ , сопротивления которых во время монтажа прибора уменьшают, на величину сопротивления соединительных проводов. Начальное сопротивление уравнивательной катушки составляет 2,5 Ом.

Третий соединительный провод  $R_L$  вводят с целью уменьшить погрешности прибора от изменения сопротивления медных соединительных проводов  $R_L$  при отклонении температуры окружающей среды от нормальной. При нарушении равновесия мостовой схемы вследствие изменения сопротивления

$R_t$  на вход усилителя подается напряжение небаланса с вершин  $a$  и  $b$ . Это напряжение усиливается усилителем до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя М1. Выходной вал двигателя, кинематически связанный с движком реохорда и стрелкой указателя, передвигает их до тех пор, пока напряжение небаланса уменьшаясь, не станет равным нулю (точнее, меньше той величины его, которую чувствует усилитель). При достижении равновесия мостовой схемы ротор реверсивного двигателя останавливается, а движок реохорда, стрелка указателя и перо занимают положение, соответствующее измеряемому сопротивлению. Градуировочная характеристика связывает смещение движка реохорда  $m$  от положения, соответствующего нижнему пределу измерения, со значением сопротивления  $R_t$ . При этом всю длину реохорда удобно принять равной единице, т. к. при значении  $R_t$ , соответствующем верхнему пределу измерения  $m=1$ . Условие равновесия схемы для произвольного значения  $R_t$  определяется уравнением

$$[R_t + R_{л} + R_2 + (1-m)R_{пр}] \cdot R_7 = (R_{л} + R_8 + R_9)(R_1 + mR_{пр}),$$

где  $R_{пр}$  — приведенное сопротивление реохорда,

$$R_{пр} = \frac{R_p(R_3 + R_4 + R_5)}{R_p + (R_3 + R_4 + R_5)};$$

$m = \frac{R'_{пр}}{R_{пр}}$ ;  $R'_{пр}$  — сопротивление участка реохорда правее движка  $a$ .

Решая уравнение относительно  $m$ , получаем:

$$m = \frac{(R_t + R_{л} + R_2 + R_{пр})R_7 - (R_{л} + R_8 + R_9)R_1}{R_{пр}(R_7 + R_8 + R_9 + R_{л})}.$$

Последнее уравнение показывает, что  $m = f(R_t)$ , т. к. остальные элементы схемы неизменны.

Запись показаний осуществляется пером на круговой диаграмме, приводимой во вращение двигателем М2. В схеме предусмотрен контроль исправности прибора. При включении тумблера S1 в положение «Контроль» и переключки S2 в положение «Градуировка» клеммы А, В, С замыкаются и параллельно резистору  $R_8$  включается резистор  $R_{10}$ , что вызывает разбаланс схемы. Указатель должен установиться против красной отметки на шкале.

Автоматический мост конструктивно выполнен в прямоугольном стальном корпусе, приспособленном для утоплен-

ного щитового монтажа. Корпус привода закрыт крышкой с застекленным окном, через которое видны шкала, диаграммный диск, стрелка и перо.

Выключатель прибора и предохранитель установлены на верхней лицевой стороне шасси за крышкой.

На задней стенке корпуса расположены усилитель, измерительный блок, переходная колодка, разъем для внешних соединений.

На поворотном шасси установлены реохорд, реверсивный двигатель, привод диаграммы, стрелка, перо и переходная колодка.

Чтобы открыть шасси, нужно нажать рукоятку защелки (справа за крышкой) и потянуть шасси на себя.

Реохорд закрыт стальной съемной крышкой, которая защищает его от наводок и механических повреждений.

### Порядок выполнения работы

1. Подробно ознакомиться с уравновешенным автоматическим мостом, представленным на лабораторном стенде типа ЛСКИП-2.

2. Подготовить прибор к работе.

2.1. Открыть крышку прибора, утопив ось на крышке, и потянуть ее на себя. Открыть кронштейн, нажав защелку справа на шасси кронштейна вверх и потянуть шасси на себя.

2.2. Установить тумблер S1 на задней стенке в положение «Контроль», а переключку S2 в положение «Градуировка».

2.3. Проверить исправность прибора, включив кнопку магнитного пускателя на стенде и тумблер включения «Сеть» на передней стенке шасси кронштейна. Закрыть шасси и крышку. После некоторого времени прогрева стрелка указателя прибора должна установиться против красной отметки на шкале прибора.

3. Произвести поверку автоматического моста. Поверке подвергаются все оцифрованные отметки шкалы при прямом и обратном ходе. Прямой ход заключается в монотонном подведении стрелки прибора к поверяемой отметке со стороны меньших значений, то есть при увеличении входного параметра. В случае, если стрелка перешла за отметку, необходимо ее вернуть в сторону меньших значений до ближайшей оцифрованной отметки и повторить подход к отметке снова. Аналогично выполняется поверка при обратном ходе.

3.1. Соединить клеммы *A, B, C* автоматического моста с клеммами магазина сопротивлений тремя проводами, сопротивления которых равны сопротивлениям соответствующих соединительных проводов от термометра сопротивления.

3.2. Установить тумблер *S1* в положение «Работа».

3.3. Переключателями магазина сопротивлений установить стрелку прибора на оцифрованных отметках шкалы при прямом, а затем при обратном ходе, записывая в табл. 8.1 величины соответствующих сопротивлений магазина типа  $R_{гр}$ ,  $R_{пр}$ ,  $R_{обр}$ .

Таблица 8.1

$T, ^\circ\text{C}$	Величина градуировочного сопротивления $R_{гр}, \text{Ом}$	Показания магазина сопротивления		Абсолютная погрешность		Относительная погрешность		Вариация $H, \%$
		прямой ход $R_{пр}$	обратный ход $R_{обр}$	прямой ход $\Delta R_{пр}$	обратный ход $\Delta R_{обр}$	прямой ход $\gamma_{пр}, \%$	обратный ход $\gamma_{обр}, \%$	

$\gamma_{пр\max}$        $\gamma_{обр\max}$

— Величину  $R_{гр}$  взять из табл. 8.2. на соответствующую градуировку, указанную на шкале прибора.

Таблица 8.2

Градуировочная таблица для платиновых термометров сопротивления

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление, Ом	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление, Ом
0	46,0	300	98,34
50	55,06	350	106,60
100	63,99	400	114,72
150	72,78	450	122,70
200	81,43	500	130,55
250	89,96		



— Вычислить абсолютную погрешность:

$$\Delta R_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} - R_{\text{гр}},$$
$$\Delta R_{\text{обр}} = R_{\text{обр}} - R_{\text{гр}}.$$

— Вычислить приведенную погрешность  $\gamma_{\text{пр}}$ ,  $\gamma_{\text{обр}}$

$$\gamma = \frac{\Delta R}{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}} 100\%,$$

где  $R_{\text{к}}$ ,  $R_{\text{н}}$  — значения сопротивления, соответствующие конечной и начальной отметкам шкалы.

— Вычислить вариацию  $H$

$$H = \frac{(R_{\text{пр}} - R_{\text{обр}})}{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}} 100\%.$$

— Определить класс точности.

$K = 0,5$

4. Анализ результатов поверки.

Если после поверки величина основной погрешности выходит за допустимые пределы  $\gamma_{\text{max}} > \kappa$ , необходимо установить характер изменения погрешности вдоль шкалы. Для этого строятся графики:

$\gamma_{\text{пр}} = f(T^{\circ}\text{C})$ ;  $\gamma_{\text{обр}} = f(T^{\circ}\text{C})$ ;  $H = f(T^{\circ}\text{C})$  с нанесенным полем  $\gamma_{\text{пред}} = \pm 0,5\%$  для исследуемого прибора. При этом возможны три случая:

- а) погрешность остается примерно одинаковой по величине и неизменной по знаку на всех отметках шкалы;
- б) погрешность постепенно возрастает или уменьшается от начала к концу шкалы, оставаясь неизменной по знаку;
- в) погрешность уменьшается от начала к середине шкалы, а затем изменив знак, увеличивается к концу шкалы.

В первом случае требуется корректировка нуля, осуществляемая смещением стрелки и пера, или проверка стабилизатора. Во втором и третьем случае требуется коррективы с помощью подгоночных резисторов или замена реохорда.

5. Произвести оценку погрешности в соответствии с ГОСТ 8.009-84 для трех точек, имеющих максимальные погрешности для своей температуры. После выполнения работы выключить прибор и пускатель стенда.

### Содержание отчета

1. Принципиальная электрическая схема автоматического уравновешенного моста КСМЗ.
2. Таблицы и графики результатов поверки.

3. Таблицы исследований и расчетов систематической и случайной составляющей основной погрешности.
4. Выводы по классу точности.

### **Контрольные вопросы**

1. Назначение элементов и узлов принципиальной схемы уравновешенного моста и их взаимодействие?
2. Назовите датчики, в комплекте с которыми используются автоматические мосты.
3. Каков смысл трехпроводной схемы включения?
4. Как нормируются классы точности средств измерений?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ВЛАГОМЕРА ШПОНА

## Цель работы

Изучить конструкцию, принцип действия, основные характеристики электронного влагомера шпона.

## Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из переносного лабораторного электронного влагомера, разработанного кафедрой АПП, термостата и набора с образцов лущеного шпона. Принципиальная электрическая схема влагомера представлена на рис. 11.1. Измерительный преобразователь влажности влаго-

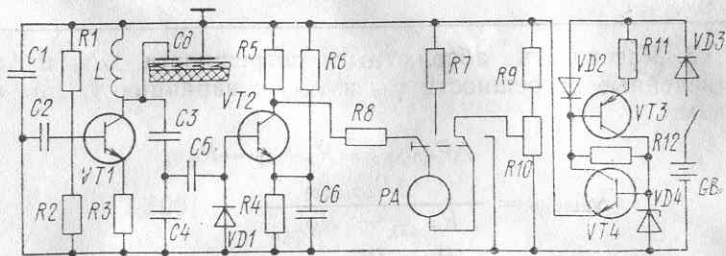


Рис. 11.1. Принципиальная электрическая схема влагомера

мера представляет собой набор из пяти латунных колец, находящихся в одной плоскости и впрессованных в эбонитовое основание, расположенное в нижней части влагомера. Внутреннее, внешнее и среднее кольца преобразователя соединены с корпусом, остальные подключены к катушке индуктивности  $L$ , образуя резонансный параллельный контур, конденсатором которого является измерительный преобразователь влажности  $C_g$ . Емкость такого конденсатора состоит из начальной  $C_0$  и краевой емкости, возникающей при прижиге колец к шпону, положенному на специальное основание. Материал основания подобран из расчета соответствия его диэлектрических параметров, параметрам шпона при нулевой влажности. Резонансный контур  $LC_d$  задает частоту генератора на транзисторе  $VT1$ . При изменении влажности контролируемого шпона меняется диэлектрическая проницаемость шпона и тангенс угла потерь преобразователя влажности, что приводит к изменению частоты и напряжения генератора. Это напряжение детектируется диодом  $VD1$  и подается на базу усилителя постоянного тока на транзисторе  $VT2$ . Выходной сигнал его подается на показывающий прибор  $PA$  (микроамперметр). Для установки нуля служит цепочка резисторов  $R_9, R_{10}$ . Питается влагомер от аккумулятора. Для устранения погрешности, возникающей вследствие разряда аккумулятора, его напряжение стабилизировано при помощи стабилизатора на транзисторах  $VT3, VT4$ . Величина напряжения задается стабилизатором  $VD4$ , ток которого задается стабилизатором тока на транзисторе  $VT3$  и диоде  $VD2$ . Диод  $VD3$  служит для предотвращения пробоя транзисторов при неправильном подключении полярности аккумулятора или другого источника питания. Резистор  $R_7$  служит для проверки разряда аккумулятора при калибровке прибора  $PA$ .

### Порядок выполнения работы

1. Подготовить прибор к работе.

1.1. Включить питание влагомера при питании его от внешнего источника.

1.2. Проверить напряжение питания измерительной схемы.

Для этого нажать кнопку и проверить, находится ли стрелка показывающего прибора в заданной зоне.

1.3. Произвести установку нуля. Для этого установить влагомер на диэлектрическое основание, нажать кнопку «Измерение» и поворотом ручки «Уст 0» установить показание прибора на нулевое значение влажности.

2. Определить погрешность влагомера при контроле шпона одной толщины. Для этого измерить влажность ~~30~~ образцов шпона одной толщины, заноса данные в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Номер образца	1	2	3	30
$W_i$				
$\Delta W_i$				
$\Delta W_i^2$				

Вычислить оценку среднеквадратической погрешности влагомера по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta W_i^2}{n-1}}$$

$\Delta_{огр} = 2\delta$   
 $\gamma = ?$

3. Исследовать зависимость показаний влагомера от толщины шпона и определить величину дополнительной погрешности. Для этого определить среднее значение показаний влагомера при контроле шпона толщин 0,75; 1,0 и 1,5 мм одной влажности. Данные занести в табл. 11.2./

Таблица 11.2

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{0,75}$										
$W_{1,0}$										
$W_{1,5}$										

Построить график зависимости показаний влагомера от толщины шпона  $W=f(\delta)$ . Определить дополнительную погрешность влагомера при колебании толщины шпона на 0,1 мм.

## Обработка результатов измерений. методом наименьших квадратов

Статическую характеристику СИ наиболее правомерно определять методом наименьших квадратов. По экспериментальным данным студенту необходимо определить коэффициенты линейного уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1 x.$$

Идея метода заключается в выборе таких  $b_0$  и  $b_1$ , при которых сумма квадратов отклонений результатов  $y^i$  от  $y = b_0 + b_1 x_i$  минимальна:

$$\sum_{i=1}^n [(y_i - (b_0 + b_1 x_i))]^2 = F(b_0, b_1) = \min.$$

Из условий минимума этой суммы

$$\frac{\partial F}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_i)] = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_i)] x_i = 0.$$

получаем систему нормальных уравнений

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i. \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} b_1 = \\ b_0 = \end{matrix}$$

Решение этой системы позволяет найти

$$b_1 = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}.$$

Для каждого  $x_i$  по уравнению  $y = b_0 + b_1x$  можно найти  $\hat{y}_i = b_0 + b_1x_i$ , а отсюда остаточную среднеквадратическую погрешность

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}$$

Исходные данные и результаты обработки удобно свести в таблицу.

**Результаты обработки данных  
по уравнению линейной регрессии**

$x_i$	$y_i$	$x_i y_i$	$x_i^2$	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$\sum_{i=1}^n \hat{y}_i$	$\sum (y_i - \hat{y}_i)$	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$

Традиционным является нормирование погрешностей средств измерений (СИ) с помощью класса точности. По ГОСТ 16263—70 класс точности как обобщенная характеристика определяется в основном пределах допускаемых основных и дополнительных погрешностей.

Соответствие погрешности СИ присписываемому им классу точности во время эксплуатации проверяется при периодических поверках. Если погрешность оказывается меньше нормированных, то СИ продолжает эксплуатироваться, если нет, то подлежит ремонту и регулировке. Основные способы установления пределов допускаемых погрешностей и обозначение классов точности средств измерений установлены в ГОСТ 8.401—80 (ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования). Обозначение класса прибора дает достаточно полную информацию для вычисления приближенных оценок погрешностей результатов измерений. Так, например, если класс точности указан одним числом  $K$  (без кружка), то предел допускаемой приведенной погрешности определяется выражением

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{op}}{X_N} \cdot 100\% = \pm K,$$

где  $\Delta_{op}$  — предел допускаемой основной погрешности;  $X_N$  — нормирующее значение измеряемой величины;  $K$  — положительное число, выбираемое из ряда 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0 при  $n=1,0; -1; -2 \dots$

Значение класса точности  $K$  маркируется на шкале прибора. Нормирующее значение  $X_N$  для СИ с равномерной шкалой, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы, принимается равным конечному значению шкалы  $X_k$ . Для СИ с нулевой отметкой внутри шкалы  $X_N$  принимают равным  $|X_k| + |X_n|$ , где  $X_n$  — начальное значение шкалы. Для некоторых СИ значение  $X_N$  оговаривается в паспорте прибора и устанавливается по другим правилам.

Наиболее сложной задачей при нормировании погрешности СИ является оценка предела допускаемой основной погрешности  $\Delta_{op}$ , которая является комплексной задачей. Чтобы ее решить, необходимо найти сумму погрешностей, каждая из которых определяется какой-то одной метрологической характеристикой СИ. Этот принцип заложен в ГОСТ 8.009—84 (ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений). Этот ГОСТ устанавливает номенклатуру нормируемых метрологических характеристик (НМХ), способы их нормирования и представления. При этом регламентируются характеристики систематической  $\Delta_s$  и случайной составляющей погрешности  $\tilde{\Delta}$  СИ как случайных величин, нормализованная автокорреляционная функция случайной составляющей погрешности, функции влияния влияющих величин, динамические характеристики и др. Оценку  $\Delta_s$  и  $\tilde{\Delta}$  и вычисление по ним значения  $\Delta_{op}$  можно осуществить по нижеприведенной методике. Оценка систематической составляющей погрешности  $\Delta_s$  производится по формуле

$$\tilde{\Delta}_s = \frac{\tilde{\Delta}_M + \tilde{\Delta}_6}{2}, \quad (1)$$



где

$$\bar{\Delta}_M = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{Mi}}{n}; \quad \bar{\Delta}_6 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{6i}}{n}; \quad (2)$$

$n$  — количество опытов при определении  $\bar{\Delta}_M$  и  $\bar{\Delta}_6$ ;  $\Delta_{Mi}$ ,  $\Delta_{6i}$  —  $i$ -ая реализация погрешности при изменении входного сигнала со стороны меньших (больших) его значений.

Для определения  $\Delta_{Mi}$  в точке  $X$  диапазона измерения необходимо, изменяя входной сигнал, подводить указатель (стрелку) прибора к выбранной отметке со стороны меньших значений (прямой ход), замеры значение входного сигнала по образцовому прибору  $X_{Mi}$  соответствующего поверяемой отметке. Замеры следует повторить многократно (не менее 10...15 раз). Результаты измерений занести в табл. 1, столбец 2.

Таблица для определения составляющих основной погрешности

Таблица 1

№ п/п	$X_{Mi}$	$\Delta_{Mi}$	$\overset{\circ}{\Delta}_{Mi}$	$\overset{\circ 2}{\Delta}_{Mi}$	$X_{6i}$	$\Delta_{6i}$	$\overset{\circ}{\Delta}_{6i}$	$\overset{\circ 2}{\Delta}_{6i}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Значение $X_{гр}$ = для поверяемой отметки...								
		$\sum_{i=1}^n \Delta_{Mi}$		$\sum_{i=1}^n \overset{\circ 2}{\Delta}_{Mi}$		$\sum_{i=1}^n \Delta_{6i}$		$\sum_{i=1}^n \overset{\circ 2}{\Delta}_{6i}$

Аналогично заполняется столбец 6. При этом изменение входного сигнала  $X_{6i}$  при подходе к поверяемой отметке следует осуществлять со стороны больших значений (обратный ход). Погрешность  $\Delta_{Mi} = X_{Mi} - X_{гр}$  записывается в столбец 3, а  $\Delta_{6i} = X_{6i} - X_{гр}$  — в графу 7.

Случайная составляющая погрешности определяется из выражения

$$\overset{\circ}{\Delta}_{Mi} = \Delta_{Mi} - \bar{\Delta}_M$$

для изменений входного сигнала со стороны меньших значений (столбец 4) и

$$\overset{\circ}{\Delta}_{6i} = \Delta_{6i} - \bar{\Delta}_6$$

для изменений входного сигнала со стороны больших значений (обратный ход).

По результатам граф 3 и 5 вычисляются  $\Delta_M$  и  $\Delta_6$  формулы (2) и оценка систематической соответствующей погрешности по формуле (1).

Оценка среднего квадратического отклонения  $\tilde{\sigma}(\Delta)$  случайной составляющей погрешности поверяемого средства измерения определяется формулой

$$\tilde{\sigma}(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{Mi} - \bar{\Delta}_M)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta_{6i} - \bar{\Delta}_6)^2}{2n - 1}} \quad (3)$$

Используя результаты табл. 1 столбцы 5, 9 находим из выражения

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{Mi}^2 + \sum_{i=1}^n \Delta_{6i}^2}{2n - 1}}$$

Оценка вариации  $H$  показаний определяется из выражения

$$\tilde{H} = |\bar{\Delta}_M - \bar{\Delta}_6| \quad (4)$$

По этим метрологическим характеристикам интервал допускаемой основной погрешности  $\Delta_{op}$  можно определить по выражению из Методического материала PD 50-453-84 по применению ГОСТ 8.009-84

$$\Delta_{op} = \pm [\Delta_{osp} + k\sigma_p(\Delta) + 1/2H_p] \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от принятой вероятности  $P$ : при  $P = 0,96$  можно принять  $k = 2$ ;  $\sigma_{osp}$ ;  $\sigma_p(\Delta)$  — соответственно предел допускаемой систематической и случайной погрешности;  $H_p$  — предел допускаемой основной погрешности от гистерезиса (вариация).

В данном выражении принято, что случайная составляющая погрешности  $\Delta$  распределена по нормальному закону. Предельное значение ее устанавливают с доверительной вероятностью  $P = 0,96$ . Все три составляющие погрешности входят в (5) своими предельными значениями. Расчет этих значений должен основываться на теоретическом анализе СИ и обширных экспериментальных исследованиях. Для освоения его рекомендуем изучить приложения к «Методическому материалу по применению ГОСТ 8.009-84». В лабораторной работе для экономии времени мы воспользуемся упрощенной методикой. Предельное значение  $\sigma_p(\Delta)$  необходимо вычислять с учетом закона распределения  $\tilde{\sigma}(\Delta)$ . ГОСТ 11.004-74 регламентирует правила оценок предельных значений  $\sigma_p(\Delta)$  при заданной доверительной вероятности. Для ее оценки необходимо по таблице найти коэффициент  $z_n$  и определить  $\sigma_p(\Delta) = z_n \cdot \tilde{\sigma}(\Delta)$ . Для  $P = 0,95$  табличные значения равны для  $n = 10$   $z_n = 1,55$ , для  $n = 15$   $z_n = 1,42$ .

Предел допускаемой систематической погрешности  $\Delta_{osp}$  также должен быть определен с учетом ограниченности выбором данных для оценки  $\tilde{\Delta}_s$ . Действительно, многократное проведение серий по 10...15 измерений дает различные значения  $\Delta_{osp}$  в каждой серии для одного прибора в данной точке шкалы.

Для оценки  $\Delta_{osp}$  необходимо знать матожидание ее и среднеквадратичное отклонение. В лабораторной работе студенту предлагается в формуле (5) в качестве  $\Delta_{osp}$  использовать значение  $\tilde{\Delta}_s$ .

Вычисление вариации  $\tilde{N}$  по формуле (4) также дает только выборочное значение, справедливое лишь для данной серии. Для оценки предельного значения вариации также необходимо многократное проведение серий по оценке  $\tilde{N}$  с последующим выражением оценок матожидания и  $\sigma_N$ . В лабораторной работе студенту предлагается в качестве  $N_p$  принять значения  $\tilde{N}$  из (4).