

# ПРИБОРЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

УДК 681.2(07)  
ББК 3965-048я73-5  
Б20

Рецензент  
Доктор технических наук, профессор  
*П.С. Беляев*

Составители:  
*П.В. Балабанов,*  
*С.В. Пономарев,*  
*А.Г. Дивин*

**Балабанов, П.В.**

Б20 Приборы аналитического контроля : методические указания / сост. : П.В. Балабанов, С.В. Пономарев, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 20 с. – 50 экз.

Даны примеры выполнения расчетов широко применяемых в промышленности аналитических приборов: автоматического психрометрического влагомера и автоматизированной установки для измерения теплопроводности твердых и сыпучих неметаллических материалов.

Предназначены для выполнения курсовой работы по дисциплине "Методы и средства измерений, испытаний и контроля" студентами 4 курса очного и 5 курса заочного отделений специальности 200503 "Стандартизация, сертификация и метрология", а также для самостоятельной работы студентов 5 курса очного и 6 курса заочного отделений специальности 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств" при изучении дисциплины "Приборы аналитического контроля".

УДК 681.2(07)  
ББК 3965-048я73-5

© ГОУ ВПО "Тамбовский  
государственный технический  
университет" (ТГТУ), 2007

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО "ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

# **ПРИБОРЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

Методические указания  
к выполнению курсовой и самостоятельной работы  
для студентов 4, 5 и 6 курсов дневного и заочного отделений  
специальностей 200503 и 220301



---

*Тамбов*  
◆ *Издательство ТГТУ* ◆  
2007

*Учебное издание*

## *ПРИБОРЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ*

Методические указания

Составители:

БАЛАБАНОВ Павел Владимирович,  
ПОНОМАРЕВ Сергей Васильевич,  
ДИВИН Александр Георгиевич

Редактор З.Г. Чернова  
Компьютерное макетирование М.А. Филатовой

Подписано в печать 03.10.07  
Формат 60 × 84 / 16. 1,16 усл.-печ. л. Тираж 50 экз. Заказ № 617

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета,  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность функционирования автоматизированных систем управления технологическими процессами определяется достоверностью контроля и измерения параметров процесса, а также свойств веществ, материалов и изделий, что невозможно без использования современных приборов аналитического контроля, оснащенных микропроцессорной техникой. Поскольку свойства микроклимата и теплофизические свойства веществ являются одними из наиболее часто измеряемых и контролируемых параметров в процессах химической технологии, а также при испытаниях продукции, то в заданиях 1 и 2 приведены методики расчета автоматического психрометрического влагомера газов и автоматизированной установки для измерения теплопроводности твердых и сыпучих неметаллических материалов. Изложенные ниже методики расчетов были апробированы авторами в условиях реального производства; в частности, автоматизированная установка для измерения теплопроводности твердых и сыпучих материалов принята к использованию в ОАО "Корпорация Росхимзащита" (г. Тамбов) для измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов на основе надперекисей щелочных металлов, а автоматический аспирационный психрометр используется в учебном процессе кафедры "Автоматизированные системы и приборы" Тамбовского государственного технического университета.

### Задание 1

#### РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

##### 1.1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРОЕКТИРУЕМОГО ПРИБОРА

Функциональная схема автоматического психрометрического влагомера воздуха приведена на рис. 1.1.

Назначение элементов схемы:  $RK1, RK2$  – термосопротивления, используемые для измерения температур  $t_c$  и  $t_m$  "сухого" и "мокрого" термометров;  $R1, R2, R3, R5, R6, R7$  – манганиновые сопротивления плеч мостов I и II;  $R_n$  – сопротивления, служащие для подгонки сопротивлений  $r_n$  соединительных проводов до стандартного значения  $R_n + r_n = 2,5$  Ом;  $R$  – балластное сопротивление для ограничения токов через термометры сопротивления  $RK1, RK2$ ; УПТ – усилитель постоянного тока; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер.

##### 1.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА

Первичное преобразовательное устройство (детектор влажности воздуха) выполнен (см. рис. 1.1) в виде двух мостов I и II, запитанных от одного источника напряжения  $U_{пит} = 5$  В. В мост I включен термопреобразователь сопротивления  $RK1$ , измеряющий температуру  $t_c$  сухого термометра, а в мост II включен термопреобразователь сопротивления  $RK2$ , измеряющий температуру  $t_m$  мокрого термометра. Разность потенциалов  $U_{ab} = k(t_c - t_0)$  между точками  $a$  и  $b$  определяется температурой  $t_c$  сухого термометра. Разность потенциалов  $U_{ac} = k(t_m - t_0)$  определяется температурой  $t_m$  мокрого термометра, а разность потенциалов  $U_{bc} = k(t_c - t_m)$  между точками  $b$  и  $c$  пропорциональна психрометрической разности  $(t_c - t_m)$ . Здесь  $t_0$  – некоторая определенная температура термометров  $RK1, RK2$  при которой напряжения  $U_{ab}$  и  $U_{ac}$  в диагоналях мостов I и II равны нулю.

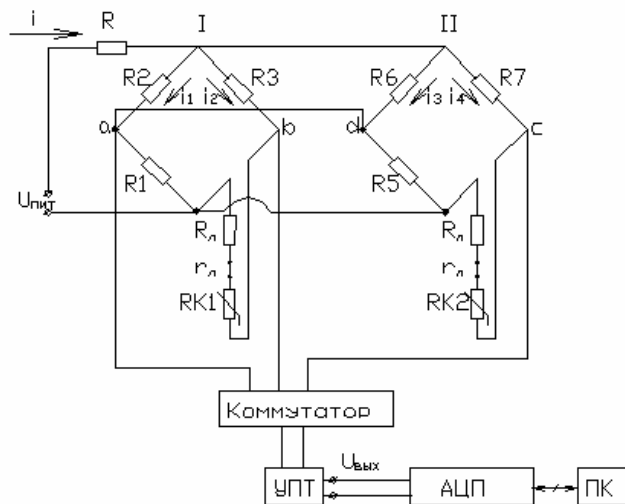


Рис. 1.1. Функциональная схема автоматического психрометрического влагомера воздуха

Из теоретических основ работы психрометрических влагомеров известно соотношение

$$\varphi = \frac{p(t_m) - Ab(t_c - t_m)}{p(t_c)} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

где  $\phi$  – относительная влажность воздуха, %;  $p(t_m)$ ,  $p(t_c)$  [бар] – давление насыщенного водяного пара при температурах соответственно мокрого  $t_m$  [°C] и сухого  $t_c$  [°C] термометров;  $b$  – барометрическое давление, бар;  $A$  – психрометрический коэффициент, зависящий от скорости обдува воздухом сухого и мокрого термометров, причем при скорости обдува больше 2,5 м/с этот психрометрический коэффициент становится практически постоянным и равным 0,000656 1/°C. Согласно [1], при барометрическом давлении  $b = 755$  мм рт. ст. уравнение (1.1) можно записать в виде

$$\phi = \frac{p(t_m) - 0,5(t_c - t_m)}{p(t_c)} \cdot 100 \% . \quad (1.2)$$

Последней формулой можно пользоваться и при отклонении барометрического давления на  $\pm 10$  мм рт. ст. от 755 мм рт. ст., причем ошибка не превышает 1 % относительной влажности.

Для обработки экспериментальной информации по формуле (1.1) или (1.2) необходимо знать аналитическое выражение функции  $p(t)$ , определяющей зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. Для получения аналитического выражения функции  $p(t)$ , например в виде полинома второй степени

$$p(t) = p_0 + p_1 t + p_2 t^2 ,$$

рекомендуется использовать данные таблиц насыщенного водяного пара [7], которые можно аппроксимировать в MatLab с помощью функций polyfit() и polyval() или в MathCad.

Таким образом, если известны значения температур  $t_m$ ,  $t_c$ , значение психрометрической разности  $(t_c - t_m)$  и значение психрометрического коэффициента  $A$ , известна функция  $p(t)$ , то относительная влажность  $\phi$  воздуха может быть рассчитана по формуле (1.1) или (1.2).

### 1.3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Для расчета схемы первичного устройства (детектора) влагомера воздуха необходимо иметь следующие исходные данные:

- 1.3.1. Вид градуировки термометров сопротивления  $RK1$  и  $RK2$ . Например, градуировка 100М.
- 1.3.2. Пределы измерения влагомера:  $\phi_{\min} = 20$  %,  $\phi_{\max} = 100$  %.
- 1.3.3. Пределы изменения температуры воздуха, влажность которого измеряется с использованием разрабатываемого влагомера, например:  $t_{\min} = 15$  °C,  $t_{\max} = 35$  °C.
- 1.3.4. Напряжение питания измерительной схемы  $U_{\text{пит}} = 5$  В.
- 1.3.5. Максимальная рассеиваемая мощность на сопротивлениях  $RK1$ ,  $RK2$ , например,  $P = 0,0064$  Вт.

### 1.4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРИБОРА

Определяем значения сопротивлений схемы первичного преобразовательного устройства (детектора) и его выходных сигналов, которые затем сводим в табл. 1.1 для трех значений температуры  $t_c$  "сухого" термометра и для трех значений измеряемой влажности воздуха. Расчеты производим в следующей последовательности:

1. Определяем среднее значение рабочей температуры разрабатываемого влагомера  $t_{\text{cp}} = (t_{\min} + t_{\max}) / 2 = (15 + 35) / 2 = 25$  °C и среднее значение измеряемой влажности воздуха:

$$\phi_{\text{cp}} = (\phi_{\min} + \phi_{\max}) / 2 = (20 + 100) / 2 = 60 \% .$$

2. По [1, 2] или по номограмме (Приложение А) определяем значения температуры  $t_m$  мокрого термометра, соответствующие начальному, среднему и максимальному значениям измеряемой относительной влажности воздуха  $\phi$  при трех значениях температуры сухого термометра

Таблица 1.1

$t_c, \text{°C}$	$\phi, \%$	$t_m, \text{°C}$
$t_{\min} = 15$	20	6,1
	60	10,8
	100	15
$t_{\text{cp}} = 25$	20	12,6
	60	19,7
	100	25
$t_{\max} = 35$	20	18,5
	60	28
	100	35

3. По [3] находим значения сопротивления термометров  $RK1$ ,  $RK2$ , соответствующие определенным в табл. 1.1 температурам. Результаты заносим в табл. 1.2

Таблица 1.2

$t_c \backslash \phi$	$\phi_{\min} = 20 \%$	$\phi_{\text{cp}} = 60 \%$	$\phi_{\max} = 100 \%$
$t_c = t_{\min} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK1 = 106,4 \text{ Ом}$	$t_M = 6,1 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 102,4 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$	$t_M = 10,8 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 104,7 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$	$t_M = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 106,4 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$
$t_c = t_{\text{cp}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK1 = 110,7 \text{ Ом}$	$t_M = 12,6 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 105,4 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$	$t_M = 19,7 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 108,4 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$	$t_M = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 110,7 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$
$t_c = t_{\max} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK1 = 114,9 \text{ Ом}$	$t_M = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 107,9 \text{ Ом}$ $U_{ab} = 16,36$ $U_{ac} = -10,98$ $U_{bc} = 27,339$	$t_M = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 111,5 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$	$t_M = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ $RK2 = 114,9 \text{ Ом}$ $U_{ab} =$ $U_{ac} =$ $U_{bc} =$

4. Определяем значения резисторов  $R1 - R3$ ,  $R5 - R7$ , исходя из условия, что измерительные мосты I и II должны быть сбалансированы при относительной влажности воздуха, соответствующей верхнему пределу измерения  $\phi_{\max} = 100 \%$  при среднем значении температуры "сухого" термометра  $t_c = t_{\text{cp}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R5 = R7 = RK|_{t=25} + r_{\text{л}} + R_{\text{л}} = 110,7 + 2,5 = 113,2 \text{ Ом.}$$

Из теории мостовых измерительных схем известно, что когда все плечи мостов I и II приблизительно одинаковые, обеспечивается получение наибольшей чувствительности выходных сигналов  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{bc}$  к изменениям сопротивлений  $RK1$  и  $RK2$ .

5. Из схемы (рис. 1.1) видно: наибольший ток  $i_4$  через термометр  $RK2$  будет протекать при его минимальном сопротивлении, что достигается при условиях  $t_c = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\phi_{\min} = 20 \%$ , и соответствует температуре мокрого термометра  $t_M = 6,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Запишем выражение для вычисления напряжения  $U$  на последовательно соединенных резисторах  $r_{\text{л}}$ ,  $R_{\text{л}}$ ,  $RK2$ ,  $R7$  при температуре мокрого термометра  $t_M = 6,1 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$U = i_4(r_{\text{л}} + R_{\text{л}} + RK2|_{6,1} + R7) = i_4(2,5 + 102,4 + 113,2) = i_4 \cdot 218,3. \quad (1.2)$$

Вычислим максимальный ток  $i_4$  через термометр  $RK2$ , исходя из того, что максимальная рассеиваемая мощность на нем  $P = 0,0064 \text{ Вт}$ :

$$i_4 = \sqrt{P / RK2} = \sqrt{0,0064 / 100} = 8 \text{ мА.}$$

Подставим это значение тока в формулу (1.2) и получим падение напряжения  $U = 1,7465 \text{ В}$  при наибольшем токе через резистор  $RK2$

6. Вычисляем наибольшие значения токов  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  через ветви схемы, приведенной на рис. 1.1:

$$i_1 = U / (R1 + R2) = 1,7465 / (2 \cdot 113,203) = 7,714 \text{ мА};$$

$$i_2 = U / (R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK1|_{t=15} + R3) = 1,7465 / (2,5 + 106,422 + 113,203) = 7,863 \text{ мА}; \quad i_3 = U / (R5 + R6) = i_1 = 7,714 \text{ мА.}$$

Тогда суммарный ток  $i = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$ , потребляемый схемой на рис. 1.1, равен  $i = 31,29 \text{ мА}$ .

7. Вычисляем значение балластного сопротивления  $R$  из условия

$$U_{\text{пит}} = iR + U,$$

откуда получаем

$$R = (U_{\text{пит}} - U) / i = (5 - 1,74) / 0,03129 = 104 \text{ Ом.}$$

8. Вычисляем значения выходных сигналов  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{bc}$ , соответствующие трем значениям температуры "сухого" термометра:  $15$ ,  $25$ ,  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; и трем значениям относительной влажности воздуха:  $20$ ,  $60$ ,  $100 \%$ . Для этого сначала находим сопротивления ветвей  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  схемы (рис. 1.1). Например, при  $t_c = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\phi = 20 \%$  получаем:

$$Ra = R1 + R2 = 2 \cdot 113,2 = 226,4 \text{ Ом};$$

$$Rd = R5 + R6 = 226,4 \text{ Ом};$$

$$Rb = RK1|_{t=35} + r_{\text{л}} + R_{\text{л}} + R3 = 2,5 + 114,9 + 113,2 = 230,6 \text{ Ом};$$

$$Rc = RK2|_{t=18,5} + r_{\text{л}} + R_{\text{л}} + R7 = 2,5 + 107,9 + 113,2 = 223,6 \text{ Ом.}$$

Общее сопротивление параллельно включенных ветвей  $R_a, R_b, R_c, R_d$  будет равно

$$R_{\text{общ}} = R_1 R_{\text{II}} / (R_1 + R_{\text{II}}),$$

где

$$R_1 = \frac{RaRb}{Ra + Rb} = \frac{(R1 + R2)(R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK1 + R3)}{(R1 + R2) + (R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK1 + R3)};$$
$$R_{\text{II}} = \frac{RdRc}{Rd + Rc} = \frac{(R5 + R6)(R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK2 + RK7)}{(R5 + R6) + (R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK2 + RK7)}.$$

Вычисляем значения  $R_1, R_{\text{II}}, R_{\text{общ}}$  при  $t_c = 35^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 20\%$ :

$$R_1 = RaRb / (Ra + Rb) = 226,4 \cdot 230,6 / (226,4 + 230,6) = 114,3 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{II}} = RdRc / (Rd + Rc) = 226,4 \cdot 223,6 / (226,4 + 223,6) = 112,5 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{общ}} = R_1 R_{\text{II}} / (R_1 + R_{\text{II}}) = 114,3 \cdot 112,5 / (114,3 + 112,5) = 56,7 \text{ Ом}.$$

Тогда ток  $i$ , потребляемый от источника питания  $U_{\text{пит}}$ , найдем из условия  $U_{\text{пит}} = i(R + R_{\text{общ}})$ :

$$i = U_{\text{пит}} / (R + R_{\text{общ}}) = 5 / (104 + 56,7) = 31,1162 \text{ мА}.$$

Далее находим напряжение  $U$ , приложенное к мостовым измерительным схемам:

$$U = i R_{\text{общ}} = 1,76 \text{ В}.$$

Тогда:

$$i_1 = i_3 = U / Ra = U / Rd = 1,76 / 226,4 = 7,791 \text{ мА};$$

$$i_2 = U / Rb = 1,76 / 230,7 = 7,646 \text{ мА};$$

$$i_4 = U / Rc = 1,76 / 223,6 = 7,888 \text{ мА};$$

$$U_{ab} = i_2(R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK1) - i_1 R1 = 0,007646 \cdot 117,5 - 0,88 = 16,36 \text{ мВ};$$

$$U_{ac} = i_4(R_{\text{л}} + r_{\text{л}} + RK2) - i_1 R5 = 0,007888 \cdot 110,4 - 0,88 = -10,98 \text{ мВ};$$

$$U_{bc} = U_{ab} - U_{ac} = 16,36 + 10,98 = 27,34 \text{ мВ}.$$

Таким образом, при  $t_c = 35^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 20\%$  максимальный выходной сигнал, снимаемый с первичного преобразовательного устройства, равен  $U_{bc} = 27,34 \text{ мВ}$ .

Аналогично надо рассчитать значения сигналов  $U_{ab}, U_{ac}, U_{bc}$  для других значений температуры  $t_c$  и других значений относительной влажности  $\varphi$ . Результаты следует внести в табл. 1.2.

После заполнения табл. 1.2 следует выявить наибольшее и наименьшее значение среди рассчитанных величин  $U_{ab}, U_{ac}, U_{bc}$ .

Из расчетов получено, что при  $t_c = 35^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 20\%$  на выходе мостовых схем I и II получается максимально возможный выходной сигнал  $U_{bc}^{\text{max}} = 27,34 \text{ мВ}$ .

## 1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ВЫБОР АЦП

Усилитель постоянного тока (УПТ) включен в состав функциональной схемы (рис. 1.1) для согласования уровня выходного сигнала коммутатора с уровнем входного сигнала аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В качестве АЦП могут применяться модули аналогового ввода серии I7000 (8000), ADAM и др.

Расчет коэффициента усиления  $k$  усилителя осуществляется по формуле

$$k = U_{\text{АЦП}} / U_x,$$

где  $U_{\text{АЦП}}$  – максимальное входное напряжение АЦП;  $U_x$  – максимальный выходной сигнал с коммутатора.

С учетом найденного значения коэффициента передачи УПТ необходимо выбрать схему УПТ (простую схему, если  $k < 50 \dots 100$ , или более сложную схему, если  $k > 100$ ), а затем рассчитать значения сопротивлений этой схемы, обеспечивающие получение рассчитанного значения коэффициента передачи, а также выполнение некоторых других требований, например, необходимого входного сопротивления УПТ. Необходимую схему усилителя можно выбрать по литературе [4].

## 1.6. ВЫПОЛНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Для заданного варианта исходных данных необходимо выполнить все необходимые расчеты по приведенному выше примеру. После окончания расчетов необходимо составить и начертить принципиальную электрическую схему всего микропроцессорного прибора – влагомера, в том числе схему измерительного канала для ввода информации от первичных измерительных преобразователей в микропроцессор.



## Задание 2

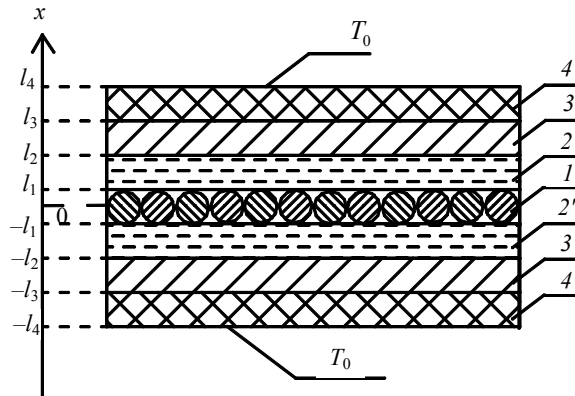
### РАСЧЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

#### 2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ

##### 2.1.1. Конструкция измерительной ячейки

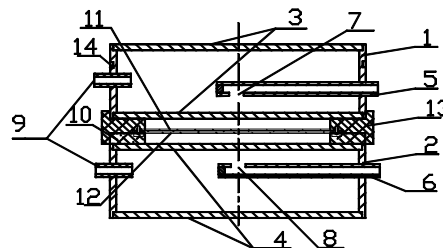
Для измерения теплопроводности используется измерительная ячейка [5], физическая модель которой представлена на рис. 2.1.

Первый слой  $l$  системы – источник теплоты и измеритель его температуры, изготовленные из навитых по спирали Архимеда манганиновой и медной проволоки, соответственно. Слои 2 и 2', 3 и 3' – защитные оболочки, предотвращающие соприкосновение исследуемых образцов 4 и 4' с источником теплоты. Причем, слои 2 и 2' изготовлены из диэлектрика, а слои 3 и 3' изготовлены из металла. Температура  $T_0$  внешних поверхностей исследуемых образцов поддерживается постоянной.



**Рис. 2.1. Физическая модель измерительной ячейки**

На рис. 2.2 представлена конструкция измерительной ячейки. Цилиндрические детали 1 и 2 с крышками 3 и 4 образуют две емкости (теплообменники), через которые циркулирует теплоноситель (например, вода), поддерживающий постоянную температуру  $T_0$  внешних поверхностей исследуемых образцов. Исследуемые образцы помещают в пространство, образованное нижней крышкой 3 и деталью 11, а также верхней крышкой 4 и деталью 12. Деталь 11 представляет собой металлическую пластину круглой формы, на нижнюю поверхность которой приклеены электроизоляционный материал (например, трансформаторная бумага), а затем две навитых по спирали Архимеда проволоки – медная и манганиновая. Деталь 12 представляет собой круглую металлическую пластину с приклеенным к верхней поверхности электроизоляционным материалом.



**Рис. 2.2. Конструкция измерительной ячейки:**

1, 2 – цилиндрические детали; 3, 4 – крышки; 5, 6 – входные штуцера;  
7, 8 – отверстия; 9 – выходные штуцера; 10, 13 – текстолитовые кольца;  
11, 12 – детали, образующие слои 3, 2, 1, 2', 3' модели на рис. 2.1; 14 – проточка для  
термометра сопротивления  $RK2$ , измеряющего температуру теплоносителя

##### 2.1.2. Метод измерения теплопроводности

Математическая модель процесса распространения тепла, представленная для половины системы ( $0 \leq x \leq l_4$ ), записывается в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности

$$\frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i \frac{\partial^2 T_i(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{W_i}{c_i \rho_i}, \quad \tau > 0, \quad l_{i-1} < x < l_i, \quad i = \overline{1, 4}, \quad l_0 = 0, \quad (2.1)$$

с начальными условиями  $T_i(x, 0) = T_{hi}(x),$

$$(2.2)$$

с граничными условиями: 
$$\left. \left( \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right) \right|_{x=0} = 0; \quad (2.3)$$

$$T_4(x, \tau)|_{x=l_4} = T_0 = \text{const}; \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} T_i(x, \tau)|_{x=l_i-0} = T_{i+1}(x, \tau)|_{x=l_i+0}; \\ \lambda_i \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_i-0} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=l_i+0} \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.5)$$

где  $c_i \rho_i$  – объемная теплоемкость;  $\lambda_i$  – теплопроводность;  $a_i$  – температуропроводность;  $W_i$  – объемная мощность внутренних источников тепла  $i$ -го слоя, причем:  $W_1 = \text{const}$ ,  $W_2 = W_3 = W_4 = 0$ ;  $T_{ni}(x)$  – функции начального распределения температуры;  $T_0$  – температура термостатирования.

Эксперимент по измерению теплопроводности (рис. 2.3) проводится в следующей последовательности.

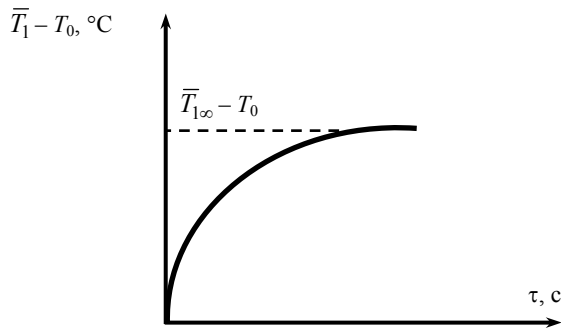


Рис. 2.3. Проведение эксперимента

Подводят постоянное напряжение  $U$  на нагреватель, расположенный в слое  $1$  (рис. 2.1), в результате чего на нагревателе выделяется теплота, объемной мощностью

$$W_1 = U^2 / (RV),$$

где  $R$  – сопротивление нагревателя,  $V$  – объем первого слоя.

Дожидаются наступления в системе стационарного состояния и по измеренной в стационарном состоянии разности среднеинтегральной температуры 1-го слоя  $\bar{T}_{1\infty}$  и температуры термостатирования  $T_0$  вычисляют теплопроводность исследуемого образца  $\lambda_4$  по формуле (2.6), полученной из решения краевой задачи теплопроводности (2.1) – (2.5) при  $\tau \rightarrow \infty$ :

$$\lambda_4 = h_4 / (2(\bar{T}_{1\infty} - T_0) / W_1 h_1 - h_1 / (6\lambda_1) - h_2 / \lambda_2 - h_3 / \lambda_3), \quad (2.6)$$

где  $h_1 = 2l_1$ ,  $h_2 = (l_2 - l_1)$ ,  $h_3 = (l_3 - l_2)$ ,  $h_4 = (l_4 - l_3)$ .

### 2.1.3. Структурная схема измерительной установки

Автоматизированная установка (АУ) состоит (рис. 2.4) из измерительной ячейки (ИЯ), жидкостного термостата 4, измерительного блока (ИБ) и персонального компьютера (ПК).

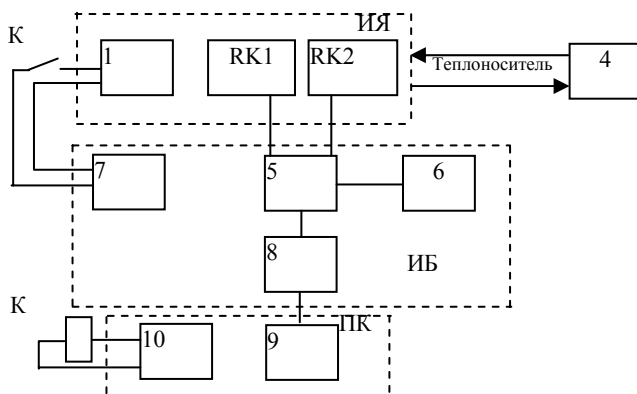


Рис. 2.4. Структурная схема измерительной установки

Алгоритм функционирования АУ заключается в следующем. Исследуемые образцы одинаковых размеров помещают в ИЯ (см. рис. 2.2). Включают термостат 4, обеспечивающий циркуляцию воды через теплообменники ИЯ и поддержание по-

стоянной температуры  $T_0$  на внешних поверхностях исследуемых образцов. Термометрами сопротивления  $RK2$  и  $RK1$ , изготовленными из медной проволоки, измеряют температуру термостатирования  $T_0$  и  $\bar{T}_1$  источника теплоты. Указанные термометры сопротивления включены в мостовую измерительную схему 5 (рис. 2.5), питаемую от источника питания 6, так, что выходное напряжение с мостовой схемы является функцией разности температур  $\bar{T}_1 - T_0$ . Выходной сигнал усиливается усилителем 8 и поступает на АЦП 9. ПК регистрирует изменение разности температур во времени. Напряжение питания подводится на нагреватель 1 с блока питания 7 при замыкании ключа К, управляемого ПК посредством ЦАП 10.

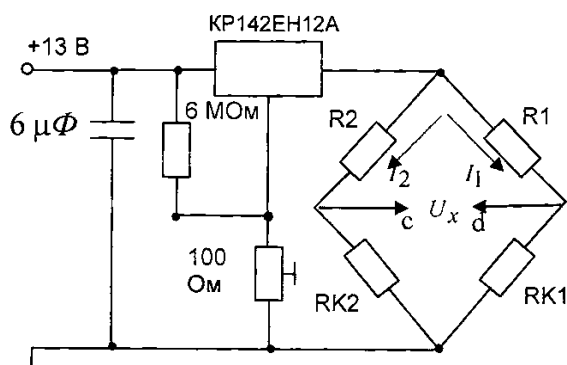


Рис. 2.5. Мостовая измерительная схема

## 2.2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Для расчета автоматизированной установки необходимо иметь следующие исходные данные:

- толщина исследуемых образцов  $h_4 = 8$  мм;
- диапазон измерения по теплопроводности  $\lambda_{4\min} = 0,05$  Вт/(м·К),  $\lambda_{4\max} = 0,95$  Вт/(м·К);
- максимальный перегрев образца выше температуры термостатирования в эксперименте не должен превышать  $t_{\max} = 10$  °С;
- сопротивление нагревателя  $R = 790$  Ом;
- толщина слоев измерительной ячейки  $h_1 = 0,3$  мм,  $h_2 = 0,3$  мм,  $h_3 = 1$  мм;
- материал слоев измерительной ячейки: первый слой – медь, второй слой – трансформаторная бумага, третий слой – сталь нержавеющая;
- диаметр первого слоя  $D = 0,1$  м;
- сопротивления измерительной схемы (рис. 2.5)  $R1 = R2 = 16$  Ом,  $RK1 = 14,2$  Ом,  $RK2 = 14,2$  Ом при температуре 0 °С;
- напряжение питания мостовой схемы  $U_{\text{пит}} = 13$  В.

## 2.3. ПОРЯДОК РАСЧЕТА

### 2.3.1. Определение напряжения питания нагревателя измерительной ячейки

По справочным данным [6] определим теплопроводности меди  $\lambda_1 = 250$  Вт/(мК), трансформаторной бумаги  $\lambda_2 = 0,15$  Вт/(мК), нержавеющей стали  $\lambda_3 = 42$  Вт/(мК).

Для того чтобы определить напряжение, подаваемое на нагреватель измерительной ячейки, рассчитаем вначале максимальную мощность  $W_1$ , обеспечивающую максимальный перегрев исследуемого образца выше температуры термостатирования  $t_{\max} = 10$  °С в эксперименте. Для этого воспользуемся формулой (1.6), из которой определим

$$W_1 = \frac{2t_{\max}}{h_1 \left( \frac{h_4}{\lambda_{4\max}} + \frac{1}{6} \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} \right)} =$$

$$= 2 \cdot 10 / \left( 0,3 \cdot 10^{-3} \left( \frac{8 \cdot 10^{-3}}{0,95} + \frac{1}{6} \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{250} + \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{0,15} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{42} \right) \right) = 6,45 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^3.$$

Определим объем  $V$  первого слоя модели (рис. 2.1)

$$V = h_1 \pi D^2 / 4 = 0,3 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 / (1000 \cdot 4) = 2,355 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Максимальное напряжение, подводимое к нагревателю, вычислим по формуле

$$U = \sqrt{W_1 R V} = \sqrt{6 \cdot 451 \cdot 612 \cdot 790 \cdot 2,355 \cdot 10^{-6}} = 109 \text{ В}.$$

### 2.3.2. Расчет мостовой измерительной схемы

Мостовая измерительная схема представлена на рис. 2.5.

Термометры сопротивления  $RK1$  и  $RK2$  включены в мостовую измерительную схему, питаемую от источника стабилизированного напряжения  $U_{пит}$  так, что выходное напряжение  $U_x$  связано с разностью температур  $\bar{T}_1 - T_0$  функциональной зависимостью.

Для получения зависимости выходного напряжения  $U_x$  от разности температур  $\bar{T}_1 - T_0$  рассмотрим мостовую измерительную схему (рис. 2.5). Обозначив токи, протекающие через цепи  $(R1 - RK1)$  и  $(R2 - RK2)$  соответственно  $I_1$  и  $I_2$ , получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} U_{пит} = I_1(R1 + RK1); \\ U_{пит} = I_2(R2 + RK2); \\ U_x = I_2R2 - I_1R1; \\ U_x = I_1RK1 - I_2RK2. \end{cases} \quad (2.7)$$

Так как в эксперименте температура  $T_0$  поддерживается постоянной, то температура термометра  $RK2$ , а следовательно, и его сопротивление также постоянны. Выразим сопротивление  $RK1$  через  $RK2$ :

$$RK1 = R1 \left( 1 / \left( \frac{R2}{R2 + RK2} - \frac{U_x}{U_{пит}} \right) - 1 \right). \quad (2.8)$$

Зависимость сопротивления от температуры  $t$  описывается уравнением

$$RK1 = RK1_0(1 + \alpha t), \quad (2.9)$$

где  $RK1_0$  – значение сопротивления  $RK1$  при  $t = 0$  °C,  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$  – температурный коэффициент сопротивления меди.

Аналогично, зная температуру термостатирования  $T_0$ , можно вычислить сопротивление  $RK2$  по формуле

$$RK2 = RK2_0(1 + \alpha T_0), \quad (2.10)$$

где  $RK2_0$  – значение сопротивления  $RK2$  при  $t = 0$  °C.

Искомая разность температур вычисляется по формуле

$$\bar{T}_1 - T_0 = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{RK1}{RK1_0} - \frac{RK2}{RK2_0} \right). \quad (2.11)$$

Объединив формулы (2.9) – (2.11), получим выражение для расчета зависимости искомой разности температур по выходному напряжению  $U_x$ .

$$\bar{T}_1 - T_0 = \frac{R1}{\alpha RK1_0} \left( 1 / \left( \frac{R2}{R2 + RK2} - \frac{U_x}{U_{пит}} \right) - 1 \right) - \frac{1}{\alpha} \frac{RK2}{RK2_0}.$$

Согласно заданию, измерения разности температур осуществляются в диапазоне от 0 до  $t_{max} = 10$  °C. Поэтому, выразив  $U_x$  относительно  $\bar{T}_1 - T_0$  из последней формулы, найдем зависимость  $U_x = f(\bar{T}_1 - T_0)$ . Результаты расчетов показаны графически на рис. 2.6.

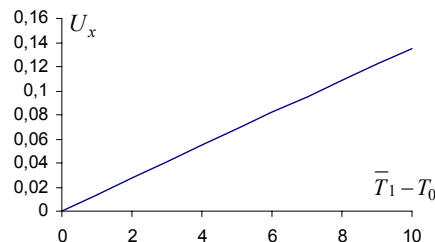


Рис. 2.6. График зависимости  $U_x = f(\bar{T}_1 - T_0)$

Из последнего графика определим максимальное напряжение на выходе измерительной схемы  $U_x^{max} = 160$  мВ при перепаде температур  $\bar{T}_1 - T_0 = 10$  °C.

### 2.3.3. Расчет усилителя постоянного тока

Усилитель постоянного тока включен в состав функциональной схемы (рис. 2.4) для согласования уровня выходного сигнала мостовой схемы с уровнем входного сигнала аналого-цифрового преобразователя. Порядок расчета усилителя приведен в разделе 1.5.

### 2.4. ВЫПОЛНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Графическая часть задания 2 включает в себя разработку электрической схемы автоматизированной установки, которая должна включать: измерительную схему с блоком питания, схему сопряжения измерительной схемы с микропроцессором, в том числе схему усилителя (каскада усилителей) и АЦП. Необходимо также разработать чертеж общего вида ИЯ.

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

### Тема 1. Проектирование автоматического аналитического прибора для измерения влажности воздуха

№ варианта	Пределы измерения влажности, %		Пределы измерения температуры воздуха, %		Тип градуировки	Напряжение питания, В	Максимальная рассеиваемая мощность P, Вт
	$\varphi_{\min}$	$\varphi_{\max}$	$t_{\min}$	$t_{\max}$			
1	20	100	15	35	50M	5	0,0064
2	30	100	15	35	50M	5	0,0064
3	40	100	15	35	50M	5	0,0064
4	50	100	15	35	50M	5	0,0064
5	20	90	15	35	50M	5	0,0064
6	20	100	20	30	100M	5	0,01
7	30	100	20	30	100M	5	0,01
8	40	100	20	30	100M	5	0,01
9	50	100	20	30	100M	5	0,01
10	20	90	20	30	100M	5	0,01
11	20	100	15	35	50П	5	0,005
12	30	100	15	35	50П	5	0,005
13	40	100	15	35	50П	5	0,005
14	50	100	15	35	50П	5	0,005
15	20	90	15	35	50П	5	0,005
16	20	100	20	30	100П	5	0,01
17	30	100	20	30	100П	5	0,01
18	40	100	20	30	100П	5	0,01
19	50	100	20	30	100П	5	0,01
20	20	90	20	30	100П	5	0,01
21	20	80	30	40	100П	5	0,01
22	30	90	20	30	100M	5	0,01
23	40	100	10	30	100П	5	0,01
24	50	100	30	35	100M	5	0,01
25	60	70	30	40	100П	5	0,01

### Тема 2. Проектирование автоматизированной установки для измерения теплопроводности

№ варианта	Толщины слоев, мм				Диапазон измерения теплопроводности, Вт/мК		$t_{\max}$ , °C	$R$ , Ом	$U_{\text{пит}}$ , В
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$\lambda_{4\min}$	$\lambda_{4\max}$	5	700	10
1	0,2	0,8	1	7	0,05	1,2	6	800	12
2	0,3	0,7	2	9	0,5	0,9	7	1500	13
3	0,4	0,6	0,5	12	0,01	0,4	8	800	15
4	0,5	0,5	1,2	20	0,2	1,5	9	500	20
5	0,6	0,4	1	18	0,2	0,9	10	600	10
6	0,2	0,3	2	16	0,05	1,2	12	400	12
7	0,3	0,2	1,5	15	0,5	0,9	3	1000	15
8	0,4	0,8	0,8	14	0,01	0,4	4	2000	20
9	0,5	0,7	0,9	12	0,2	1,5	5	3000	10
10	0,6	0,6	1	10	0,2	0,9	6	1500	12
11	0,7	0,5	2	5	0,7	2,6	7	2000	15
12	0,8	0,4	0,5	8	1	10	8	2500	20
13	0,2	0,3	1,2	20	0,5	3	9	3000	10
14	0,3	0,2	1	15	0,5	2,5	10	700	12

15	0,4	0,6	2	18	0,5	0,9	4	750	15
16	0,5	0,5	1,5	16	0,01	0,4	5	800	20
17	0,6	0,4	0,8	15	0,2	1,5	6	850	10
18	0,7	0,3	0,9	14	0,2	0,9	7	900	12
19	0,8	0,2	0,6	12	0,7	2,6	8	950	15
20	0,3	0,3	2	10	0,2	0,9	9	1000	20
21	0,5	0,6	1,2	18	0,5	0,9	7	600	10
22	0,6	0,5	1	16	0,5	0,4	8	400	12
23	0,7	0,4	2	15	0,01	1,5	9	1000	15
24	0,8	0,3	1,5	14	0,2	0,9	10	2000	20
25	0,3	0,2	0,8	11	0,2	2,6	4	3000	10

Пр и м е ч а н и я : для вариантов 1 – 10 материал слоев: 1-й слой – медь, 2-й слой – полиэтиленовая пленка, 3-й слой – медь; для вариантов 11 – 20 материал слоев: 1-й слой – медь, 2-й слой – трансформаторная бумага, 3-й слой – алюминий; для вариантов 1 – 10 сопротивления измерительной схемы  $R_1 = R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_{K10} = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_{K20} = 20 \text{ Ом}$ ; для вариантов 11 – 20 сопротивления измерительной схемы  $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_{K10} = 15 \text{ Ом}$ ,  $R_{K20} = 20 \text{ Ом}$ .

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваня, Я. Анализаторы газов и жидкостей. – М. : Энергия, 1970. – 525 с.
2. Психрометр аспирационный МВ-4М: техническое описание и инструкция по эксплуатации.
3. Кузнецов, Н.Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 323 с.
4. Мягин, Ю.А. 180 аналоговых микросхем / Ю.А. Мягин. – М : Патриот МПСС Символ-Р, 1993.
5. Пат. № 2243543 РФ, G01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов / С.В. Мищенко, С.В. Пономарев, П.В. Балабанов, А.В. Трофимов, Е.С. Пономарева. – Бюл. № 36, 27.12.2005.
6. Чиркин, В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. – М. : Машгиз, 1962. – 245 с.
7. Варгафтик, И.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / И.Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 360 с.

НОМОГРАММА  
для определения относительной влажности газа по температурам сухого и мокрого термометров

