

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

***Факультет технической кибернетики
Кафедра информационных измерительных технологий***

Руководство к лабораторной работе № 9/1

КАЛИБРОВКА РЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ РДВ

Авторы: Рабинович В.Б.; Кудряшов Э.А.

2005

1. ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Изучение оборудования стенда:

- мер относительной влажности на основе насыщенных солевых растворов;
- резистивных датчиков влажности;
- приборов для измерения сопротивления (цифровой измеритель иммитанса E7-22) и термометра CENTER 300.

2. Калибровка датчика влажности при двух значениях температуры: комнатной ϑ_k и более высокой, например, $\vartheta_k + 10^\circ \text{C}$;

3. Математическая обработка результатов градуировки с целью:

- оценки погрешности гистерезиса;
- аналитического описания градуировочной характеристики;
- оценки полосы неопределенности датчика влажности (погрешности линейности, нуля и чувствительности);
- оценки температурных коэффициентов нуля и чувствительности.

2. ДАТЧИК И АППАРАТУРА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ

Резистивный датчик влажности РДВ представляет собой двухэлектродную конструкцию на твердом диэлектрическом основании. Между электродами нанесена тонким слоем влагочувствительная углеродполимерная композиция, электрическое сопротивление которой возрастает при увлажнении [Л.1-Л.3]. Нелинейную зависимость сопротивления R датчика от влажности можно линеаризировать в координатах относительная влажность a (в % о.в.) и проводимость y (в мкСм) двумя прямолинейными отрезками для диапазонов 0-70 % о.в. и 70-100 % о.в.. Поэтому достаточно определить зависимость между относительной влажностью a и проводимостью y в интервале от 0 до 70 % о.в..

Для калибровки используем микрокамеры (бутылки емкостью 50 см³), наполненные на 75 % насыщенными растворами солей, что позволяет создать в воздушном объеме бутылок метрологически аттестованную влажность [Л.2, Л.4-Л.5]. В качестве солей использованы: LiCl (12 % о.в.), MgCl_2 (33 % о.в.), $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ (55 % о.в.) и NaCl (76 % о.в.). Признаком насыщенности раствора является наличие в бутылке твердого осадка. Для сушки датчика при 3 % о.в. перед сорбционной градуировкой использован пентоксид фосфора (P_2O_5). Для измерения сопротивления датчика РДВ при комнатной температуре имеется стенд с микрокамерами №1. Стенд с микрокамерами №2 снабжен нагревателем и позволяет получить температурную зависимость датчика РДВ. Датчик РДВ крепится в резиновой пробке, герметизирующей микрокамеры, на проволочных выводах, пропущенных сквозь резиновые пробки. К выводам с помощью зажимов типа «крокодил» и кабеля присоединяют измеритель иммитанса типа E7-22 [Л.8].

При включении прибора E7-22 цветную кнопку удерживают до появления на дисплее слов «АРО OFF». Кнопкой «L/C/R» устанавливают объект измерения R , кнопкой «ЧАСТ.» фиксируют частоту 120 Гц, кнопкой «ВВОД» устанавливают параллельную схему замещения и кнопкой «ДИАП.» устанавливают диапазон измерений «кОм». Перед началом измерений прибор должен быть включен на 5 минут для прогрева.

Для измерения температуры в микрокамере используют прибор типа CENTER 300 [Л.9] с термопарой, вмонтированной в резиновую пробку.

Для отсчета времени выдержки в микрокамере используют кварцевые часы «MINI CLOCK».

3.МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

1. Подключить нагреватель стенда к электрической сети и с помощью автотрансформатора типа «ЛАТР» установить напряжение 240 В . Через 10 минут снизить напряжение до 100 В . Включить для прогрева прибор CENTER 300.

2. Включить прибор Е7-22 и после его прогрева начать измерения сопротивления датчика РДВ в камерах стенда №1.

3. Перемещая датчик РДВ последовательно в микрокамеры с влажностью $3, 33, 55, 76, 55, 33, 12\%$ о.в., с выдержкой при каждой влажности в течении 3 мин. (за исключением $a=76\%$ о.в., где выдержка составляет 1 мин.), снимать градуировочные кривые для процессов сорбции (прямой ход) и десорбции влаги датчиком (обратный ход) с интервалом отсчета сопротивления 0.5 мин. Результаты записать в таблицу 1. Методика обработки результатов приведена в разделе 4.

4. Для калибровки датчиков РДВ при повышенной температуре перенести датчик в микрокамеру с 3% о.в. стенда №2 и выдержать в ней 10 минут для прогрева, а затем снять градуировочные кривые по методике п.3 и обработать по методике раздела 4

При этом следует учитывать, что значения о.в., воспроизводимые микрокамерами, также зависят от температуры. Относительная влажность, воспроизводимая мерой, зависит от температуры ϑ солевого раствора по линейному закону:

$$a(\vartheta) = a(20) - k \cdot (\vartheta - 20)$$

Значения относительной влажности $a(20)$, воспроизводимые мерами при 20°C , и их температурные коэффициенты k приведены в таблице 1.

Таблица 1 Численные значения $a(20)$ и k для насыщенных солевых растворов

соль	LiCl	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaCl	KNO ₃
$a(20), \%$ о.в.	12,0	33,0	55,0	76,0	93,0
$k, \%$ о.в./ $^\circ\text{C}$	0,01	0,08	0,28	0,02	0,22

Таблица 1 Зависимость сопротивления датчика РДВ от времени воздействия влажности

Сопротивление датчика РДВ ($\kappa\text{Ом}$) при температуре $\vartheta = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$							Примечание	
Время (с)	30	60	90	120	150	180		
а, % о.в.	3	—	—	—	—	—	Сушка до 3 % о.в.	
	12						Прямой ход (сорбция)	
	33							
	55							
	76			—	—	—	—	Увлажнение до 76 % о.в.
	55							Обратный ход (десорбция)
	33							
12								

4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГРАДУИРОВКИ

1. Учет температуры помещения, где проводилась градуировка

Введем число M и номера j ступеней изменения о.в.: $M := 3 \quad j := 0, 1.. M - 1$

Введем значение температуры помещения θ ($^{\circ}\text{C}$) $\theta := 24$

Образуем вектор \mathbf{a} значений о.в. упомянутых мер с учетом их зависимости от температуры в соответствии с данными таблицы 2:

При прямом ходе градуировки, когда датчик, выдержанный в мере $a = 3\% \text{ о.в.}$, переносится в меры с более высоким уровнем о.в.:

$$a_0 := 12 - 0.02 \cdot (\theta - 20) \quad a_1 := 33 - 0.08 \cdot (\theta - 20) \quad a_2 := 55 - 0.28 \cdot (\theta - 20)$$

При обратном ходе градуировки, когда датчик, выдержанный в мере $a = 76\% \text{ о.в.}$, переносится в меры с более низким уровнем о.в.:

$$a_2 := 55 - 0.28 \cdot (\theta - 20) \quad a_1 := 33 - 0.08 \cdot (\theta - 20) \quad a_0 := 12 - 0.02 \cdot (\theta - 20)$$

Таким образом, при температуре θ вектор относительных влажностей, воспроизводимых мерами, имеет компоненты ($\% \text{ о.в.}$):

$$\mathbf{a}^T = (11.92 \quad 32.68 \quad 53.88)$$

2. Экстраполяция результатов измерения сопротивления ко времени окончания переходных процессов.

Представим результаты измерения времени t_i (с) и сопротивления $R_{i,j}$ (кОм), где j - номер ступени о.в., а i - номер отсчета времени.

$N := 6 \quad i := 0, 1.. N - 1$ Число и порядковый номер отсчета времени

$\Delta t := 30 \quad t_i := \Delta t \cdot (i + 1)$ Интервал времени между отсчетами, с

$t_i =$ $R1_{i,0} :=$ $R1_{i,1} :=$ $R1_{i,2} :=$ $R2_{i,2} :=$ $R2_{i,1} :=$ $R2_{i,0} :=$

30	64.1	66.6	69.8	95.4	86.0	76.8
60	64.3	66.9	71.0	93.2	83.7	75.0
90	64.8	67.4	71.9	91.3	82.0	73.7
120	65.1	67.7	72.8	90.5	80.9	72.6
150	65.3	67.9	73.5	89.4	80.0	71.8
180	65.4	68.1	74.2	89.0	79.3	71.0

Построим семейства кривых $R1_{i,j}$ и $R2_{i,j}$:

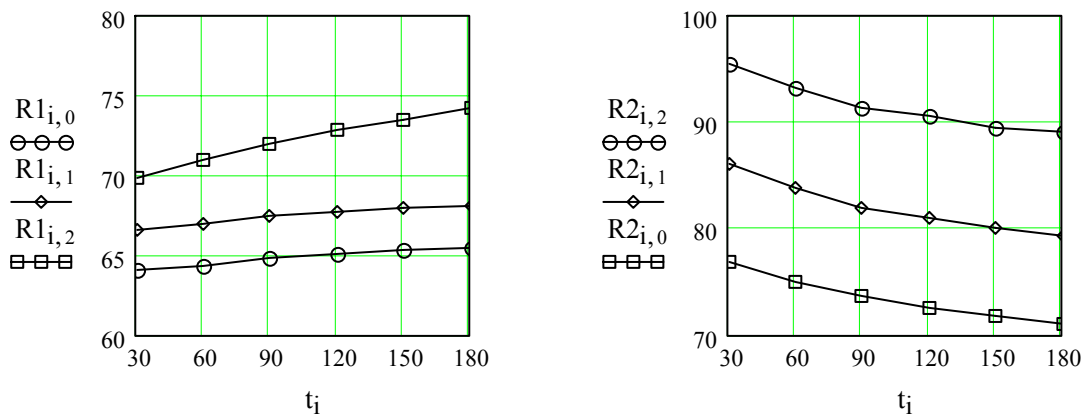


Рис.1 Графики переходных процессов датчика влажности при сорбции и десорбции

Из графика видно, что за время $0 < t_i < 180$ с сопротивление датчика не успевает достичь установившегося значения ни на одной из ступеней о.в.. Это можно объяснить инерционностью датчика влажности и процессами установления номинального значения a_j меры влажности после снятия крышки и установки датчика. Следовательно, для получения истинных значений сопротивлений Rm_j , соответствующих значениям a_j мер влажности, необходимо либо существенно увеличить время измерения, либо экстраполировать ход полученных кривых для больших значений времени.

Ниже рассмотрен метод экстраполяции, основанный на предположении, что упомянутые переходные процессы описываются экспоненциальной функцией времени. Основанием для принятия этой гипотезы, как показано в [Л.6], является линейная зависимость от времени t_i параметра $x_{i,j}$:

$$x_{1i,j} := \frac{t_i}{R_{1i,j}} \quad x_{2i,j} := \frac{t_i}{R_{2i,j}}$$

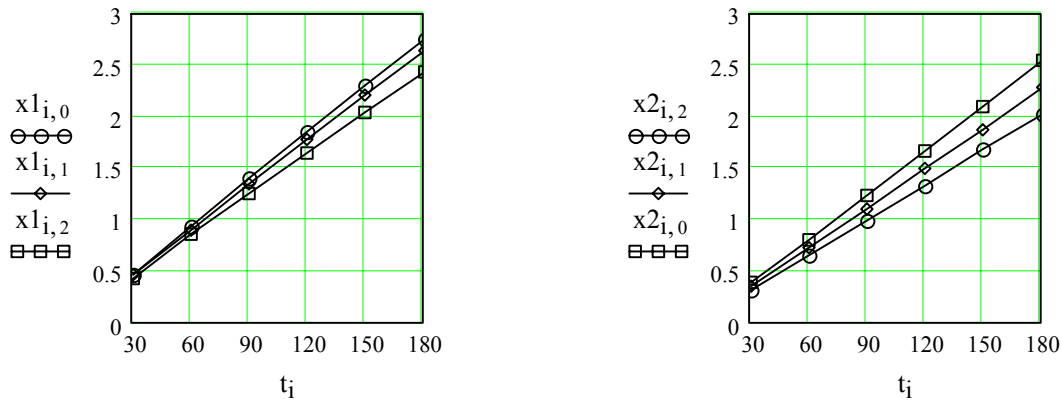


Рис.2 Графики функций $x_{1i,j}$ и $x_{2i,j}$

Так как на графике получено семейство прямых, то в соответствии с [Л.6] установившиеся значения сопротивления датчика Rm_j могут быть рассчитаны по формулам:

$$R_{1mj} := \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_{1i,j} \cdot t_i - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} t_i \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_{1i,j}}{\sum_{i=0}^{N-1} (x_{1i,j})^2 - \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} (x_{1i,j}) \right]^2}$$

$$R_{2mj} := \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_{2i,j} \cdot t_i - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} t_i \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_{2i,j}}{\sum_{i=0}^{N-1} (x_{2i,j})^2 - \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} (x_{2i,j}) \right]^2}$$

Результаты экстраполяции экспериментальных данных $R_{i,j}$ (кОм) для вектора влажности a_j (%) по этой формуле дают:

$$a^T = (11.92 \ 32.68 \ 53.88) \quad R1m^T = (65.8 \ 68.5 \ 75.2) \quad R2m^T = (69.9 \ 78 \ 87.6)$$

3. Построение градуировочной характеристики резистивного датчика влажности

Градуировочной характеристикой резистивного датчика называется зависимость $a=f(Ym)$, где Ym - проводимость датчика. Поэтому произведем пересчет сопротивлений R (кОм) в проводимость Y (мкСм):

$$Y1m := \frac{1000}{R1m} \quad Y2m := \frac{1000}{R2m}$$

$$Y1m^T = (15.208 \ 14.608 \ 13.302) \quad Y2m^T = (14.31 \ 12.826 \ 11.413)$$

Датчики влажности обладают значительным гистерезисом, обусловленным физикой процессов сорбции и десорбции влаги чувствительным элементом. Величина гистерезиса превышает случайные погрешности процедуры градуировки и ее обычно относят к категории систематических погрешностей. Один из способов оценки погрешности гистерезиса заключается в оценке средней разности проводимости при прямом и обратном ходах градуировки: $mean(Y2m-Y1m)$.

Приведенное значение погрешности гистерезиса γ_h (%) испытуемого датчика составит:

$$\gamma_h := \frac{mean(Y1m - Y2m)}{2 \cdot (max(Y2m) - min(Y2m))} \cdot 100 \quad \gamma_h = 26.28 \quad \%$$

В качестве нормирующего значения при этом берется диапазон изменения выходной величины датчика влажности: $max(Y2m) - min(Y2m)$.

Для оценки градуировочной характеристики датчика влажности используют массив Ym , зависимость которого от влажности a изображена на графике пунктирной линией :

$$Ym := \frac{Y1m + Y2m}{2} \quad Ym^T = (14.759 \ 13.717 \ 12.357)$$

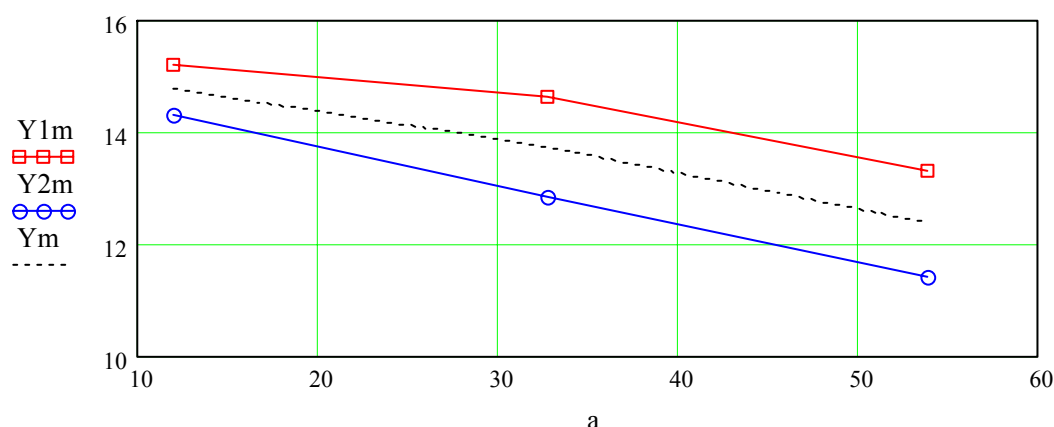


Рис.3 Зависимость от влажности a установившихся значений проводимости: при сорбции- $Y1m$, десорбции- $Y2m$, после усреднения- Ym

Градуировочную характеристику резистивного датчика обычно представляют прямой: $a(Y) = A_0 + A_1 Y$, коэффициенты которой A_0 , A_1 определяются методом наименьших квадратов (МНК). В системе MathCAD процедура МНК реализуется следующим образом:

Создаем вспомогательную матрицу Z

$$Z_{j,0} := 1 \quad Z_{j,1} := Y_{mj}$$

Вычисляем коэффициенты A_0, A_1

$$Z^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 14.759 & 13.717 & 12.357 \end{pmatrix}$$

$$A := (Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot (Z^T \cdot a) \quad A^T = (269.386 \quad -17.38)$$

Градуировочную характеристику резистивного датчика в диапазоне $0 < a < 70$ % о.в. запишем в виде:

$$a1(Y) := A_0 + A_1 \cdot Y$$

В соответствии с последним уравнением номинальные значения проводимости датчика РДВ при $a1=0$ и при $a1=70$ % о.в. равны соответственно (мкСм):

$$Y0 := \frac{-A_0}{A_1} \quad Y0 = 15.5 \quad Y70 := \frac{70 - A_0}{A_1} \quad Y70 = 11.472$$

При влажности $a=100$ % о.в. проводимость датчика РДВ равна нулю. Поэтому для диапазона $70 < a < 100$ % о.в. градуировочная характеристика будет иметь вид:

$$a2(Y) := 100 - 30 \cdot \frac{A_1}{70 - A_0} \cdot Y$$

Применяя логическую функцию *if* объединим $a1(y)$ и $a2(y)$ и получим градуировочную характеристику датчика влажности РДВ в диапазоне от 0 до 100 %:

$$a3(Y) := \text{if}(a1(Y) < 70, a1(Y), a2(Y))$$

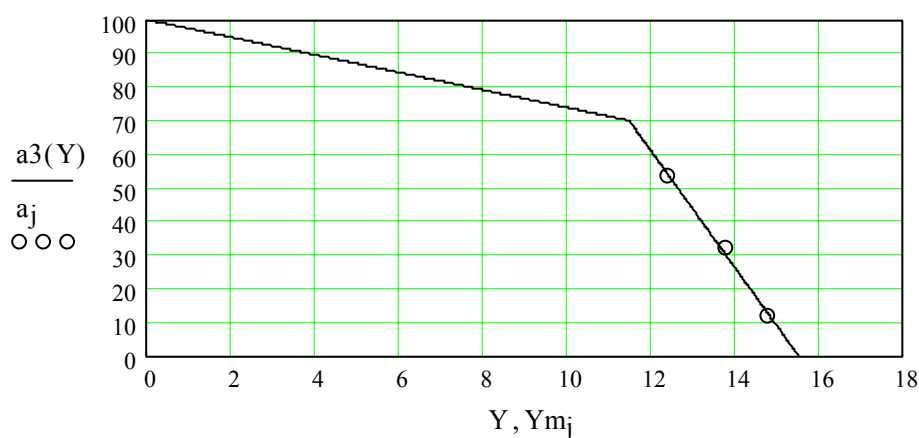


Рис.4 Градуировочная характеристика резистивного датчика влажности без учета гистерезиса

3. Оценка интервала неопределенности емкостного датчика влажности по результатам калибровки

На графике градуировочной характеристики кружками нанесены экспериментальные точки a_j и Y_{mj} . Поле разброса этих точек вокруг градуировочной прямой характеризует полосу неопределенности датчика влажности, порожденную: 1) нелинейностью датчика; 2) неточностью задания ступеней влажности a_j , измерения моментов времени t_i , сопротивлений R_{ij} .

Изобразим графически зависимость абсолютной погрешности аппроксимации Δa от Y_{mj} :

$$\Delta a1_j := a_j - a1(Y_{mj}) \quad \Delta a11_j := |\Delta a1_j| \quad \max(\Delta a11) = 1.693 \quad (\% \text{ о.в.})$$

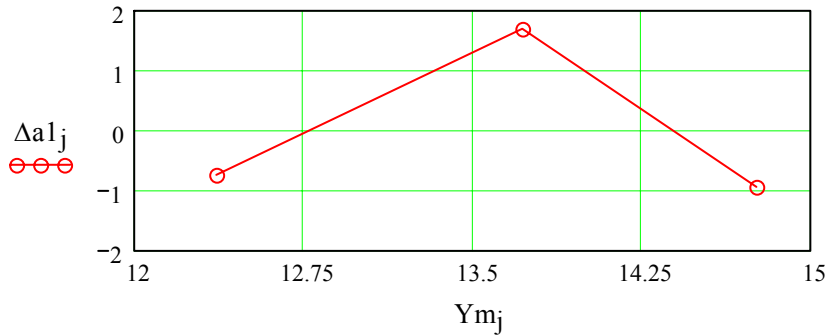


Рис.5 Погрешность аппроксимации реальной градуировочной кривой $a(Y_m)$ прямой $a_1(Y_m)$

В соответствии с рекомендациями [Л.8] неопределенность градуировочной характеристики можно представить указанием стандартных неопределенностей s коэффициентов A_0 и A_1 , вычисляемых по формулам:

$$sA_0 := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-1} (a_j - a_1(Y_{mj}))^2 \cdot \sum_{j=0}^{M-1} (Y_{mj} - Y_0)^2}{M \cdot (M - 2) \cdot \sum_{j=0}^{M-1} (Y_{mj} - \text{mean}(Y_m))^2}} \quad sA_0 = 2.6 \quad \% \text{ о.в.}$$

$$sA_1 := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-1} (a_j - a_1(Y_{mj}))^2}{(M - 2) \cdot \sum_{j=0}^{M-1} (Y_{mj} - \text{mean}(Y_m))^2}} \quad sA_1 = 1.221 \quad (\% \text{ о.в.})/мкСм$$

Найдем квантиль t_{pd} распределения Стьюдента для доверительной вероятности p и числа степеней свободы d :

$$p := 0.95 \quad d := 2 \cdot M - 2$$

Используя встроенную функцию MathCAD для квантилей распределения Стьюдента, получим:

$$t_{pd} := qt(p, d) \quad t_{pd} = 2.132$$

Тогда неопределенность коэффициента A_0 (смещения нуля) датчика влажности может быть оценена из выражения:

$$u_0 := t_{pd} \cdot sA_0 \quad u_0 = 5.543 \quad \% \text{ о.в.}$$

Неопределенность коэффициента A_1 (чувствительности датчика влажности) может быть оценена из выражения:

$$u_s := t_{pd} \cdot sA_1 \quad u_s = 2.603 \quad (\% \text{ о.в.})/нФ$$

Приведенная к диапазону $0 < a < 70$ % о.в. погрешность нуля датчика влажности составит:

$$\gamma_0 := \frac{u_0}{70} \cdot 100 \quad \gamma_0 = 7.918 \quad \%$$

Относительная погрешность чувствительности датчика влажности будет:

$$\gamma_S := \frac{u_S}{A_1} \cdot 100 \quad \gamma_S = -14.977 \quad \%$$

Без учета погрешности гистерезиса, приведенная погрешность нуля и погрешность чувствительности резистивного датчика влажности РДВ в диапазоне $0 < a < 70$ % о.в. составят:

$$\gamma_0 = 7.918 \quad \% \quad \gamma_S = -14.977 \quad \%$$

В диапазоне $70 < a < 100$ % о.в. погрешность резистивного датчика не нормируется.

4.ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Рабинович, В.Ю. Сальников Датчик влажности на основе углерода. Датчики и системы, №4,2000, с.43-44
2. М.А.Берлинер. Измерение влажности. М., Энергия, 1973
3. В.Г.Кнорринг, А.Н.Окатыев, В.Б.Рабинович, В.Ю.Сальников. Оптимизация ступенчатых измерений./ Сборник докладов международной конференции по мягким измерениям, СПб, 25-28 мая 1999, с.35-37
4. Е.А.Гершкович, С.Н.Гершкович. Насыщенные растворы солей в качестве образцовых мер в гигрометрии, Бюлл. СЭВ «Научные приборы», №12, 1978, с.24-30
5. В.Ф.Мандрохлебов и др. Применение солевых гигростатов для поверки и испытания гигрометров. Измерительная техника, №7, 1970
6. В.Н.Львовский. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая школа, 1988. –233 с (см. с.61-63 Методика предсказания предельных значений величин, изменяющихся по экспоненте).
7. Д.А.Гурский. Вычисления в MathCAD. Минск. Новое знание. 2003. –814 с.
8. Цифровой измеритель иммитанса Е7-22. Руководство по эксплуатации, М.: 2004
9. Измеритель температуры CENTER-300. Руководство по эксплуатации, М.: 2004