

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Факультет технической кибернетики
Кафедра информационных измерительных технологий**

Руководство к лабораторной работе № 9/2

КАЛИБРОВКА ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

Авторы: Кудряшов Э.А. ; Рабинович В.Б.

2005

1. ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Изучение оборудования стенда:

- мер относительной влажности на основе насыщенных солевых растворов;
- емкостных датчиков влажности;
- приборов для измерения электрической емкости (цифрового моста типа *E7-8*), напряжения (портативного мультиметра *DT-830 B*), термометра *CENTER 300*.

2 Тренировка датчиков влажности перед калибровкой.

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

4. 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

Объектом исследования являются емкостные датчики влажности в интегральном исполнении фирмы Sensera [Л.1]: датчики типа *808* и *818* с выходной величиной в виде электрической емкости (рис.1а) и типа *808H5V5* и *808H5V6* со встроенными преобразователями емкости в напряжение постоянного тока (рис.1б). Чувствительным элементом таких датчиков является емкостной преобразователь с пленочными электродами, размещенными в материале, диэлектрическая проницаемость которого изменяется при сорбции содержащихся в воздухе водяных паров,.



Рис.1 Емкостные датчики влажности фирмы Sensera

Для калибровки используем микрокамеры (бутылки емкостью 50 см^3), наполненные на 75 % насыщенными растворами солей, что позволяет создать в воздушном объеме бутылки метрологически аттестованную влажность [Л.2-Л.4]. В качестве солей использованы: LiCl (12 % о.в.), MgCl_2 (33 % о.в.), $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ (55 % о.в.), NaCl (76 % о.в.) и KNO_3 (93 % о.в.). Признаком насыщенности раствора является наличие в бутылке твердого осадка. Для калибровки емкостных датчиков влажности при комнатной температуре имеется набор микрокамер №1. Набор микрокамер №2 снабжен нагревателем и позволяет повысить температуру микрокамер до $30\text{-}33^\circ\text{C}$. 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./°C	0.01	0.08	0.28	0.02	0.22

Выводы емкостных датчиков 808 или 818 припаяны к двум проволочным держателям, пропущенным сквозь резиновую пробку, герметизирующую микрокамеры. К держателям с внешней стороны пробки припаяны жилы двух экранированных проводников (линий связи). Линии связи заканчиваются платой с тремя щтырями, к которым присоединяют три зажима цифрового моста E7-8. Два потенциальных зажимов моста присоединяют к жилам линий связи, а экран моста - к экранам линий связи. При этом паразитная емкость и сопротивление изоляции между жилами и экранами соединительных проводов не влияет на результат измерения [Л.7]. Для калибровки датчиков влажности типа 808 H5V5 или 808 H5V6 необходимы пробки с тремя держателями и трехпроводной линией связи для подключения источника питания с напряжением 5В (для датчика 808 H5V5) или 3.3 В (для датчика 808 H5V6) и измерения напряжения на выходе с помощью мультиметра DT-830 В [Л.8].

Для измерения температуры в наборе микрокамер № 2 используют прибор типа CENTER 300 [Л.9] с термопарой, вмонтированной в резиновую пробку.

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

3. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

1. Включить для прогрева термометр CENTER 300. Подключить нагреватель набора микрокамер №2 к электрической сети 220 В. Через 25 минут нагреватель микрокамер следует выключить. Установившаяся температура набора микрокамер № 2 при этом должна быть в пределах 30-34 °С;
2. Включить мост E7-8 и после его прогрева начать измерения емкости датчика влажности, установленного в выносной микрокамере, не содержащей солевых растворов. При этом происходит проверка работоспособности аппаратуры и измеряется емкость датчика, соответствующая влажности воздуха в помещении лаборатории;
3. Провести тренировку датчика влажности, используя две микрокамеры набора №1. Для этого испытуемый датчик последовательно помещают в камеры с относительной влажностью 3, 97, 3, 97, 3 % о.в. с выдержкой при каждой влажности по 3 мин. Финишные значения емкости датчика в каждой из упомянутых камер (после выдержки $t=3$ минуты) занести в протокол;
4. Градуировка датчика влажности состоит из двух циклов, необходимых для выявления гистерезиса. Первый цикл градуировки (прямой ход или ход сорбции влаги) начинается с микрокамеры 3% о.в., в которой происходит сушка датчика (в течение 3 мин.). Далее перемещают датчик последовательно в микрокамеры с влажностью 12, 33, 55, 76 и 93 % о.в. с выдержкой при каждой влажности в течение 3 мин. При этом необходимо через каждые 30 с заносить в протокол (см. таблицу 2) текущие значения емкости датчика C_{ij} , где i -индекс текущего времени, а j -индекс меры влажности. Второй цикл градуировки (обратный ход или ход десорбции) начинается с увлажнения датчика до 97 % о.в. в соответствующей микрокамере в течение 1 мин. Далее перемещают датчик последовательно в микрокамеры с влажностью 93, 76, 55, 33, 12 % о. в. с выдержкой при каждой влажности в течение 3 мин. При этом, как и при прямом ходе, необходимо через каждые 30 с заносить в

протокол (см. таблицу 2) текущие значения емкости датчика. Методика обработки результатов градуировки приведена в разделе 4;

5. Калибровка емкостного датчика влажности при повышенной температуре осуществляется с помощью подогреваемого набора микрокамер № 2. Калибровка осуществляется после выключения нагревателя из сети. Методика калибровки при повышенной температуре аналогична методике, изложенной выше (см. п.4). Отличие, во-первых, состоит в том, что время нахождения датчика в камере 3 % о.в. увеличивается до 10 минут, что необходимо для прогрева датчика влажности, а также для установления регулярного режима охлаждения микрокамер после выключения нагревателя из сети. Во-вторых, необходимо измерять температуру каждой из микрокамер как на прямом, так и на обратном ходах градуировки (сразу после окончания регистрации процесса изменения емкости датчика влажности, установленного в данную микрокамеру). В качестве температуры ϑ микрокамеры целесообразно принять среднее значение определенных таким образом температур этой и предыдущей микрокамер.

Таблица 2. Зависимость емкости датчика влажности от времени воздействия влажности

Емкость датчика $C_{i,j}$ (нФ) при температуре $\vartheta = \dots\dots\dots$ °С		Примечание						
Время t_i (с)	30		60	90	120	150	180	
a_j % о.в	3	–	–	–	–	–	–	Сушка до 3 % о.в.
	12							Прямой ход (сорбция)
	33							
	55							
	76							
	93							
	97			–	–	–	–	Увлажнение до 97 % о.в.
	93							Обратный ход (десорбция)
	76							
	55							
	33							
	12							

4. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ГРАДУИРОВКИ

1. Учет температуры помещения, где проводилась градуировка .

Введем число M и номер j ступеней изменения о.в.: $M := 5$ $j := 0, 1.. M - 1$

Введем значение температуры помещения, $^{\circ}C$.: $\theta := 22$

Образуем вектор a номинальных значений о.в. упомянутых ступеней ($\% \text{ о.в.}$) с учетом их зависимости от температуры в соответствии с данными таблицы 2 .

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

$$\begin{aligned} a_0 &:= 12 - 0.02 \cdot (\theta - 20) & a_1 &:= 33 - 0.08 \cdot (\theta - 20) & a_2 &:= 55 - 0.28 \cdot (\theta - 20) \\ a_3 &:= 76 - 0.02 \cdot (\theta - 20) & a_4 &:= 93 - 0.22 \cdot (\theta - 20) \end{aligned}$$

При обратном ходе, датчик после увлажнения в мере $a = 97\% \text{ о.в.}$, переносится в меры с более низким уровнем о.в..

$$\begin{aligned} a_4 &:= 93 - 0.22 \cdot (\theta - 20) & a_3 &:= 76 - 0.02 \cdot (\theta - 20) & a_2 &:= 55 - 0.28 \cdot (\theta - 20) \\ a_1 &:= 33 - 0.08 \cdot (\theta - 20) & a_0 &:= 12 - 0.02 \cdot (\theta - 20) \end{aligned}$$

Таким образом, при температуре помещения $\theta = 22^{\circ}C$ вектор относительных влажностей, воспроизводимых мерами, имеет компоненты ($\% \text{ о.в.}$):

$$a^T = (11.96 \ 32.84 \ 54.44 \ 75.96 \ 92.56)$$

2. Экстраполяция результатов измерения емкости .

Представим результаты измерения емкости испытуемого датчика (таблица 2) в виде матрицы C_{ij} , где i - номер отсчета времени, а j - номер ступени о.в.

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

$\Delta t := 30$ $t_i := \Delta t \cdot (i + 1)$ Текущее время отсчетов t_i , с

$t_i :=$ $C1_{i,0} :=$ $C1_{i,1} :=$ $C1_{i,2} :=$ $C1_{i,3} :=$ $C1_{i,4} :=$

30	95.40	97.99	102.1	105.9	109.7
60	95.78	98.95	103.1	107.0	110.6
90	96.09	99.64	103.8	107.7	111.3
120	96.31	100.1	104.4	108.2	111.9
150	96.48	100.5	104.7	108.6	112.3
180	96.61	100.8	104.9	108.9	112.7

$t_i :=$ $C2_{i,4} :=$ $C2_{i,3} :=$ $C2_{i,2} :=$ $C2_{i,1} :=$ $C2_{i,0} :=$

30	114.1	114.2	111.5	107.1	102.6
60	114.1	113.7	110.5	106.1	101.4
90	114.2	113.3	109.8	105.3	100.6
120	114.3	113.0	109.3	104.7	100.0
150	114.4	112.7	108.9	104.2	99.60
180	114.4	112.5	108.6	103.9	99.20

Построим семейство кривых, характеризующих изменение емкости $C_{ij}(n\Phi)$ датчика от времени t_i , параметром которых будет j - номер ступени изменения о.в. или элементы вектора $a_j(\% \text{ о.в.})$. На графике легко проверить качество измерений, т.к. кривые изменения емкости во времени должны быть **монотонными**. Наличие зигзагообразных кривых, изломов и т.д. на графике свидетельствует о небрежно выполненном эксперименте, который необходимо будет повторить.

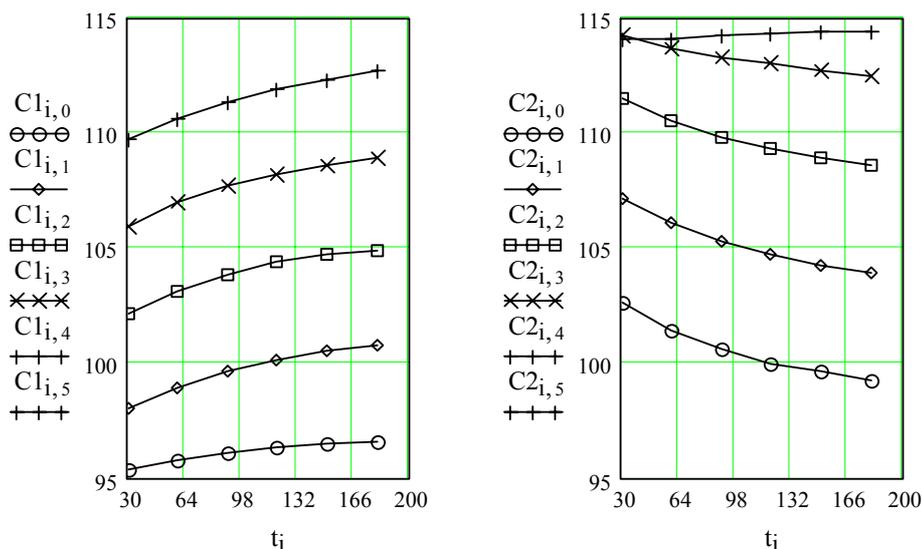


Рис.1 Графики переходных процессов датчика влажности при сорбции и десорбции

Из графика также видно, что за время $0 < t_i < 180$ с емкость 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 емкости $Cm_j(n\Phi)$, 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.5], является линейная зависимость от времени t_i параметров $x1_{ij}$ (для прямого хода) и $x2_{ij}$ (для обратного хода):

$$x1_{i,j} := \frac{t_i}{C1_{i,j}} \quad x2_{i,j} := \frac{t_i}{C2_{i,j}}$$

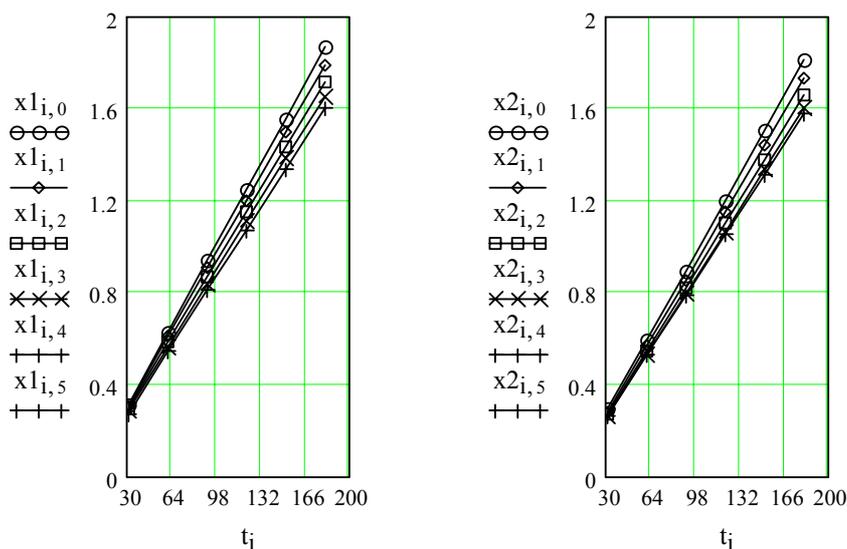


Рис.2 Графики функций $x1_{i,j}$ и $x2_{i,j}$

Так как на графиках получены семейства прямых, то в соответствии с [Л.5] установившиеся значения емкости датчика $C1m_j$ (для прямого хода) и $C2m_j$ (для обратного хода) могут быть рассчитаны по формулам:

$$C1m_j := \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x1_{i,j} \cdot t_i - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} t_i \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x1_{i,j}}{\sum_{i=0}^{N-1} (x1_{i,j})^2 - \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} (x1_{i,j}) \right]^2}$$

$$C2m_j := \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x2_{i,j} \cdot t_i - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} t_i \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x2_{i,j}}{\sum_{i=0}^{N-1} (x2_{i,j})^2 - \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} (x2_{i,j}) \right]^2}$$

Результаты экстраполяции экспериментальных данных $C_{i,j}(n\Phi)$ для вектора влажности a_j (%) по этим формулам дают:

$$a^T = (11.96 \ 32.84 \ 54.44 \ 75.96 \ 92.56)$$

$$C1m^T = (96.9 \ 101.4 \ 105.6 \ 109.6 \ 113.4)$$

$$C2m^T = (98.5 \ 103.2 \ 108 \ 112.1 \ 114.5)$$

3. Построение градуировочной характеристики емкостного датчика влажности

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 среднего значения отклонений выходной величины при прямом и обратном ходах градуировки: $mean(C2m - C1m)$.

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

$$\gamma_h := \frac{mean(C2m - C1m)}{2 \cdot (\max(C2m) - \min(C2m))} \cdot 100 \quad \gamma_h = 5.931$$

В качестве нормирующего значения при этом берется диапазон изменения выходной величины датчика влажности: $\max(C2m) - \min(C2m)$.

Градуировочной характеристикой датчика влажности называется зависимость $a = f(Cm)$. Для оценки градуировочной характеристики датчика влажности используют массив Cm , зависимость которого от влажности a изображена на графике пунктирной линией :

$$Cm := \frac{C1m + C2m}{2}$$

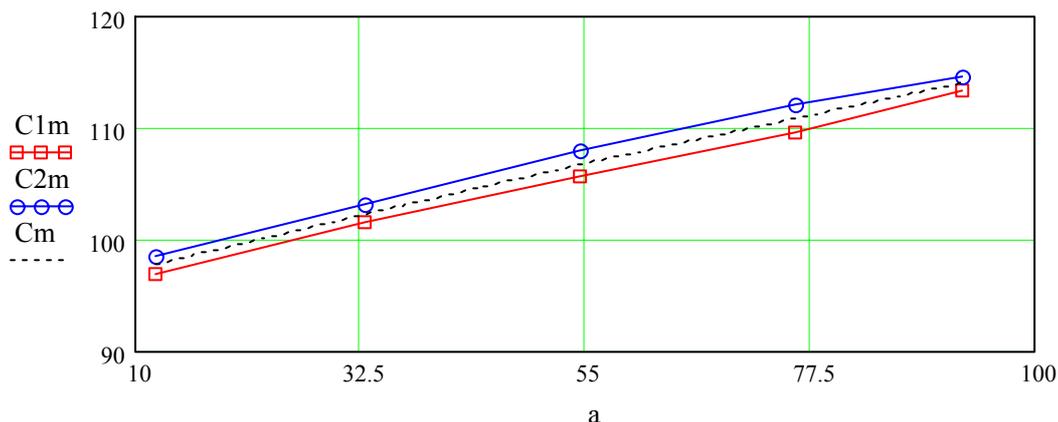


Рис.3 Зависимость от влажности a установившихся значений емкости: при сорбции- $C1m$, десорбции- $C2m$, после усреднения- Cm

Обычно эту зависимость аппроксимируют прямой: $a(Cm) = A_0 + A_1 Cm$, коэффициенты которой A_0 , A_1 определяются методом наименьших квадратов. Процедура МНК в матричном виде реализуется в MathCAD следующим образом.

Создаем вспомогательную матрицу Z :

$$Z_{j,0} := 1 \quad Z_{j,1} := Cm_j \quad Z^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 97.7 & 102.3 & 106.8 & 110.9 & 113.9 \end{pmatrix}$$

Вычисляем коэффициенты A_0 , A_1 :

$$A := (Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot (Z^T \cdot a) \quad A^T = (-474.78 \quad 4.97)$$

и получаем аналитическое представление (формулу) градуировочной характеристики:

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

Вычислим номинальное значение емкости сухого датчика ($a=0$)

$$Ce0 := \frac{-A_0}{A_1} \quad Ce0 = 95.538$$

Вычислим номинальное значение емкости датчика при $a=100\%$ о.в.:

$$Ce100 := \frac{100 - A_0}{A_1} \quad Ce100 = 115.661$$

Представим градуировочную характеристику емкостного датчика влажности в графическом виде:

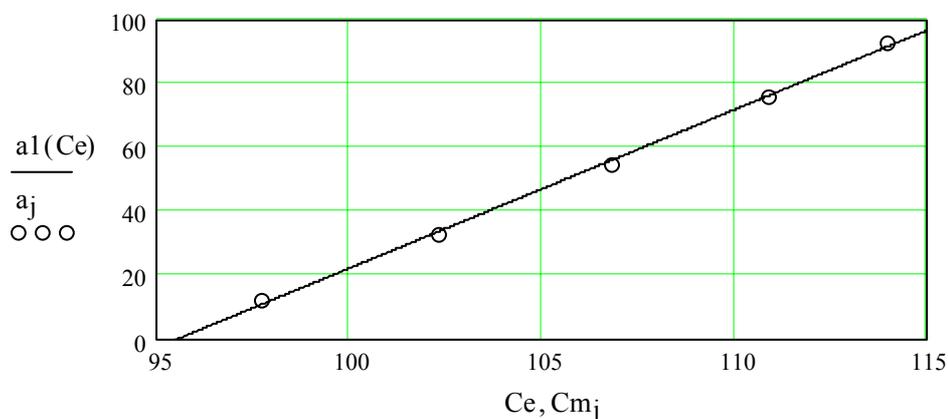


Рис.4 Градуировочная характеристика емкостного датчика влажности (без учета гистерезиса).

4. Оценка интервала неопределенности емкостного датчика влажности по результатам калибровки

На графике градуировочной характеристики кружками нанесены экспериментальные точки a_j и Cm_j . 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 , емкости C_{ij} .

Изобразим графически зависимость абсолютной погрешности аппроксимации Δa_l от Cm :

$$\Delta a_{1j} := a_j - a_1(Cm_j) \quad \Delta a_{11j} := |\Delta a_{1j}| \quad \max(\Delta a_{11}) = 1.438 \quad (\% \text{ о.в.})$$

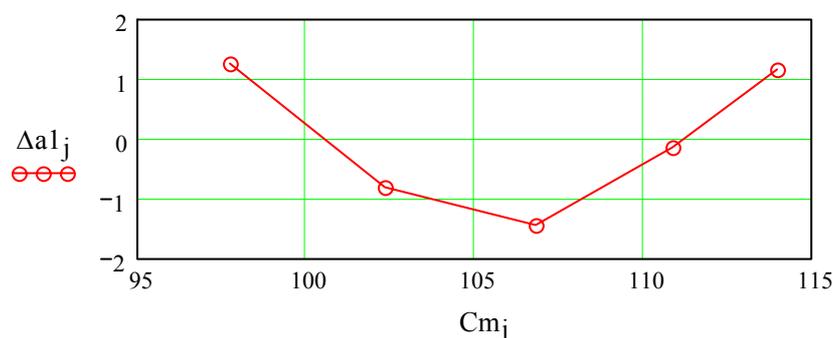


Рис.5 Погрешность аппроксимации экспериментальной зависимости $a(Cm)$ линейной характеристикой $a_1(Cm)$

Из графика видно, что распределение погрешности аппроксимации по диапазону имеет систематический характер, близкий к параболическому. Это позволяет трактовать погрешность аппроксимации как погрешность линейности испытуемого датчика влажности. Численное значение погрешности линейности γ_L (приведенной к диапазону измерения влажности $0 < a < 100$ % о.в.) не превышает:

$$\gamma_L := \frac{\max(\Delta a_{11})}{100 - 0} \cdot 100 \quad \gamma_L = 1.438 \quad \%$$

Предположим, что датчик влажности будет эксплуатироваться в составе системы, где возможно программными способами организовать коррекцию погрешности линейности. Для автоматической коррекции погрешности линейности, изображенной на рис.5, достаточно экспериментальную зависимость a от Cm аппроксимировать кривой второго порядка и определить ее коэффициенты.

Создаем снова вспомогательную матрицу Z :

$$Z_{j,0} := 1 \quad Z_{j,1} := Cm_j \quad Z_{j,2} := (Cm_j)^2$$

$$Z^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 97.7 & 102.3 & 106.8 & 110.9 & 113.9 \\ 9.5 \times 10^3 & 1 \times 10^4 & 1.1 \times 10^4 & 1.2 \times 10^4 & 1.3 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Вычисляем коэффициенты A_{l0} , A_{l1} , A_{l2} :

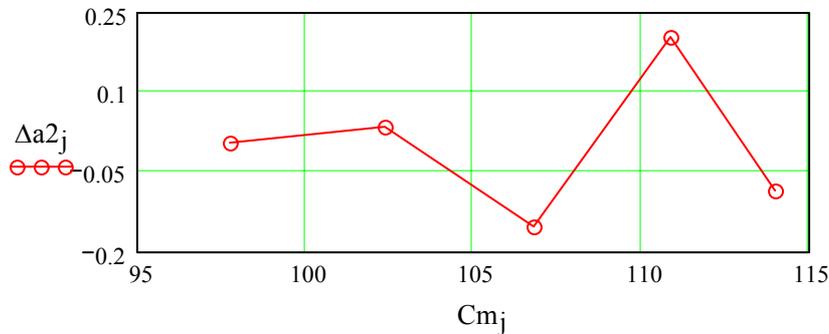
$$A_{l1} := (Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot (Z^T \cdot a) \quad A_{l1}^T = (-42.238 \quad -3.231 \quad 0.039)$$

и получаем аналитическое описание градуировочной характеристики в виде:

$$a_2(Ce) := A_{10} + A_{11} \cdot Ce + A_{12} \cdot Ce^2$$

Изобразим графически зависимость абсолютной погрешности аппроксимации от Cm :

$$\Delta a_{2j} := a_j - a_2(Cm_j)$$



Полученный график дает основание считать погрешность аппроксимации Δa_2 случайной погрешностью, порожденной случайными ошибками градуировки. Среднее и среднеквадратическое значения этой погрешности равны:

$$\text{mean}(\Delta a_2) = -2.079 \times 10^{-9} \quad \text{stdev}(\Delta a_2) = 0.121 \quad \% \text{ о.в.}$$

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:

$$t_{pd} := \text{qt}(p, d) \quad t_{pd} = 1.86$$

Таким образом для полосы неопределенности градуировочной характеристики $a_2(Ce)$, порожденной случайными погрешностями градуировки, получим оценку:

$$\Delta a_2 := \text{stdev}(\Delta a_2) \cdot t_{pd} \quad \Delta a_2 = 0.225 \quad \% \text{ о.в.}$$

Рассмотрим также случай, когда коррекция погрешности линейности

осуществляться не может. Тогда результаты измерения влажности с помощью аттестованного таким образом датчика будут отягощены погрешностью аппроксимации Δa_1 , которую следует рассматривать как случайную погрешность. Полосу неопределенности датчика влажности в этом случае можно представить указанием стандартных неопределенностей s коэффициентов A_0 и A_1 , вычисляемых по формулам [Л.6]:

$$sA_0 := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-1} (a_j - a_1(Cm_j))^2 \cdot \sum_{j=0}^{M-1} (Cm_j - Ce_0)^2}{M \cdot (M - 2) \cdot \sum_{j=0}^{M-1} (Cm_j - \text{mean}(Cm))^2}} \quad sA_0 = 1.286 \quad \% \text{ о.в.}$$

$$sA_1 := \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{M-1} (a_j - a_1(Cm_j))^2}{(M-2) \cdot \sum_{j=0}^{M-1} (Cm_j - \text{mean}(Cm))^2}} \quad sA_1 = 0.105 \quad (\% \text{ o.в.})/n\Phi$$

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:

$$t_{pd} := qt(p, d) \quad t_{pd} = 1.86$$

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

$$u_0 := t_{pd} \cdot sA_0 \quad u_0 = 2.391 \quad \% \text{ o.в.}$$

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

$$u_s := t_{pd} \cdot sA_1 \quad u_s = 0.195 \quad (\% \text{ o.в.})/n\Phi$$

Приведенная погрешность нуля датчика влажности составит:

$$\gamma_0 := \frac{u_0}{100} \cdot 100 \quad \gamma_0 = 2.391 \quad \%$$

Относительная погрешность чувствительности датчика влажности будет:

$$\gamma_s := \frac{u_s}{A_1} \cdot 100 \quad \gamma_s = 3.928 \quad \%$$

5. ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.efo.ru/doc/Sensera>
2. М.А.Берлинер. Измерение влажности. М., Энергия, 1973
3. Е.А.Гершкович, С.Н.Гершкович. Насыщенные растворы солей в качестве образцовых мер в гигрометрии, Бюлл. СЭВ «Научные приборы», 12, 1978, с.24-30
4. В.Ф.Мандрохлебов и др. Применение солевых гигростатов для поверки и испытания гигрометров. Измерительная техника, 7, 1970
5. 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).
6. Д.А.Гурский. Вычисления в MathCAD. Минск. Новое знание. 2003. –814 с.
7. Цифровой мост для измерения LCR типа E7-8. Руководство по эксплуатации. М.: 1985
8. Цифровой мультиметр DT-830 В. Руководство по эксплуатации, М.: 2004
9. Измеритель температуры CENTER-300. Руководство по эксплуатации, М.: 2004