

РАСЧЕТ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КИСЛОТ И ЩЕЛОЧЕЙ

***Р.И. Воробей, О.К. Гусев, В.П. Киреенко,
А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, В.Б. Яржембицкий***

Особое внимание при подготовке специалистов в области метрологии должно уделяться вопросам разработки системы метрологического обеспечения производства и эксплуатации средств измерений.

Целью настоящей работы являлась разработка основ метрологического обеспечения производства и эксплуатации приборов ИКР, предназначенных для технологического контроля кислотных и щелочных сред в трубопроводах молокоперерабатывающих предприятий. Для решения этой задачи были проведены теоретические и экспериментальные исследования приборов ИКР, позволившие рассчитать их точностные характеристики.

Исследование метрологических характеристик прибора ИКР целесообразно производить на основании его структурной схемы. Измерительная часть прибора построена по линейной последовательной схеме и функционально делится на 3 блока:

- A1 — преобразователь (ПР);
- A2 — входной усилитель (ВУ);
- A3 — аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

В состав ПР входит вспомогательный блок А11 — блок термокомпенсации (ТК).

Очевидно, что характеристики блока А1 (ПР), стоящего первым в цепи преобразования измерительной информации, являются определяющими для формирования метрологических характеристик прибора в целом. В то же время теоретический расчет характеристик преобразователя, в том числе и функции преобразования входной величины, крайне затруднен и практически не может быть реализован с достаточной степенью точности и достоверности получаемого результата. Это связано с тем, что при таком расчете возникает необходимость учета большого количества влияющих величин, как внешнего, так и внутреннего порядка: температуры раствора, в котором проводятся измерения, характеристик температурного дрейфа электрических параметров элементов электронной схемы, нелинейных искажений сигнала, связанных с неидеальностью элементов схемы и т. д. Кроме того, в настоящее время отсутствует математический аппарат, описывающий в приемлемом приближении

динамическое поведение кондуктометрической ячейки при малых амплитудах напряжения возбуждения (50...150 мВ). Таким образом, наиболее целесообразным представляется исследование ПР как «черного ящика» экспериментальным методом с накоплением возможно большего объема фактических данных для их последующей обработки с применением методов математической статистики.

Была разработана соответствующая методика исследования точностных характеристик преобразователя, ключевым моментом которой явилась методика приготовления растворов щелочи (NaOH) и кислоты (HNO_3) с малой относительной погрешностью концентрации (не более 0,2...0,4 %). Исследования проводились на семи экземплярах прибора ИКР, диапазон концентраций растворов, в соответствии с диапазоном измерения прибора, составлял от 0 до 3,20 % массовой доли щелочи или кислоты. Определялся выходной ток преобразователя как функция концентрации измеряемого раствора. По результатам многократных измерений были получены семейства градуировочных кривых для водных растворов щелочи и кислоты. С учетом того, что настройка коэффициента усиления ВУ осуществляется по раствору с максимальной измеряемой концентрацией, т. е. ВУ фактически осуществляет нормирование сигнала на максимальное значение, градуировочные кривые также были нормированы на максимальное значение, условно принятое за 1,0.

Блок АЦП (А3) выполняет функцию линеаризации нормированного сигнала, с переводом его в цифровую форму, на основе некоторой усредненной градуировочной характеристики (индивидуальной для каждого типа раствора, но общей для всех приборов). Такое усреднение было выполнено для полученных в ходе исследования 14 кривых. Результирующие градуировочные кривые для растворов щелочи и кислоты были занесены в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) АЦП и в дальнейшем использовались как базовые (образцовые) характеристики. Вычтя из реальной (определенной в ходе исследований) градуировочной характеристики конкретного экземпляра прибора базовую характеристику, мы получим график зависимости систематической погрешности данного экземпляра преобразователя от концентрации измеряемого раствора. Из результатов проведенных исследований следует, что систематическая погрешность преобразователя существенно (приблизительно в 3 раза) превышает случайную погрешность, определяемую по разбросу результатов многократных измерений. Максимальные значения относительной систематической погрешности для разных экземпляров преобразователя составили от 0,6 до 2,8 % при измерении концентрации водных растворов щелочи и от 0,4 до 2,9 % при измерении концентрации кислоты, причем большие значения погрешности относятся к растворам с меньшей концентрацией.

Точностные характеристики функциональных блоков ВУ и АЦП могут быть определены расчетным путем. В схемотехническом плане измерительный тракт блоков А2 и А3 включает в себя 2 последовательно включенных операционных усилителя (ОУ) типа К140УД6Б и узел аналого-цифрового преобразователя. Поскольку все эти элементы являются независимыми (их погрешности взаимно не коррелированы), то суммарная погрешность Θ измерительного тракта будет представлять собой случайную величину (на множестве всех приборов ИКР) и определяться формулой:

$$\Theta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Theta_i^2} \quad (1)$$

где Θ_i — паспортные погрешности элементов электронной схемы.

Погрешность операционного усилителя (ОУ) Θ_1 включает в себя следующие составляющие:

- погрешность смещения нуля ОУ $\Theta_{11} = \pm 0,1 \%$.
- погрешность разности входных токов $\Theta_{12} = \pm 0,6 \%$.

Значимыми составляющими погрешности аналого-цифрового преобразователя I_2 являются следующие:

- ошибка квантования Θ_{21} . Эта ошибка равна половине значения младшего значащего разряда цифрового кода. Для используемого восьмиразрядного двоичного кода ошибка квантования составляет

$$\Theta_{21} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2^8 - 1} \cdot 100\% = 0,2\% \quad (2)$$

- погрешность смещения нуля компаратора $\Theta_{22} = \pm 0,06 \%$.
- погрешность смещения нуля $\Theta_{23} = I_{11}$ и погрешность разности входных токов $\Theta_{24} = I_{12}$ операционного усилителя
- погрешность, вызванная нелинейностью работы ЦАП, $\Theta_{25} = \pm 0,1 \%$

Погрешности пассивных элементов схемы не учитываются, поскольку они сводятся к пренебрежимо малой величине путем настройки схемы.

Таким образом, оценка основной относительной погрешности измерительного тракта блоков ВУ и АЦП составит, согласно (1),

$$\Theta_{\text{н.м.}} = \sqrt{2 \cdot (\Theta_{11}^2 + \Theta_{12}^2) + \Theta_{21}^2 + \Theta_{22}^2 + \Theta_{23}^2 + \Theta_{24}^2 + \Theta_{25}^2} = 1,078\% \approx 1,1\%.$$

Поскольку систематическая погрешность преобразователя является случайной величиной на множестве приборов ИКР, то суммарная относительная погрешность прибора также будет определяться формулой (1) и составит, для исследованных экземпляров прибора, от $\Theta_{\text{ИКР}} = 1,2 \%$ до $\Theta_{\text{ИКР}} = 3,12 \%$, что соответствует абсолютной погрешности измерения концентрации $\Delta C = 0,04 \dots 0,1 \%$.

Значительный разброс вычисленных значений погрешности прибора ИКР указывает на возможность улучшения его точностных характеристик как путем конструктивной доработки преобразователя, так и за счет оптимизации методики настройки прибора. Снижения модуля максимальной систематической погрешности можно добиться, изменив настройку прибора таким образом, чтобы максимальное положительное отклонение реальной характеристики прибора от базовой совпадало по абсолютной величине с максимальным отрицательным отклонением. В точке настройки (калибровки) прибора систематическая погрешность приводится к нулю. Графически это выражается в соответствующем смещении оси абсцисс на графике относительной систематической погрешности (рис. 1). При этом точка (0; 0) остается обязательной калибровочной точкой по соображениям удобства использования прибора в системах технологического контроля.

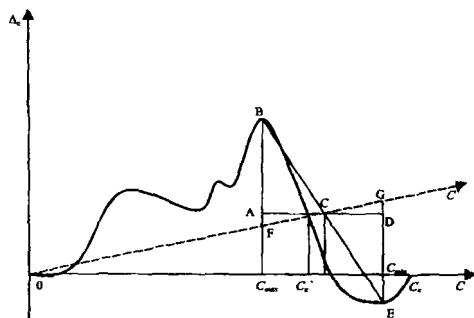


Рис. 1. Выбор калибровочной точки при настройке прибора.

Обозначим абсциссу точки максимума функции систематической погрешности (B) как C_{max} , а абсциссу точки минимума (E) — как C_{min} . Ординаты точек максимума и минимума обозначим, соответственно, как $\Delta_{c_{max}}$ и $\Delta_{c_{min}}$. Новая калибровочная точка C'_k выбирается таким образом, чтобы максимальное положительное отклонение графика систематической погрешности (BF) от новой оси абсцисс C' равнялось по абсолютной величине максимальному отрицательному отклонению (GE). Очевидно, что при выполнении этого условия, учитывая, что $BF \parallel GE$, будут выполняться равенства треугольников $\Delta BCF = \Delta ECG$ и $\Delta BCA = \Delta ECD$. Из этого равенства можно найти координаты точки C, через которую должна пройти новая ось абсцисс. Абсцисса точки C в первоначальной системе координат будет равна

$$x_c = C_{max} + AD/2 = (C_{max} + C_{min})/2, \quad (2)$$

а ордината, соответственно,

$$y_c = (\Delta_{c_{max}} + \Delta_{c_{min}})/2. \quad (3)$$

Теперь, проведя прямую через точки $(0; 0)$ и $(x_c; y_c)$, можно найти новую точку калибровки прибора ИКР, обеспечивающую минимизацию максимального значения систематической погрешности измерения, как абсциссу точки пересечения графика систематической погрешности с построенной прямой Ск». Поскольку индивидуальное определение калибровочной точки для каждого прибора в отдельности нецелесообразно из-за высокой трудоемкости, были рассчитаны средние концентрации калибровочных растворов, учитывающие также и оптимальность методики их приготовления. В результате было получено, что максимальная систематическая погрешность измерения концентрации щелочи достигает 2,86 % при настройке по верхнему пределу измерения, 2,17 % при оптимальной настройке и 2,63 % при настройке по среднему калибровочному раствору (относительное уменьшение погрешности на 24 % и 8 % соответственно). Для кислоты соответствующие цифры составляют 2,90 %, 2,44 % и 2,55% (относительное уменьшение погрешности на 26 % и 12 %). Таким образом, настройка по среднему калибровочному раствору обеспечивает вдвое меньшее снижение систематической погрешности по сравнению с тем, которое может быть достигнуто при оптимальной калибровке. Тем не менее, этот метод не связан с дополнительными трудозатратами и может обеспечить некоторое повышение точности прибора ИКР при той же трудоемкости настройки.

Сложный ход графика зависимости систематической погрешности преобразователя от концентрации измеряемого раствора указывает на необходимость использования при поверке нескольких поверочных растворов, т. е. необходим контроль погрешности прибора в точках $(x_1, x_2, \dots, x_L, \dots, x_m)$. Если исходить из того, что функция погрешности $\Delta_c(x)$ обладает свойством

$$\max_x |\Delta_c(x) - \max\{\Delta_c(x_L), \Delta_c(x_{L+1})\}| \leq \Delta_B; \quad x \in (x_L, x_{L+1}) \quad (4)$$

то, задаваясь значениями Δ_B , можно найти максимально допустимое расстояние между x_L и x_{L+1} . Поскольку Δ_B в данном случае представляет собой оценку сверху максимального превышения погрешности поверяемого прибора в пределах интервала (x_L, x_{L+1}) над максимальным значением его погрешности на границах интервала, то целесообразно ввести следующий критерий пригодности прибора:

$$\max_L |\Delta_c(x_L)| < \Delta_{cn} - \Delta_B \quad (5)$$

где Δ_{cn} — предел допускаемой погрешности.

Обратим внимание на то, что Δ_p фактически представляет собой амплитуду (полуразмах) колебаний с периодом $(x_{L+i} - x_L)$, накладывающихся на кривую, представленную более низкочастотными составляющими. В таком случае можно воспользоваться разложением функции систематической составляющей погрешности $\Delta_c(x)$ в ряд Фурье на интервале от 0 до x_m с тем, чтобы численно определить амплитуды дополнительных гармоник. При разложении функции в ряд Фурье она представляется в виде

$$\Delta_c(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \cos(i\omega_1 x - \varphi_i) \quad (6)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi}{x_m}$ — основная частота последовательности; A_i — амплитуда i -й гармоники; φ_i — начальная фаза i -й гармоники.

$$a_0 = \frac{2}{x_m} \int_0^{x_m} \Delta_c(x) dx \quad (7)$$

Таким образом, в составе функции погрешности выделяется не зависящая от концентрации постоянная составляющая и бесконечный набор гармонических колебаний (гармоник) с условными частотами $\omega_i = i\omega_1$ ($i = 1, 2, 3, \dots$).

Амплитуды гармоник рассчитываются по формуле

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (8)$$

где

$$a_i = \frac{2}{x_m} \int_0^{x_m} \Delta_c(x) \cdot \cos i\omega_1 x \cdot dx \quad (9)$$

$$b_i = \frac{2}{x_m} \int_0^{x_m} \Delta_c(x) \cdot \sin i\omega_1 x \cdot dx$$

Начальную фазу i -й гармоники вычисляют исходя из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{b_i}{a_i} \quad (10)$$

Для того, чтобы определить число проверяемых точек, необходимо вычислить амплитуды гармоник по формулам (8) и (9), начиная с первой гармоники. Тогда, найдя номер r высшей гармоники, для которой будет выполняться условие $A_r < \Delta_{cn} - \Delta_p$, можно будет задать необходимое число проверяемых точек

$$M^* = 2r. \quad (11)$$

Задавшись значением $\Delta_g = 0,1\Delta_{сн}$, получаем $M^* = 6$. При этом две точки из числа проверяемых являются крайними точками, соответствующими верхнему и нижнему пределам измерения. Поскольку графики функции систематической погрешности представляют собой частные случаи реализации случайного процесса, т. е. имеют произвольную форму, интервалы между проверяемыми точками следует устанавливать приблизительно равными. При выборе конкретных значений концентрации поверочных растворов следует учитывать как требование равномерности их распределения по диапазону измерения, так и особенности методики приготовления поверочных растворов. Необходимо выбирать такие значения концентрации, для получения которых требуется минимальная номенклатура лабораторной химической посуды. Это позволит не только снизить трудоемкость приготовления поверочных растворов, но и повысить точность значений их концентрации.

Результаты проведенных расчетов использованы при разработке нормативно-технической и эксплуатационной документации на приборы технологического контроля ИКР, методики поверки данных приборов, а также использованы в учебном процессе при подготовке курса лекций по дисциплине «Основы проектирования средств измерений и информационно-измерительных систем».

УДК

КОМБИНИРОВАННЫЕ АГРЕГАТЫ В СИСТЕМЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ ПОДГОТОВКИ ПОЧВЫ

*Э. Камински, Я. Р. Камински, Ю. В. Чигарев, И. С. Крук,
Д. Г. Zubович,*

Для получения стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур необходимым условием является качественное и своевременное проведение комплекса предпосевных почвообрабатывающих технологических операций, позволяющего подготовить хорошо проницаемую для влаги, кислорода и тепла почву — создать благоприятные условия для прорастания и развития растений.

Механические обработки почвы являются важнейшим технологическим процессом в земледелии и проводятся для создания рыхлого верхнего слоя и разуплотнения нижнего подпахотного горизонта, а также уничтожения сорной растительности.

В системе подготовки почвы возможны варианты раздельного проведения семи и более взаимосвязанных технологических операций. Многократ-