

# МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕДУРОЙ ПРИБЛИЖЕНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА ИЗМЕНЕНИЕМ ЗАЗОРА ОТСЧЕТНОГО ЭЛЕКТРОДА ЦИФРОВОГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Пантелеев К.В., Воробей Р.И., Тявловский К.Л., Тявловский А.К.,  
Самарина А.В., Свистун А.И., Гусев О.К., Жарин А.Л.  
*Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, г. Минск, Беларусь, 220013, nilpt@tut.by*

Реализуемый в цифровом зонде Кельвина [1] косвенный метод измерения контактной разности потенциалов (КРП) основан на поочередном определении амплитуд переменного выходного сигнала  $A_1$  и  $A_2$  по двум и более фиксированным значениям потенциала компенсации  $B_1$  и  $B_2$  и последующем вычислении значения КРП путем аппроксимации компенсационной зависимости измерительного сигнала [2]. Автоподстройку и автоподвод зонда к измеряемой поверхности позволяет осуществлять расчет значения углового коэффициента компенсационной зависимости, по которому формируется управляющий сигнал в следящей системе, изменяющий и выполняющий корректировку межэлектродного зазора.

Для пояснения метода рассмотрим особенности формирования сигнала измерительного динамического конденсатора при изменении зазора. Выходной переменной ток  $i(t)$  в цепи описывается выражением [1]

$$i(t) = U_{\text{КРП}} \frac{\partial C_{12}}{d(t)} = U_{\text{КРП}} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \omega S \sin(\omega t)}{(d_o + d_m \cos(\omega t))^2}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{КРП}}$  – КРП между поверхностями зондового и измеряемого образца;  $C_{12}$  – емкость динамического конденсатора;  $\omega$  – циклическая частота вибрации;  $S$  – площадь торцевой поверхности зонда;  $d_o + d_m \cos(\omega t) = d$  – среднее модулируемое расстояние между зондом и измеряемой поверхностью.

В соответствии с выражением (1) при изменении расстояния в системе зонд-образец  $\Delta d = d_1 - d_2$  амплитуды переменного измерительного сигнала  $A_1(B_1)$  и  $A_2(B_2)$  также изменяются (рисунок 1, а). В этом случае изменение зазора будет в обратно-пропорциональной зависимости от разности тангенсов угла наклона  $\alpha$  компенсационной зависимости:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2 = \varepsilon \omega S d_m \left( \frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right). \quad (2)$$

Таким образом угловой коэффициент  $k$  может быть определен по параметрам выходного сигнала в едином цикле с измерением КРП. Его расчет выполняется с помощью средств цифровой обработки сигнала управляющего микроконтроллера в соответствии с выражением:

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{A_1 - A_2}{B_1 - B_2}. \quad (3)$$

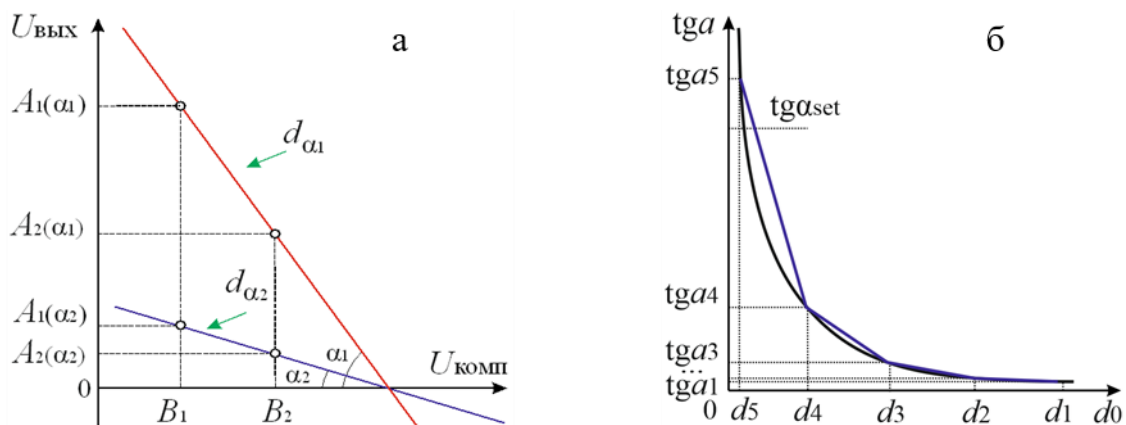


Рисунок 1 – Принцип метода слежения за изменением зазора отсчетного электрода по параметрам компенсационной зависимости (а) зонда Кельвина и преобразования углового коэффициента в расстояние (б)

Расчетное значение углового коэффициента может быть достаточным для формирования управляющего сигнала в следящей системе. Однако при реализации процедуры автоматического подвода зонда существует проблема, связанная с определением значения расстояния при котором происходит касание зондом образца. В случае прецизионных поверхностей касание не допустимо. Это может привести к нарушению состояния измеряемой поверхности или необратимым повреждениям самого зонда.

Указанная проблема решается при изначальной калибровке системы. В процессе инициализации отсчетный электрод находится на каком-то расстоянии  $d$  от измеряемой поверхности. При получении команды на подвод, микроконтроллер вырабатывает команды перемещения зонда на небольшие, равные по величине, шаги. После каждого шага определяется угловой коэффициент компенсационной зависимости, запоминается в памяти и сравнивается с предустановленным значением  $\text{tg } \alpha_{\text{set}}$ . При превышении углового коэффициента предустановленного значения, процесс подвода зонда останавливается, а в памяти микропроцессора формируется таблица из требуемого числа значений. Данная таблица, также может служить основой для кусочно-линейного преобразования получаемых значений углового коэффициента в расстояние (рисунок 1, б).

### Список литературы

1. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
2. Способ измерения контактной разности потенциалов: патент ЕА 026858 / О. К. Гусев, Р. И. Воробей, А. Л. Жарин [и др.]. – Оpubл. 31.05.2017.