

УДК 621.81  
 УЧЕТ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ СИГНАЛА ЗОНДА  
 КЕЛЬВИНА ПРИ КОНТРОЛЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

О. К. ГУСЕВ, А. Л. ЖАРИН, А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ  
 Учреждение образования  
 «БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 Минск, Беларусь

Целью исследования являлась разработка методики измерения контактной разности потенциалов (к.р.п.) прецизионных поверхностей, учитывающей зависимость сигнала измерительного преобразователя от зазора между чувствительным элементом преобразователя и поверхностью образца и позволяющей автоматически компенсировать связанную с этим методическую погрешность измерения к.р.п.

В качестве базового был использован компенсационный метод измерения к.р.п. на основе вибрирующего конденсатора (метод Зисмана-Кельвина) [1]. Для получения информации о зазоре между чувствительным элементом преобразователя и поверхностью образца было предложено ввести дополнительное воздействие, а именно, модуляцию постоянного напряжения компенсации переменным напряжением с частотой, существенно отличной от частоты вибрации чувствительного элемента зонда Кельвина (вибрирующего конденсатора).

Сила тока  $i(t)$  между обкладками вибрирующего конденсатора определяется выражением [2]

$$i(t) = (U_{CPD} + U_0)\varepsilon S \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{d_0 + \Delta d \cos \omega t} \right) = (U_{CPD} + U_0) \frac{\varepsilon \omega S \Delta d \sin \omega t}{(d_0 + \Delta d \cos \omega t)^2}, \quad (1)$$

где  $U_{CPD}$  – контактная разность потенциалов;  $U_0$  – внешняя разность потенциалов, приложенная между обкладками (напряжение компенсации);  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками;  $S$  – площадь поверхности вибрирующей обкладки;  $d_0$  – зазор между зондом Кельвина и поверхностью образца;  $\Delta d$  – амплитуда вибрации подвижной обкладки;  $\omega$  – частота вибрации.

В случае  $d_0 \gg \Delta d$  выражение (1) может быть упрощено до вида

$$i(t) = (U_{CPD} + U_0) \frac{\varepsilon \omega S \Delta d \sin \omega t}{d_0^2}. \quad (2)$$

Пусть на постоянное напряжение компенсации  $U_0$  дополнительно накладывается переменное напряжение с амплитудой  $U_m$  и частотой  $\omega_m$ :

$$U(t) = U_0 + U_m \sin \omega_m t. \quad (3)$$

Выражение (1) при этом преобразуется к виду

$$i(t) = (U_{CPD} + U_0) \frac{\varepsilon \omega S \Delta d \sin \omega t}{(d_0 + \Delta d \cos \omega t)^2} + U_m \varepsilon S \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\sin \omega_m t}{d_0 + \Delta d \cos \omega t} \right). \quad (4)$$

Первое слагаемое в выражении (4) совпадает с выражением (2) и зависит от контактной разности потенциалов  $U_{CPD}$  и зазора  $d_0$ . Второе слагае-

мое определяется расстоянием  $d$  между обкладками вибрирующего конденсатора и не зависит от к.р.п. Продифференцировав это слагаемое, получаем

$$i(t) = (U_{CPD} + U_0) \frac{\varepsilon \omega S \Delta d \sin \omega t}{(d_0 + \Delta d \cos \omega t)^2} + \frac{U_m \omega_m \varepsilon S \cos \omega_m t}{d_0 + \Delta d \cos \omega t} + \frac{\varepsilon S U_m \omega \Delta d \sin \omega_m t \sin \omega t}{(d_0 + \Delta d \cos \omega t)^2}. \quad (5)$$

При демодуляции сигнала, описываемого выражением (5), с помощью двух фазовых детекторов, один из которых работает на частоте  $\omega$ , а другой – на частоте  $\omega_m$ , в предположении  $d_0 \gg \Delta d$ , амплитуды демодулированных сигналов будут равны, соответственно,

$$I_\omega = (U_{CPD} + U_0) \varepsilon \omega S \frac{\Delta d}{d_0^2} \quad (6)$$

и

$$I_{\omega_m} = U_m \varepsilon \omega_m S \frac{1}{d_0}. \quad (7)$$

Выражение (6) не содержит величин  $U_m$  и  $\omega_m$ . Таким образом, наложение переменного сигнала с частотой  $\omega_m$  не оказывает влияния на измерение к.р.п. В то же время сила тока согласно выражению (7) обратно пропорциональна расстоянию между обкладками динамического конденсатора  $d_0$  и, таким образом, данный сигнал может непосредственно использоваться в цепи обратной связи измерительной системы для поддержания этого расстояния постоянным. В частности, разработана конструкция установки, в которой для перемещения чувствительного элемента зонда Кельвина в вертикальном направлении с целью регулировки расстояния зонд-образец предлагается использовать высокочувствительный малоинерционный электромагнитный привод на основе соленоида с подвижным самарий-кобальтовым сердечником. За счет наличия интегрирующего звена в цепи обратной связи по расстоянию зонд-образец обеспечивается минимизация ошибки регулирования. Чтобы обеспечить возможность задания разных значений расстояния зонд-образец, в схеме установки предусмотрена возможность подачи в цепь питания электромагнитного привода постоянного сигнала смещения  $U_{y0}$ , который вычитается из напряжения в цепи обратной связи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробей, Р. И.** Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / Р. И. Воробей [и др.]. – Минск : БНТУ, 2009. – 586 с.
2. **Zharin, A. L.** Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A. L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. Ed. B. Bhushan, Springer-Verlag: Heidelberg. – 2010. – p. 687–720.