

УДК 621.317.321: 621.317.729.2

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ УМЕНЬШЕНИИ РАЗМЕРОВ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Тявловский А. К., Жарин А. Л.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Представлены результаты моделирования измерительной цепи, содержащей динамический конденсатор, методом комплексно-гармонического анализа. Из-за малого значения нормированной частоты вибрации измерительный сигнал зонда Кельвина с чувствительным элементом малых размеров характеризуется значительными гармоническими искажениями, приводящими к резкому увеличению погрешности измерений. Уменьшение погрешностей может быть обеспечено за счет регистрации сигнала на его второй гармонике и контроля величины зазора зонд-образец на основе измерений отношения амплитуд первой и второй гармоники сигнала. (E-mail: nil_pt@bntu.by)

Ключевые слова: зонд Кельвина, динамический конденсатор, комплексно-гармонический анализ, гармонические искажения.

Введение

Динамический конденсатор, составляющий основу бесконтактных измерительных преобразователей электрического потенциала [1], в общем случае представляет собой систему из двух проводящих обкладок, одну из которых составляет чувствительный элемент электрометрического зонда, а вторую – поверхность исследуемого образца. При измерениях по методу Кельвина–Зисмана, называемому также методом зонда Кельвина, зазор между обкладками изменяется по некоторому (как правило, гармоническому) закону, что приводит к модуляции емкости динамического конденсатора. Учитывая, что емкость изменяется пропорционально обратной величине зазора, динамический конденсатор является нелинейной системой, что затрудняет его расчет, который не может быть выполнен на основе традиционного математического аппарата. В связи с этим определение характеристик измерительного преобразователя на основе динамического конденсатора обычно проводится на основе экспериментальных исследований. Альтернативным способом теоретического исследования и моделирования характеристик цепи, содержащей динамический конденсатор, является использование подхода на основе комплексно-гармонического анализа [2]. С использованием данного подхода были определены передаточ-

ная, амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики такой цепи [3].

При измерениях потенциала локальных участков поверхности образца методом сканирующего зонда Кельвина площадь подвижной обкладки динамического конденсатора не должна превышать 1 мм^2 , что связано с обеспечением высокой разрешающей способности [4]. Электрическая емкость такого конденсатора может составлять единицы фемтофарад, что определяет малую величину выходного сигнала и сложность согласования первичного измерительного преобразователя с предварительным усилителем сигнала. Сигнал выходного преобразователя, содержащего динамический конденсатор малой емкости, будет иметь сложный гармонический состав, т.е. характеризоваться значительными гармоническими искажениями, приводящими к погрешностям измерений. Данные погрешности ограничивают возможности повышения пространственной разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина, поскольку их величина возрастает с уменьшением площади подвижной обкладки динамического конденсатора. Экспериментальные исследования гармонических искажений сигнала динамического конденсатора и их зависимости от параметров и режимов измерительного преобразователя затруднены из-за высокой трудоемкости и сложности варьирования конструктивных параметров измерительного пре-

образователя в процессе исследований. В соответствии с этим, целью настоящего исследования является теоретическое обоснование возможностей повышения разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина на основе моделирования и анализа гармонического состава измерительного сигнала динамического конденсатора малой емкости. Задачи исследования включают определение зависимости гармонических искажений измерительного сигнала сканирующего зонда Кельвина от его конструктивных параметров и режимов модуляции, поиск и обоснование путей уменьшения погрешностей измерения электрического потенциала, определяемых данной зависимостью.

Методика исследований

В случае если материалы обкладок динамического конденсатора, формируемых сканирующим зондом Кельвина и поверхностью исследуемого образца, характеризуются разными значениями работы выхода электрона (РВЭ) ϕ_1 и ϕ_2 , и созданы условия для обмена носителями заряда между ними (например, за счет ионизации зазора между ними или за счет внешней электрической цепи), между обкладками установится контактная разность потенциалов (КРП), определяемая из выражения [5]:

$$U_c = \frac{\phi_2 - \phi_1}{e}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона.

В общем случае (без учета влияния паразитных емкостей) эта величина не зависит от расстояния между зондом и образцом. Таким образом, модуляция емкости динамического конденсатора при сохранении постоянной разности потенциалов между его обкладками должна привести к соответствующему изменению заряда обкладок. В методе Кельвина значение КРП определяется из выражения

$$dQ = (U_c + U)dC, \quad (2)$$

где dQ – изменение заряда обкладок; U – внешнее напряжение, приложенное между зондом и образцом; dC – изменение электрической емкости динамического конденсатора.

При использовании нулевого компенсационного метода измерений, изменение заряда обкладок dQ поддерживается равным нулю за счет поддержания равенства $U = -U_c$. Таким

образом, для измерения величины контактной разности потенциалов достаточно измерить значение напряжения компенсации.

В модификации Зисмана одна из обкладок динамического конденсатора делается вибрирующей, а вместо контроля изменения заряда на обкладках dQ регистрируется сила тока во внешней электрической цепи, соединяющей обкладки. Последняя определяется выражением:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = (U_c + U) \frac{dC(t)}{dt}. \quad (3)$$

Чаще всего используется гармонический (синусоидальный) закон модуляции, при котором расстояние между обкладками $d(t)$ описывается выражением:

$$d(t) = d_0 + d_m \cos \omega t, \quad (4)$$

где d_0 – среднее расстояние между обкладками динамического конденсатора; d_m – амплитуда вибрации; ω – угловая частота вибрации.

Временная зависимость электрической емкости динамического конденсатора при этом описывается выражением:

$$C(t) = \frac{\epsilon S}{d(t)} = \frac{\epsilon S}{d_0 + d_m \cos \omega t}, \quad (5)$$

где S – площадь обкладки динамического конденсатора; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Подставляя (5) в (3), получаем:

$$\begin{aligned} i(t) &= (U_c + U) \epsilon S \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{d_0 + d_m \cos \omega t} \right) = \\ &= (U_c + U) \frac{\epsilon \omega S d_m \sin \omega t}{(d_0 + d_m \cos \omega t)^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

В случае $d_0 \gg d_m$ выражение (6) может быть упрощено до вида:

$$i(t) = (U_c + U) \frac{\epsilon \omega S d_m \sin \omega t}{d_0^2}, \quad (7)$$

откуда амплитуда силы тока во внешней цепи:

$$I_m = (U_c + U) \frac{\epsilon \omega S d_m}{d_0^2}. \quad (8)$$

При компенсационном методе измерения сила тока во внешней цепи $i(t)$ приводится к нулю и, следовательно:

$$U_c = -U. \quad (9)$$

Напряжение компенсации U в этом случае является выходным сигналом измерительного преобразователя. В реальных условиях измерения амплитуда силы тока в цепи динамического конденсатора измеряется с некоторой погрешностью ΔI , определяемой порогом чувствительности цепи обратной связи по току, то есть компенсация не является полной, и равенство (9) не соблюдается. Согласно (8), связанная с этим ошибка компенсации напряжения, фактически составляющая методическую погрешность измерения КРП ΔU_c , может быть оценена величиной:

$$\Delta U_c = U_c - (-U) = \frac{d_0^2}{\varepsilon \omega S d_m} \Delta I. \quad (10)$$

Выражение (10) дает оценку погрешности измерения КРП для случая предельно малого (стремящегося к нулю) коэффициента модуляции динамического конденсатора, при котором последний может рассматриваться как линейная система. На практике условие $d_0 \gg d_m$ часто не соблюдается. Наличие ненулевого тока в цепи, содержащей динамический конденсатор, приводит к тому, что выходное напряжение измерительного преобразователя U будет являться функцией от времени $U(t)$. При этом выражение (6), описывающее ток в цепи динамического конденсатора, содержит существенную нелинейность и не является чисто гармонической функцией, что затрудняет нахождение величины $U(t)$ традиционными способами. Подробно данный случай был рассмотрен в предыдущих работах [2, 3]. С использованием метода комплексно-гармонического анализа было получено выражение для коэффициента преобразования $A = \frac{U(t)}{U_c}$ разности потенциалов между обкладками U_c в выходное переменное напряжение $U(t)$, имеющее вид:

$$A = \frac{U(t)}{U_c} = \frac{Q_1 \omega R_H}{U_c} \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{2Q_2 \omega R_H}{U_c} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + \frac{nQ_n \omega R_H}{U_c} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (11)$$

где R_H – активное нагрузочное сопротивление; Q_k и φ_k , $k = 1 \dots n$ – амплитуда и фаза i -й гармоники при разложении временной зависимости

заряда на пластинах $Q(t)$ в ряд по методу комплексно-гармонического анализа [2].

Количественно оценить нелинейные свойства выражения (11) можно с помощью коэффициента гармонических искажений:

$$\eta = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} A_k^2}{\sum_{k=1}^{\infty} A_k^2}, \quad (12)$$

где A_k – амплитуда k -й гармоники.

Модель (11) позволяет рассчитать амплитуды гармоник для различных значений нормированной частоты $\omega C_0 R_H$ и коэффициента модуляции динамического конденсатора $m = \frac{\Delta d}{d_0}$.

При изменении среднего расстояния между обкладками динамического конденсатора d_0 одновременно изменяются как его емкость C_0 , так и коэффициент модуляции m . В этом случае расчет комплексных амплитуд гармоник выходного сигнала должен проводиться на основе системы уравнений [2]

$$\begin{cases} Q_0^* = \frac{j2U_c}{\frac{d_0}{\varepsilon S} - \frac{d_m}{\varepsilon S} \frac{Q_1^* - \hat{Q}_1}{2Q_0^*}} \\ Q_k^* = \frac{d_m}{2\varepsilon S} \frac{Q_{k-1}^* + Q_{k+1}^*}{\frac{d_0}{\varepsilon S} + jk\omega R_H} \end{cases} \quad (13)$$

где Q_k^* – комплексная амплитуда k -й гармоники сигнала $Q(t)$; \hat{Q}_1 – число, комплексно сопряженное с Q_1 .

На рисунке 1 приведены результаты расчетов зависимости коэффициента гармонических искажений η от нормированной частоты $\omega C_0 R_H$ для нескольких фиксированных значений коэффициента модуляции m , выполненных в работе [2]. Полученные в работе [2] обобщенные графики содержат два четко выраженных участка: до значения нормированной частоты 10^{-2} коэффициент гармонических искажений является постоянным для всех значений коэффициента модуляции, а выше данного значения монотонно убывает с частотой.

Таким образом, в низкочастотной области гармонические искажения сравнительно высо-

ки, но их величина не зависит от частоты. В высокочастотной области наблюдается сильная зависимость коэффициента гармонических искажений от частоты, что может привести к погрешностям вследствие нестабильности частоты вибрации динамического конденсатора. Переходной участок сравнительно невелик и занимает область $0,1 < \omega C_0 R_H < 1$ при значении коэффициента модуляции $m \leq 0,5$.

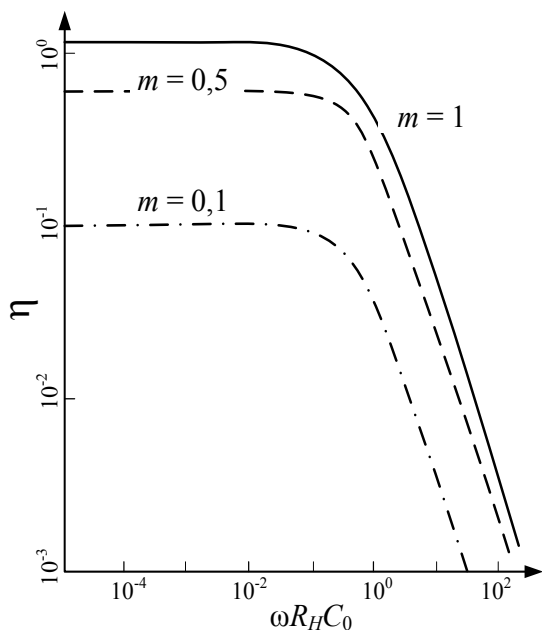


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента гармонических искажений преобразователя на основе динамического конденсатора от нормированной частоты $\omega R_H C_0$ для различных значений коэффициента модуляции m [2].

Из графиков рисунка 1 видно, что коэффициент гармонических искажений растет с увеличением коэффициента модуляции m . Следовательно, погрешность преобразования будет зависеть от стабильности коэффициента модуляции. Как показано в работе [2], с ростом нормированной частоты $\omega C_0 R_H$ влияние коэффициента модуляции на коэффициент гармонических искажений снижается, что приводит к соответствующему снижению погрешности измерения. В то же время в низкочастотной области имеет место сильная зависимость коэффициента гармонических искажений сигнала от коэффициента модуляции, что приводит к значительным погрешностям измерений из-за нестабильности зазора зонд-образец d_0 .

Результаты исследований

Для численного моделирования было принято значение амплитуды колебаний подвижной обкладки динамического конденсатора $d_m = 0,5$ мм и площадь обкладки $S = 1$ мм². Сопротивление нагрузки R_H в процессе моделирования варьировалось в диапазоне от 10^7 Ом до 10^{12} Ом, среднее расстояние между обкладками динамического конденсатора d_0 – от 0,5 мм до 2,4 мм. Данные значения соответствуют параметрам сканирующего зонда Кельвина с разрешающей способностью порядка 1 мм.

Частота колебаний подвижной обкладки сканирующего зонда Кельвина обычно находится в диапазоне от 100 до 600 Гц. Подстановка оговоренных конструктивных параметров динамического конденсатора в выражение 5 показывает, что при данной частоте колебаний подвижной обкладки значения нормированной частоты $\omega C_0 R_H > 1$ для сканирующего зонда Кельвина практически недостижимы. Использование переходного участка частотной характеристики $0,1 < \omega C_0 R_H < 1$ нежелательно из-за сильной частотной нестабильности коэффициента гармонических искажений выходного сигнала. Следовательно, для сканирующего зонда Кельвина следует выбирать низкое значение нормированной частоты колебаний $\omega C_0 R_H < 0,1$.

Как показано выше, для указанного частотного диапазона характерны высокие значения коэффициента гармонических искажений сигнала $\eta = 0,1 \dots 1$ и нестабильность коэффициента гармонических искажений η при изменении коэффициента модуляции m . Учитывая, что основная доля мощности измерительного сигнала динамического конденсатора приходится на первые две гармоники [2, 3], рассмотрим соотношение между первой и второй гармониками сигнала в области низких значений нормированной частоты. Расчет на основе модели (11)–(13) при подстановке в нее значения нормированной частоты $\omega C_0 R_H = 10^{-3}$ показал, что с увеличением коэффициента модуляции наблюдается опережающий рост амплитуды второй гармоники A_2 . Для значений коэффициента модуляции выше $m = 0,8$ отношение $\frac{A_2}{A_1}$ превышает единицу, и таким образом большая часть мощности сигнала оказывается сосредоточена в области второй, а не

первой, гармоники. Результаты данного моделирования приведены на рисунке 2.

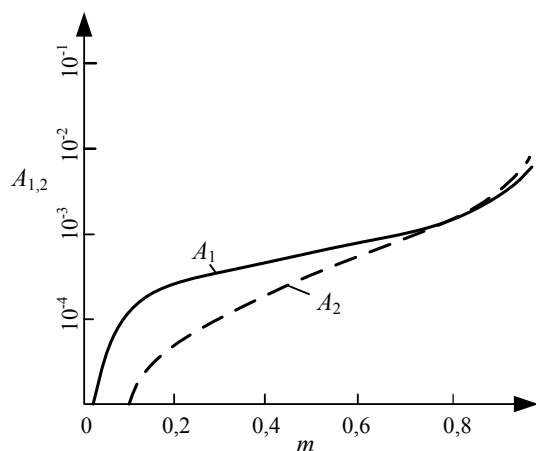


Рисунок 2 – Зависимости нормированных амплитуд первой и второй гармоник сигнала от коэффициента модуляции m в низкочастотной области $\omega R_H C_0 = 10^{-3}$.

Аналогичные расчеты, выполненные для фаз первой и второй гармоник, показали, что последние практически не зависят от коэффициента модуляции. Таким образом, при использовании фазового детектирования изменение коэффициента модуляции не приведет к потере стабильности измерителя, однако погрешность измерения КРП ΔU_c , определяемая нестабильностью амплитуды измерительного сигнала при изменении коэффициента модуляции m , будет значительной. Проанализировав выражения (11) и (13) можно видеть, что гармонический состав измерительного сигнала сканирующего зонда Кельвина на основе динамического конденсатора существенно зависит от сопротивления нагрузки R_H . Подстановка в математическую модель значений R_H в диапазоне от 10^7 Ом до 10^{12} Ом и сопоставление полученных результатов с данными предыдущих исследований [2] показали следующее:

– При больших значениях нагрузочного сопротивления ($R_H > 10^9$ Ом) амплитуда первой гармоники сигнала изменяется с ростом зазора d_0 в сравнительно небольшой степени (рисунок 3а). Уменьшение величины нагрузочного сопротивления до 10^7 Ом, напротив, приводит к формированию резкой зависимости амплитуды A_1 от величины зазора: так, при увеличении d_0 от 0,5 до 2,4 мм амплитуда первой гармоники уменьшается более чем на три порядка (рисунок 3б). В еще большей степени эта зависимость проявляется для второй гармоники сигнала.

– Фазы как первой, так и второй гармоники сигнала нестабильны с изменением зазора только при промежуточных значениях сопротивления нагрузки ($R_H \approx 10^9$ Ом). При высоких и низких R_H фазы гармоник практически постоянны, однако при $R_H = 10^7$ Ом значения фаз практически одинаковы и равны плюс 90° для обеих гармоник, тогда как при $R_H = 10^{12}$ Ом фаза первой гармоники равна нулю, а вторая сдвинута относительно нее на минус 90° .

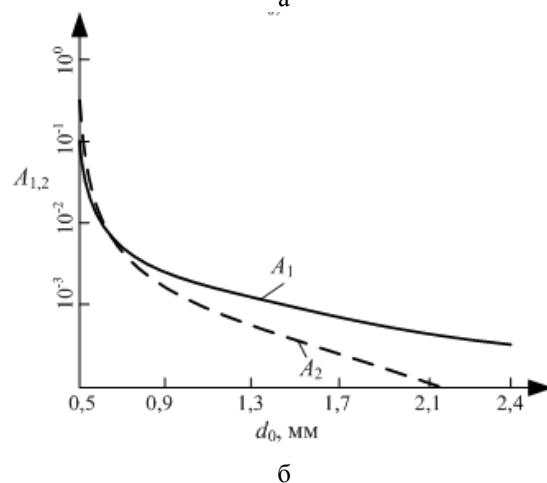
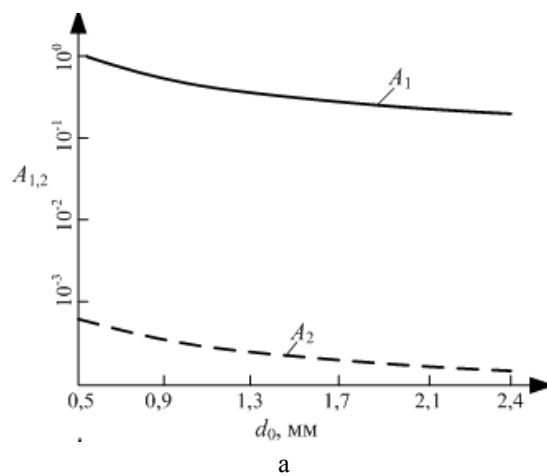


Рисунок 3 – Зависимости нормированных амплитуд первой и второй гармоник сигнала от зазора между обкладками динамического конденсатора d_0 для различных значений сопротивления нагрузки R_H : а – $R_H = 10^{12}$ Ом; б – $R_H = 10^7$ Ом

Таким образом, для сканирующего зонда Кельвина сопротивление нагрузки может выбираться либо из диапазона $R_H \leq 10^7$ Ом, либо из диапазона $R_H \geq 10^{12}$ Ом. Последнее значение является трудно реализуемым, при этом нормированная частота динамического конденсатора смещается в область промежуточных значений $0,1 < \omega C_0 R_H < 1$. Таким образом, с практической точки зрения увеличение сопротивле-

ния нагрузки неспособно обеспечить уменьшение погрешностей измерения и соответствующее повышение разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина. В то же время при низком сопротивлении нагрузки $R_H \leq 10^7$ Ом имеет место существенная зависимость амплитуды как первой, так и второй гармоники сигнала от величины зазора. Следовательно, уменьшение погрешности измерения и повышение разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина возможно только при условии автоматического контроля и поддержания постоянной величины зазора зонд-образец в реальном масштабе времени.

Проанализируем возможность такого контроля на основе анализа гармонического состава измерительного сигнала сканирующего зонда Кельвина, работающего в диапазоне малых значений нормированной частоты. Из рисунка 3б следует, что амплитуды первой и второй гармоник сигнала по-разному изменяют свои значения с изменением величины зазора зонд-образец. Абсолютные значения амплитуд гармоник зависят от измеряемой величины КРП и потому не могут быть непосредственно использованы для контроля зазора. В то же время из модели (11) следует, что отношение амплитуд первой и второй гармоники представляет собой безразмерную величину, не зависящую от КРП U_C . С использованием моделей (11)–(13) была получена зависимость отношения амплитуд гармоник A_2/A_1 от величины зазора зонд-образец d_0 в диапазоне значений от 0,5 мм до 2,5 мм, показанная в графическом виде на рисунке 4. Из рисунка видно, что данный параметр отличается высокой чувствительностью к величине зазора зонд-образец, что позволяет использовать его для контроля величины зазора в процессе измерений.

Как следует из результатов моделирования, оптимальным с точки зрения минимизации погрешностей измерения является значение коэффициента модуляции $0,5 < m < 0,8$ (что соответствует зазору зонд-образец от 0,625 мм до 1,0 мм при принятой в модели амплитуде вибрации подвижной обкладки 0,5 мм), для которого обеспечивается минимум зависимости амплитуд первой и второй гармоник сигнала от величины зазора d_0 и одновременно достаточно высокая чувствительность параметра A_2/A_1 к изменению зазора зонд-образец. Так, как следует из рисунка 3б, для обеспечения стабильности амплитуды выбранной гармоники сигнала (и, соответствен-

но, погрешности измерения КРП) на уровне $\pm 5\%$ необходимо поддерживать величину зазора зонд-образец d_0 с погрешностью порядка $\pm 0,05$ мм при установленном значении зазора $d_0 = 0,9$ мм. Как следует из рисунка 4, такая точность поддержания зазора требует измерения отношения амплитуд первой и второй гармоник A_2/A_1 с погрешностью не более $\pm 3\%$, что сравнительно легко достижимо на практике.

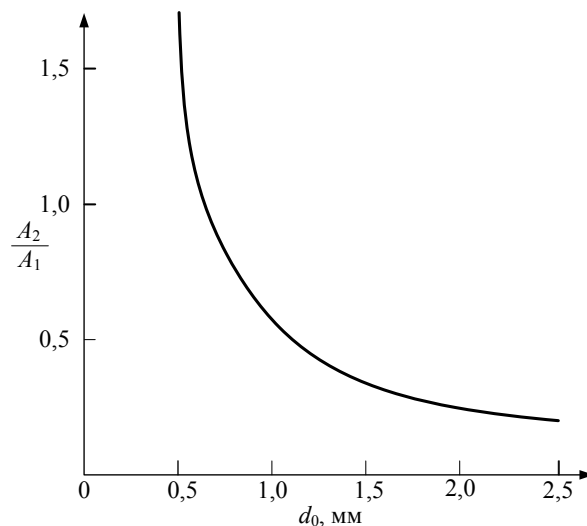


Рисунок 4 – Зависимость отношения амплитуд первой и второй гармоник сигнала от зазора зонд-образец d_0 .

Из рисунка 3б следует, что при описанных условиях амплитуду первой и второй гармоник измерительного сигнала оказываются близки по абсолютной величине. С учетом того, что на частоту вибрации подвижной обкладки, как правило, приходится максимум внешних электромагнитных наводок [6], наиболее целесообразной с точки зрения минимизации влияния данных наводок является регистрация измерительного сигнала сканирующего зонда Кельвина на частоте его второй гармоники. Отношение амплитуд первой и второй гармоники A_2/A_1 при этом может использоваться для контроля величины зазора зонд-образец в реальном масштабе времени.

Заключение

Уменьшение линейных размеров зонда Кельвина с целью повышения пространственной разрешающей способности влечет за собой уменьшение нормированной частоты вибрации $\omega C_0 R_H$ его подвижной обкладки. Следствием перехода измерительного сигнала в низко-

частотную область $\omega C_0 R_H < 0,1$ является резкое возрастание коэффициента гармонических искажений и рост погрешности измерений электрического потенциала. Для компенсации возникающей погрешности разработаны следующие меры:

1. Регистрация измерительного сигнала зонда Кельвина, работающего в диапазоне малых значений нормированной частоты $\omega C_0 R_H$, должна осуществляться на его второй гармонике, обладающей необходимой фазовой стабильностью и менее подверженной влиянию электромагнитных наводок. Амплитуда второй гармоники измерительного сигнала зонда Кельвина малых размеров близка к амплитуде его первой гармоники, а при определенных условиях, в частности, при выборе высоких значений коэффициента модуляции, превосходит ее.

2. Для уменьшения погрешности измерений, связанной с нестабильностью амплитуд гармоник измерительного сигнала при изменении расстояния между обкладками динамического конденсатора, величина зазора зонд-образец должна поддерживаться постоянной. Контроль величины зазора зонд-образец d_0 может осуществляться на основе измерений отношения амплитуд первой и второй гармоники измерительного сигнала A_2/A_1 , при этом погрешность измерения отношения амплитуд гармоник по порядку величины должна равняться требуемому значению относительной

погрешности измерения электрического потенциала.

Список использованных источников

1. Zharin, A. L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). – Springer : Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2010. – P. 687–720.
2. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А.Л. Жарин. – Минск : Бестпринт, 1996. – 240 с.
3. Тявловский, А.К. Моделирование метрологических характеристик емкостных первичных преобразователей средств зондовой электрометрии / А.К. Тявловский, О.К. Гусев, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 1(2) – С. 122–127.
4. Taylor, D. M. Measuring techniques for electrostatics / D. M. Taylor // Journal of Electrostatics. – 2001. – № 51–52. – P. 502–508.
5. Surplice, N.A. A critique of the Kelvin method of measuring work functions / N.A. Surplice, R.J. D'Arcy // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1970. – Vol. 3. – P. 477–482.
6. Baikie, I.D. Noise and the Kelvin method / I.D. Baikie, S. Mackenzie, P.J.Z. Estrup, J.A. Meyer // Rev. Sci. Instrum. – 1991. – № 62 (5). – P. 1326–1332.

Tyavlovsky A.K., Zharin A.L.

Compensation of measurement errors when reducing linear dimensions of the Kelvin probe

The study is based on results of modeling of measurement circuit containing vibrating-plate capacitor using a complex-harmonic analysis technique. Low value of normalized frequency of small-sized scanning Kelvin probe leads to high distortion factor of probe's measurement signal that in turn leads to high measurement errors. The way to lower measurement errors is to register measurement signal on its second harmonic and to control the probe-to-sample gap by monitoring the ratio between the second and the first harmonics' amplitudes. (E-mail: nil_pt@bntu.by)

Key words: Kelvin probe, vibrating-plate capacitor, complex-harmonic analysis, harmonic distortion.

Поступила в редакцию 06.11.2013.