

**АНАЛИЗ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА
ДИЭЛЕКТРИКОВ ПО СХЕМЕ ТОКОВОЙ КОМПЕНСАЦИИ**

Тявловский А.К., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Проведен сравнительный анализ динамических зондовых методов измерения поверхностного потенциала. Показано, что для бесконтактных измерений поверхностного потенциала диэлектриков в широком диапазоне значений оптимальным является использование схемы с токовой компенсацией. Преимуществами данной схемы являются высокое пространственное разрешение, широкий диапазон измерений поверхностного потенциала, независимость измерительного сигнала от расстояния между зондом и исследуемой поверхностью в пределах определенного диапазона расстояний. Проанализированы метрологические характеристики предлагаемой схемы и получена расчетная формула для определения предела приведенной методической погрешности измерения.

(E-mail: andrey_psf@tut.by)

Ключевые слова: поверхностный потенциал, зондовая электрометрия, диэлектрик, компенсационная схема.

Введение

Решаемая задача заключалась в создании методов и средств измерения пространственного распределения поверхностного потенциала диэлектриков и проводящих объектов с относительно толстым (более характерной длины экранирования потенциала) диэлектрическим покрытием. Подобная задача характерна для исследования свойств поверхностей диэлектрических материалов и покрытий (полимерных, керамических и др.). В частности, настоящий подход использовался для исследования распределения потенциала поверхности тефлона, обусловленного предысторией механической обработки, а также для исследования многослойной изоляции космических аппаратов в условиях воздействия заряженных частиц и др.

Требования, предъявляемые к средствам измерений пространственного распределения поверхностного потенциала диэлектриков, в известной степени противоречивы и включают:

– отсутствие механического контакта с поверхностью образца, способного нарушить ее зарядовое состояние;

– высокая чувствительность к поверхностному заряду и неоднородностям его распределения, возможность измерения крайне малых зарядов, создающих потенциалы порядка нескольких милливольт;

– возможность сканирования исследуемой поверхности для построения картины пространственного распределения поверхностного потенциала;

– малая постоянная времени измерительной системы, обеспечивающая высокую скорость сканирования и малое время измерения пространственного распределения поверхностного потенциала в целом с целью минимизации изменений последнего за счет растекания и естественных утечек за время измерений;

– возможность выполнения измерений при нормальном атмосферном давлении и в условиях вакуума.

Возможность сканирования исследуемой поверхности, кроме того, означает, что измерительный сигнал не должен (в определенных пределах) зависеть от расстояния между измерительным зондом и поверхностью образца, либо же должна быть обеспечена возможность автоматического поддержания этого расстояния постоянным с помощью дополнительной следящей системы, не оказывающей воздействие на зарядовое состояние образца.

В соответствии с этим, целью исследования являлся поиск и анализ схмотехнических решений, обеспечивающих выполнение основных из обозначенных требований: минимизации воздействия на образец, обеспечения максимальной чувствительности, максимального

быстродействия и минимальной зависимости сигнала от расстояния между зондом и образцом.

Методы регистрации поверхностного потенциала

Традиционные методы регистрации поверхностного потенциала диэлектриков можно разделить на несколько категорий [1]:

- методы, основанные на тепловом воздействии на образец;
- методы, использующие импульсное механическое воздействие;
- электроакустические методы;
- метод теплового градиента;
- фотоэлектрические методы;
- зондовые электрометрические методы;
- прочие методы (например, основанные на использовании эффектов Керра или Показеля).

Из указанных методов только зондовые электрометрические наиболее полно удовлетворяют перечисленным выше требованиям и пригодны для анализа распределения поверхностного потенциала диэлектриков путем пространственного сканирования.

В свою очередь, зондовые электрометрические методы подразделяются на статические и динамические, причем последние могут быть реализованы в варианте токового или потенциального зонда. Преимуществом статических методов (метода статического конденсатора) является высокое пространственное разрешение, достигающее 10 мкм [2]. В то же время данный метод характеризуется сильной зависимостью измерительного сигнала от расстояния между чувствительным элементом зонда и поверхностью образца, что практически исключает его применение при сканировании неидеально плоских поверхностей. Аналогичным недостатком характеризуется и динамический метод с токовым зондом.

В соответствии с вышесказанным, наиболее подходящим путем решения поставленной задачи является использование зонда с динамическим конденсатором [3].

Динамические зондовые методы измерения поверхностного потенциала

В основу динамических зондовых методов положено использование динамического кон-

денсатора, одну из обкладок которого формирует измерительный зонд, а вторую – поверхность исследуемого образца. Диэлектриком в этом случае является окружающая газовая среда или вакуум.

Рассмотрим взаимодействие поверхности диэлектрика с вибрирующим зондом (рисунок 1). Пусть потенциал зонда относительно «земли» равен U_1 , а соответствующий потенциал исследуемой поверхности U_2 . Тогда напряжение между обкладками составит $U = U_2 - U_1$. Предположим, что зонд заземлен, т.е. его потенциал равен нулю, и, соответственно, $U = U_2$. Тогда, измеряя разность потенциалов между обкладками U , заряд обкладок Q можно вычислить по формуле:

$$Q = \frac{U \epsilon_0 \epsilon S}{d}, \tag{1}$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; для воздуха $\epsilon \approx 1$; S – площадь меньшей из обкладок; d – расстояние между обкладками.

В случае динамического конденсатора расстояние между обкладками d изменяется по некоторому (как правило, периодическому) закону. В частности, при наложении на зонд механических колебаний частотой ω емкость динамического конденсатора C будет изменяться по закону [4]:

$$C(t) = \epsilon_0 \epsilon S \frac{1}{d_0 + d_1 \sin \omega t} = C_0 \frac{1}{1 + m \sin \omega t}, \tag{2}$$

где C_0 – статическая емкость динамического конденсатора; ω – круговая частота колебаний; d_0 – среднее расстояние между зондом и поверхностью; d_1 – амплитуда вибрации зонда; $m = \frac{d_1}{d_0}$ – коэффициент модуляции динамического конденсатора

Ток в цепи такого динамического конденсатора будет равен:

$$i(t) = U \frac{\partial C}{\partial t} = -U \epsilon_0 \epsilon S \frac{d_1 \omega \cos \omega t}{d_0 + d_1 \sin \omega t}^2. \tag{3}$$

Измеряя $i(t)$, из (3) можно найти потенциал поверхности диэлектрика в данной точке, а из (1) – ее заряд.

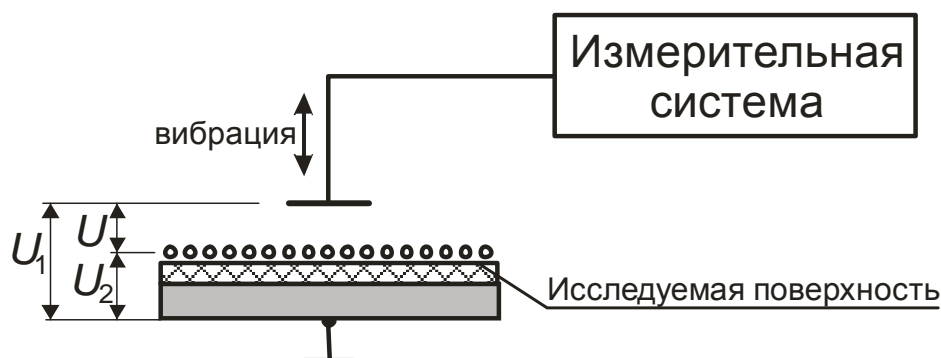


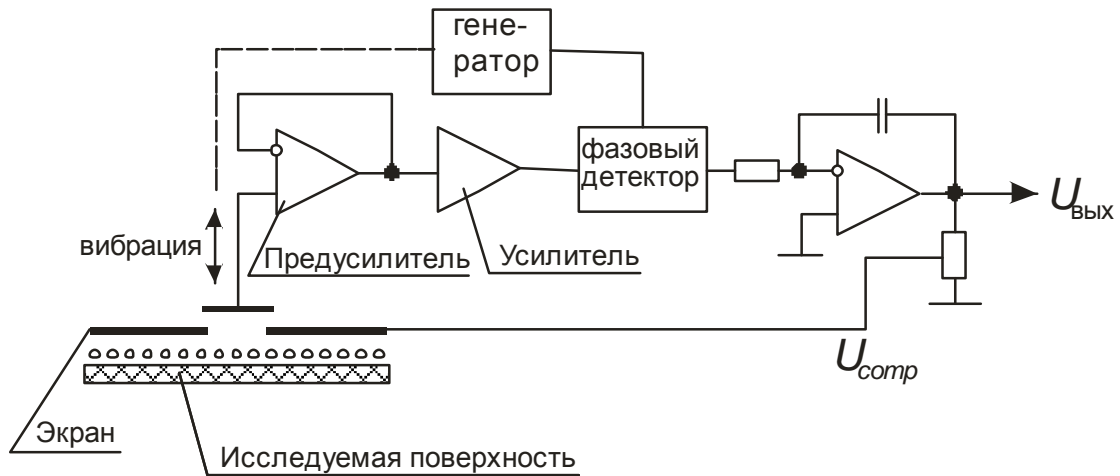
Рисунок 1 – Схема взаимодействия динамического электрометрического зонда с поверхностью диэлектрика

Структурные электрические схемы измерения поверхностного потенциала диэлектриков

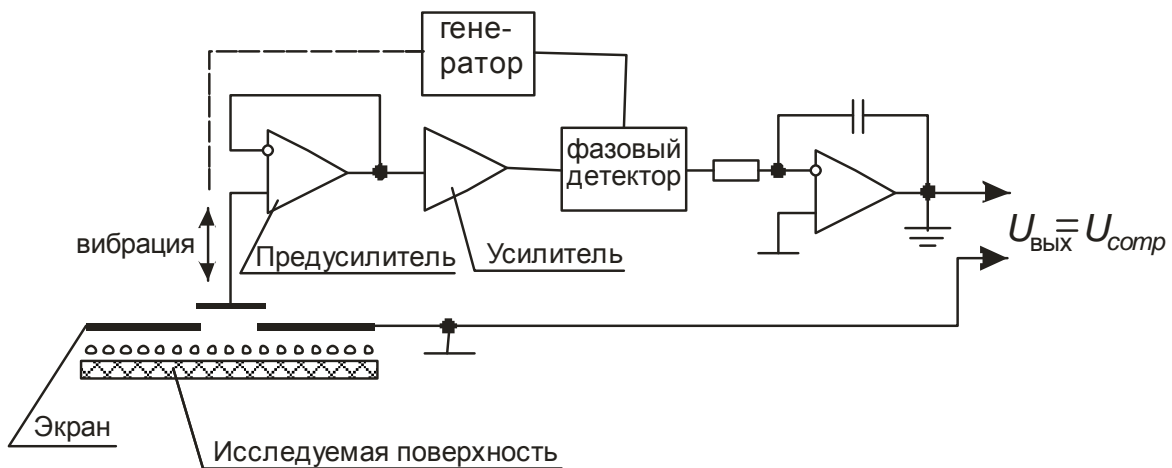
Для уменьшения воздействия измерительного преобразователя на заряженное состояние поверхности и повышения точности измерений ток перезаряда емкости стремятся свести к нулю, применяя компенсационный метод измерений. В этом случае, согласно (3), разность потенциалов между зондом и исследуемой поверхностью также будет равна нулю, что означает равенство напряжения компенсации U_{comp} и потенциала поверхности относительно «земли» U_2 . На практике такие измерения могут быть реализованы в двух вариантах. В первом из них напряжение компенсации подается на экран, ограждающий вибрирующий электрометрический зонд (рисунок 2а). При этом на зонд воздействует суперпозиция двух электрических полей противоположного знака (поля исследуемой поверхности и поля экрана). За счет использования интегрирующего звена в цепи обратной связи достигается полная компенсация поля образца полем экрана, и таким образом напряженность электрического поля экрана отслеживает напряженность электрического поля поверхности исследуемого образца,

но с противоположным знаком. Следовательно, прибор, построенный по этой схеме, фактически является измерителем напряженности электрического поля. При этом, однако, возникает опасность электрического разряда из-за того, что разность потенциалов между исследуемой поверхностью и экраном равна удвоенному значению потенциала поверхности относительно «земли».

Второй вариант, показанный на рисунке 2б, предусматривает подачу напряжения компенсации с выхода интегратора непосредственно на вибрирующий зонд. Равновесие системы достигается при равенстве потенциалов зонда и исследуемой поверхности. Таким образом, электрическое поле между зондом и поверхностью отсутствует, что сводит к нулю риск электрического пробоя. При этом, в отличие от измерителей напряженности электрического поля, выходной сигнал зонда в широких пределах не зависит от расстояния до поверхности образца (в той мере, в какой можно пренебречь краевыми эффектами). Однако в такой схеме напряжение на входе предусилителя численно равно поверхностному потенциалу, что ограничивает диапазон измерения сравнительно небольшими его значениями (в пределах 10–15 В).



а



б

Рисунок 2 – Варианты компенсационной схемы измерения поверхностного потенциала диэлектриков: а – измеритель напряженности электрического поля; б – измеритель поверхностного потенциала

В связи с этим для расширения диапазона измерений поверхностного потенциала предлагается отказаться от подачи на зонд или экран компенсирующего напряжения, а вместо этого ввести токовую компенсацию по переменному току, т.е. приводить к нулю суммарный ток непосредственно на входе предварительного

усилителя. Из (3) следует, что для такой компенсации должен использоваться переменный сигнал, что означает исключение из схемы преобразователя фазового детектора. Схема с использованием токовой компенсации, таким образом, приобретает вид, показанный на рисунке 3.

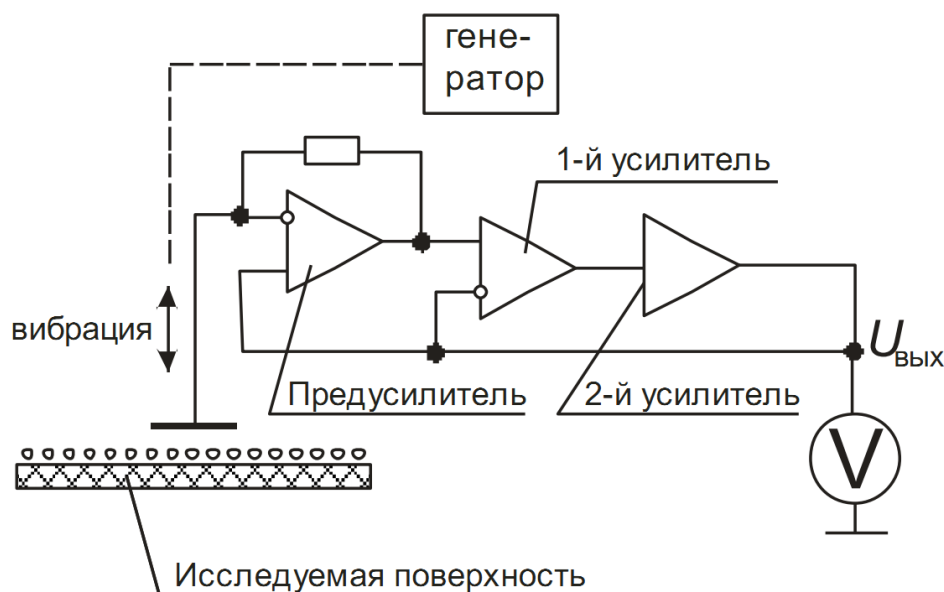


Рисунок 3 – Схема измерения поверхностного потенциала диэлектриков с токовой компенсацией

Анализ схемы измерения поверхностного потенциала диэлектриков с токовой компенсацией

Ток динамического электрометрического зонда определяется выражением (3). Компенсирующий ток $i'(t)$, определяемый работой цепи обратной связи, должен быть равен ему по мгновенной величине. Следовательно, можно записать:

$$i(t) = i'(t),$$

или

(4)

$$U \frac{\partial C}{\partial t} = C(t) \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial t},$$

где $C(t)$ определяется выражением (2).

Таким образом, изменение выходного напряжения отслеживает изменение тока электрометрического зонда, а его амплитуда пропорциональна потенциалу исследуемого участка поверхности. При этом как величина емкости динамического конденсатора C , так и величина ее производной $\frac{\partial C}{\partial t}$ в первом приближении обратно пропорциональны расстоянию d_0 между зондом и поверхностью, что делает из-

мерения малочувствительными к изменению этого расстояния.

Поскольку в данном варианте реализовано включение предусилителя по схеме зарядочувствительного усилителя, то путем подбора сопротивления в цепи обратной связи можно варьировать коэффициент преобразования, приводя значения выходного напряжения к требуемому диапазону [5].

Схема измерения поверхностного потенциала с токовой компенсацией обладает такими важными преимуществами, как высокое пространственное разрешение, определяемое малой площадью динамического электрометрического зонда, широкий диапазон измерений поверхностного потенциала, независимость измерительного сигнала от расстояния между зондом и исследуемой поверхностью (в пределах определенного диапазона расстояний), умеренные требования к элементной базе измерительной схемы.

Следует, однако, отметить, что независимость сигнала динамического конденсатора от расстояния между зондом и поверхностью в полной мере обеспечивается только для случая равномерно заряженной поверхности. В случае неоднородного распределения поверхностного потенциала, по мере увеличения расстояния между обкладками в большей степени будут

проявлять себя краевые эффекты, и соответственно больший вклад в формирование выходного сигнала зонда будут вносить соседние с исследуемым участки поверхности.

С учетом отмеченного, наиболее оптимальным методом для исследования пространственного распределения поверхностного потенциала диэлектриков в широком диапазоне значений является использование измерительной схемы с токовой компенсацией, которая и была выбрана для дальнейшей проработки.

Подставим в (4) выражение для емкости динамического конденсатора (2):

$$U \varepsilon_0 \varepsilon S \frac{d_1 \omega \cos \omega t}{d_0 + d_1 \sin \omega t} = \varepsilon_0 \varepsilon S \frac{1}{d_0 + d_1 \sin \omega t} \cdot \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial t}, \quad (5)$$

откуда:

$$\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial t} = U \frac{d_1 \omega \cos \omega t}{d_0 + d_1 \sin \omega t}. \quad (6)$$

В случае, если напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ изменяется по гармоническому закону с частотой ω_1 , т.е.:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХМ}} \sin \omega_1 t, \quad (7)$$

левая часть равенства (7) будет иметь вид:

$$\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial t} = U_{\text{ВЫХМ}} \omega_1 \cos \omega_1 t. \quad (8)$$

Очевидно, что частота напряжения компенсации должна совпадать с частотой вибрации электрометрического зонда, $\omega_1 = \omega$. Тогда:

$$U_{\text{ВЫХМ}} \omega \cos \omega t = U \frac{d_1 \omega \cos \omega t}{d_0 + d_1 \sin \omega t},$$

откуда:

$$\frac{U_{\text{ВЫХМ}}}{U} = \frac{d_1}{d_0 + d_1 \sin \omega t}. \quad (9)$$

При условии, что амплитуда колебаний вибрирующей пластины динамического конденсатора d_1 пренебрежимо мала в сравнении со средним расстоянием между зондом и поверхностью d_0 , выражение (9) упрощается до вида:

$$\frac{U_{\text{ВЫХМ}}}{U} = \frac{d_1}{d_0} = m. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при выбранной схеме измерения поверхностного потенциала диэлектриков с токовой компенсацией амплитуда выходного напряжения динамического электрометрического зонда прямо пропорциональна измеряемому поверхностному потенциалу. При этом принятое допущение $d_1 \ll d_0$ означает, что также будет выполняться и соотношение $U_{\text{ВЫХМ}} \ll U$. Это позволяет проводить исследования объектов с высокой электризуемостью, таких как политетрафторэтилен (фторопласт), композитные материалы, характеризующиеся экстремально высокими значениями поверхностного потенциала. Фактически, регулируя коэффициент модуляции m (что достигается, например, изменением зазора между зондом и поверхностью образца при неизменной амплитуде колебаний), можно менять чувствительность преобразователя поверхностного потенциала в широких пределах, причем закон изменения чувствительности будет линейным.

Оценим методическую погрешность измерения поверхностного потенциала предлагаемым преобразователем, определяемую особенностями его электрической схемы. Эквивалентная схема замещения первичного преобразователя измерителя поверхностного потенциала с токовой компенсацией имеет вид, показанный на рисунке 4.

Для анализа такой цепи наиболее целесообразно воспользоваться методом частных токов, основанным на принципе суперпозиции токов, создаваемых несколькими источниками ЭДС. Рассмотрим для начала цепь, в которой присутствует только источник переменного напряжения U_2 (рисунок 5). Для целей анализа заменим конденсаторы $C_1 - C_5$ и резистор R их импедансами $Z_1 - Z_5$ и Z_6 соответственно. Учет динамической природы конденсатора C_1 , емкость которого описывается нелинейным выражением (2), представляет достаточно сложную задачу, решаемую методом комплексно-гармонического анализа [6]. Тем не менее, при малых значениях коэффициента модуляции m значение C_1 в первом приближении можно считать постоянным, что существенно упрощает анализ. Для целей приближенной оценки погрешности измерения поверхностного потенциала такое допущение является приемлемым.

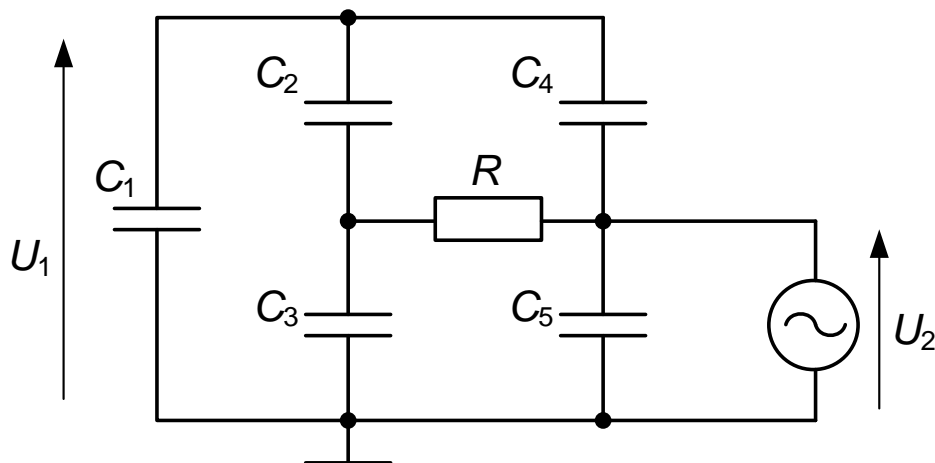


Рисунок 4 – Эквивалентная схема замещения измерителя поверхностного потенциала с токовой компенсацией: R – входное сопротивление зарядочувствительного предусилителя; U_1 – измеряемый поверхностный потенциал; $U_2 = U_{\text{вых}}$ – переменное напряжение компенсации, соответствующее выходному напряжению схемы; C_1 – электрическая емкость между исследуемой поверхностью и «землей»; C_2 – емкость между зондом и поверхностью образца (емкость динамического конденсатора); C_3 – паразитная емкость между зондом и «землей»; C_4 – паразитная емкость между входом предусилителя и поверхностью образца; C_5 – емкость между входом предусилителя и «землей»

В схеме, показанной на рисунке 5, можно выделить четыре контура $i_1 - i_4$. Используя правила Кирхгофа, запишем систему уравнений для токов и напряжений в этих контурах.

$$i_1 Z_1 + (i_1 - i_2) Z_2 + (i_1 - i_3) Z_3 = 0 \quad (11)$$

$$i_2 Z_4 + (i_2 - i_3) Z_6 + (i_2 - i_1) Z_2 = 0 \quad (12)$$

$$(i_3 - i_1) Z_3 + (i_3 - i_2) Z_6 + (i_3 - i_4) Z_5 = 0 \quad (13)$$

$$(i_4 - i_3) Z_5 = U_2 \quad (14)$$

Представим эту систему в матричной форме. Матрицу импедансов можно записать в виде:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_1 + Z_2 + Z_3 & -Z_2 & -Z_3 & 0 \\ -Z_2 & Z_2 + Z_4 + Z_6 & -Z_6 & 0 \\ -Z_3 & -Z_6 & Z_3 + Z_5 + Z_6 & -Z_5 \\ 0 & 0 & -Z_5 & -Z_5 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Матрица напряжений имеет вид:

$$U = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Аналогично, матрица токов может быть представлена в виде:

$$I = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Тогда систему уравнений (11)–(14) можно представить как произведение матриц:

$$U = I \cdot Z \quad (18)$$

Решая (18) для тока i_1 , получим:

$$i_1 = \frac{Z_3 Z_2 + Z_3 Z_4 + Z_3 Z_6 + Z_2 Z_6 \cdot U_2}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_3 Z_6 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_6 Z_4 + Z_1 Z_6 Z_2 + Z_2 Z_6 Z_4} \quad (19)$$

Из сопоставления схем, изображенных на рисунках 4 и 5 легко видеть, что импедансы $Z_1 \dots Z_6$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{j\omega C_1}, & Z_2 &= \frac{1}{j\omega C_2}, \\ Z_3 &= \frac{1}{j\omega C_3}, & Z_4 &= \frac{1}{j\omega C_4}, \\ Z_5 &= \frac{1}{j\omega C_5}, & Z_6 &= R. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя (20) в (19), получим:

$$i_1 = \frac{\omega C_1 C_4 + C_2 + j\omega C_2 C_4 R + j\omega C_3 C_4 R}{-jC_4 + \omega C_1 C_2 R - jC_2 + \omega C_2 C_4 R - jC_1 + \omega C_3 C_2 R + \omega C_3 C_4 R + \omega C_3 C_1 R} U_2 \quad (21)$$

Из общих соображений паразитная емкость C_3 между зондом и «землей» много меньше емкости C_2 между поверхностью образца и «землей» (учитывая разность площадей образца и зонда). Аналогично можно показать, что емкость C_4 существенно больше, чем C_2 , по тем же соображениям. С учетом этого, выражение (21) можно упростить к виду:

$$i_1' = \lim_{\substack{C_3 \rightarrow 0 \\ C_2 \rightarrow 0}} i_1 = j \frac{\omega C_1 C_4}{C_1 + C_4} U_2. \quad (22)$$

Таким образом, присутствие напряжения U_2 в схеме, приведенной на рисунке 5, приводит к тому, что на импедансе Z_1 будет создаваться падение напряжения $U_1' = i_1' Z_1$. Это падение напряжения будет суммироваться с присутствующим на поверхности диэлектрика потенциалом по принципу суперпозиции:

$$U_{\text{вх}} = U_1 + U_1' = U_1 + \Delta U_1, \quad (23)$$

где $\Delta U_1 = i_1' Z_1$ – систематическая погрешность измерения поверхностного потенциала

Из (7) и (22) можно получить, что:

$$U_1' = \frac{C_4}{C_4 + C_1} U_2 = \frac{C_4}{C_4 + C_1} U_{\text{выхл}} \sin \omega t. \quad (24)$$

Очевидно, что величина абсолютной систематической погрешности ΔU_1 не может превышать амплитуды гармонической функции (24). Тогда:

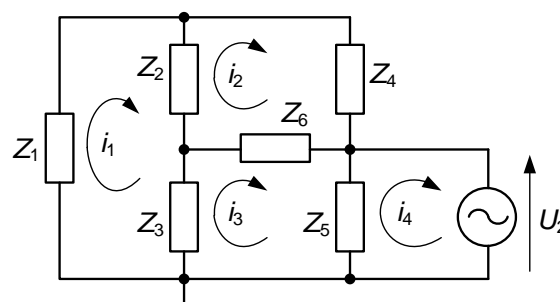


Рисунок 5 – Схема замещения измерителя поверхностного потенциала с токовой компенсацией по отношению к источнику напряжения компенсации U_2

$$\Delta U_1 \leq \frac{C_4}{C_4 + C_1} U_{\text{выхл}}, \quad (25)$$

а приведенная погрешность составит:

$$\delta_U = \frac{\Delta U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{U_{\text{выхл}}}{U_1} \cdot \frac{C_4}{C_4 + C_1} \cdot 100\% \quad (26)$$

Таким образом, добиться уменьшения систематической погрешности измерения поверхностного потенциала можно либо уменьшением коэффициента модуляции m , в соответствии с формулой (10), либо увеличением отношения емкости динамического конденсатора C_1 к паразитной емкости между входом предусилителя и поверхностью образца C_4 .

Заключение

1. В результате анализа существующих методов регистрации поверхностного заряда (поверхностного потенциала) показано, что наиболее удовлетворяющим условиям задачи измерения пространственного распределения поверхностного потенциала диэлектриков является динамический зондовый метод. Данный метод обеспечивает отсутствие влияния на зарядовое состояние образца, приемлемое быстродействие при сканировании исследуемой поверхности, а также малую зависимость измерительного сигнала от расстояния между зондом и поверхностью образца в достаточном диапазоне расстояний. Наиболее приемлемым схемотехническим решением преобразователя поверхностного потенциала диэлектриков является компенсационная схема измерений с токовой компенсацией.

2. Рассмотрены основные особенности схемы измерений с токовой компенсацией, определены основные источники методической погрешности данного измерителя. Получена расчетная формула для определения предела приведенной методической погрешности измерения. Показано, что для уменьшения методической погрешности следует стремиться к увеличению емкости C_2 между образцом и «землей», уменьшению паразитной емкости C_4 между входом предусилителя и «землей», и уменьшению коэффициента модуляции динамического конденсатора m . При этом следует учитывать, что значение коэффициента модуляции m напрямую определяет чувствительность измерительного преобразователя в соответствии с (10), и потому его выбор следует производить с учетом желаемого значения диапазона выходных напряжений преобразователя.

Список использованных источников

1. *Ahmed, N. H.* Review of space charge measurements in dielectrics / N. H. Ahmed, N.N. Srinivas // IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation. – 1997. – № 4 (5). – P. 644–656.
2. *Yarmchuk, E.J.* High-resolution surface charge measurements on an organic photoreceptor / E.J. Yarmchuk, G.E. Keefe // J. Appl. Phys. – 1989. – V.66. – № 11. – P. 5435.
3. *Palevsky, H.* Design of dynamic condenser electrometer / H. Palevsky [et al.] // Review Of Scientific Instruments. – 1947. – V.18. – № 18(5). – P. 297–314.
4. *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 (edited by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. – P. 687–720.
5. *Тявловский, А.К.* Применение трансимпедансных предусилителей в измерителях контактной разности потенциалов / А.К. Тявловский, А.Л. Жарин // Электроника-инфо. – 2010. – № 6. – С. 60–63.
6. *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.

Тявловский А.К., Жарин А.Л.

The analysis of dielectrics' surface potential measuring technique based on a current feedback scheme

The comparative analysis of time-varying probe methods of measurement of a surface potential is held. Regarding contactless measurement of dielectrics' surface potential in a wide range of meanings, a current feedback scheme is found to be optimal. Advantages of this scheme are high spatial resolution, a wide measuring range and an independence of output signal on a probe-to-surface gap in a certain range of gap meanings. Metrological characteristics of the scheme are analyzed resulting in a mathematical expression for a normalized methodical measurement error.

Key Words: surface voltage, probe electrometry, dielectric material, compensation scheme.

Поступила в редакцию 03.10.2011.