

УДК 621.3.08;681.586

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИСТИННОЙ ЕМКОСТИ ДАТЧИКА И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

А.К. ХУРЦИЛАВА, В.Н.ПАВЛЕНКО

Кутаисский государственный университет им. Ак. Церетели

В работе дан анализ влияния диэлектрических потерь на результаты измерения истинной емкости датчика. Показано, что изоляция электродов датчика или включение последовательно с датчиком небольшой емкости приводят к потере основных преимуществ высокочастотных методов влагометрии, т.к. не только не ослабляют влияния электропроводности материала на результаты измерений, но и усугубляют это влияние

Повышение эффективности и качества изделий в производстве в немалой степени определяется уровнем автоматизации технологических процессов. При этом создание эффективных автоматических систем управления связано с разработкой современных технических средств контроля основных технологических показателей процесса производства.

Качество продукции определяет комплекс таких показателей, как прочность, долговечность, надежность и др. эксплуатационные характеристики, в формировании которых важную роль играет влажность материалов. Традиционный метод контроля влажности материалов в готовых изделиях, конструкциях и сооружениях путем отбора проб, их взвешивания и сушки до постоянной массы является трудоемким, длительным, статистически мало представительным, и главное – повреждающим объект контроля. Поэтому проблема разработки и внедрения в производство современных физических методов и технических средств контроля влажности сложных химических продуктов приобретает важное значение.

В решение этой проблемы большой вклад внесен работами М.А. Берлинера, И.С.Вайнштока, М.В. Венедиктова, Е.С. Кричевского, В.А. Ройфе и др.

Объекты и методы исследования

Из современных физических методов измерения и контроля влажности сложных гетерогенных материалов наибольшее практическое применение находит высокочастотный электрофизический метод, особенно применительно к сыпучим материалам, например, строительным.

В связи с этим к числу наиболее важных задач автоматического управления технологическими процессами производства следует отнести создание технических средств контроля влажности, обеспечивающих установление соответствия одного из основных показателей качества изделий нормативным требованиям распространяющихся на них стандартов.

Для решения поставленной задачи нами использована комплексная методика исследований, включающая литературный обзор, патентный поиск, анализ достижений в данной области.

Постановка задачи

Целью данной работы было выявить влияние диэлектрических потерь на результаты измерения истинной емкости датчика и способы их устранения.

Результаты и их обсуждение

При измерении влажности емкостными влагомерами основная метрологическая характеристика влагомера – точность измерений – в ряде случаев становится неудовлетворительной.

Одной из причин низкой точности таких влагомеров является влияние активной проводимости исследуемой среды на результаты измерений истинной емкости датчика.

Наличие в строительных материалах электролитов различной концентрации обуславливает большую величину диэлектрических потерь в этих материалах ($\text{tg}\delta \gg 1$) при помещении их в электрическое поле емкостного датчика. В большинстве случаев применяются генераторные методы измерения емкости, при которых датчик тем или иным способом включается в колебательный контур генератора. При указанных выше величинах потерь непосредственно включение в контур емкостного датчика неизолированных электродов приводит, как известно, к срыву колебаний и невозможности измерений. Для сохранения работоспособности схемы в этих условиях применяют емкостные датчики, электроды которых (один или оба) снабжают изолированным покрытием, что эквивалентно включению датчика в колебательный контур последовательно с некоторой емкостью C_p (рис.1.,б)

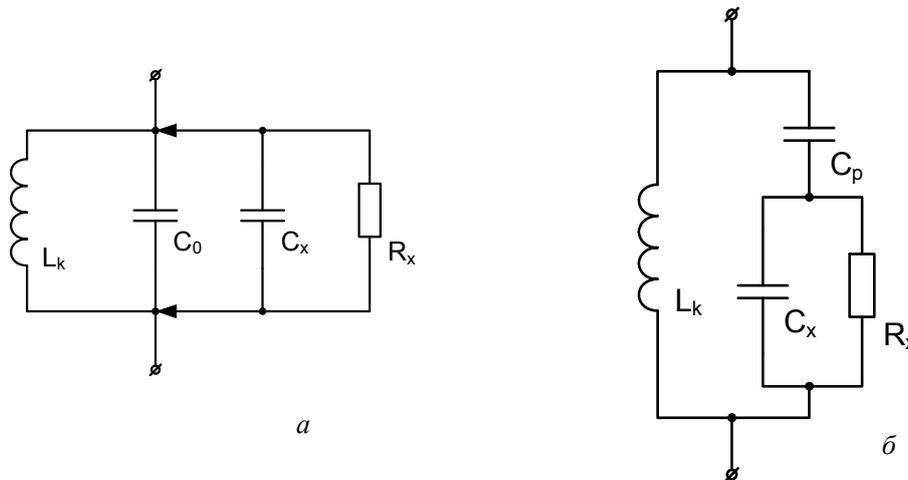


Рис. 1. Параллельный колебательный контур с емкостным датчиком:
a – без учета собственной индуктивности датчика; ***б*** – электроды датчика
 изолированы

При таком включении последовательная емкость C_p образует с емкостью датчика C_x делитель, благодаря чему в колебательный контур вносится лишь часть потерь, обусловленных проводимостью материала. Меняя соотношения между C_p и C_x , вносимые в контур потери можно в той или иной степени уменьшить по сравнению с непосредственным включением датчика. На рис.2 приведена зависимость потерь в контуре ($\text{tg}\delta_3$) от потерь в датчике ($\text{tg}\delta_x$) при различных соотношениях между C_p и C_x :

$$\text{tg}\delta_3 = \frac{C_p \cdot \text{tg}\delta_x}{C_p + C_x(1 + \text{tg}^2\delta_x)} \quad (1)$$

Из этой формулы видно, что $\text{tg}\delta_3$ является немонотонной функцией $\text{tg}\delta_x$. Положение максимума функции определяется путем приравнивания нулю первой производной этой функции и нахождения вещественных корней полученного уравнения.

Проделав указанные операции, получим следующее значение:

$$\text{tg}\delta_x = \sqrt{1 + \frac{C_p}{C_x}} \quad (2)$$

при котором $\text{tg}\delta_3$ имеет максимум.

Из кривых на рис.2, *a* видно, что при значениях $C_p \gg 10C_x$ эффект уменьшения эквивалентных потерь в контуре по сравнению с потерями в датчике незначителен. При значениях же $C_p \gg 0,1C_x$ вносимые в контур эквивалентные потери существенно уменьшаются по сравнению с потерями в датчике. Однако при таких соотношениях между C_p и C_x чувствительность измерительной схемы к изменению истинной емкости датчика резко падает.

Проанализируем влияние диэлектрических потерь в исследуемой среде на результаты измерения истинной емкости датчика в случае неизолированных и изолированных электродов [1]. В первом случае (рис.1, *a*) полная проводимость контура

$$Y = \frac{1}{R_{x_x}} + j\left(\omega C_x - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (3)$$

(величиной C_0 пренебрегаем по сравнению с C_x), и получаем следующее значение резонансной частоты этого контура:

$$\omega = 1/\sqrt{LC_x} \text{ и следовательно } \partial\omega/\partial R_x = 0.$$

Таким образом, при непосредственном включении емкостного датчика с неизолированными электродами в колебательный контур резонансная частота последнего не зависит от величины активной проводимости материала. Значит, в этом случае по частоте генератора может быть однозначно определена истинная емкость датчика, являющаяся мерой влажности среды. Однако, как уже указывалось, такие измерения не всегда оказываются возможными. Во втором случае (рис.1, *б*) выражение для полной проводимости контура имеет вид:

$$Y = \frac{1}{j\omega L} + \frac{j\omega C_p \left(\frac{1}{R_x} + j\omega C_x\right)}{\frac{1}{R_x} + j\omega(C_p + C_x)} = \frac{(j\omega C_p - \omega^2 R_x C_x C_p)(1 - j\omega R_x C_p - j\omega R_x C_x)}{1 + \omega^2 R_x^2 (C_p + C_x)^2} - \frac{1}{j\omega L}. \quad (4)$$

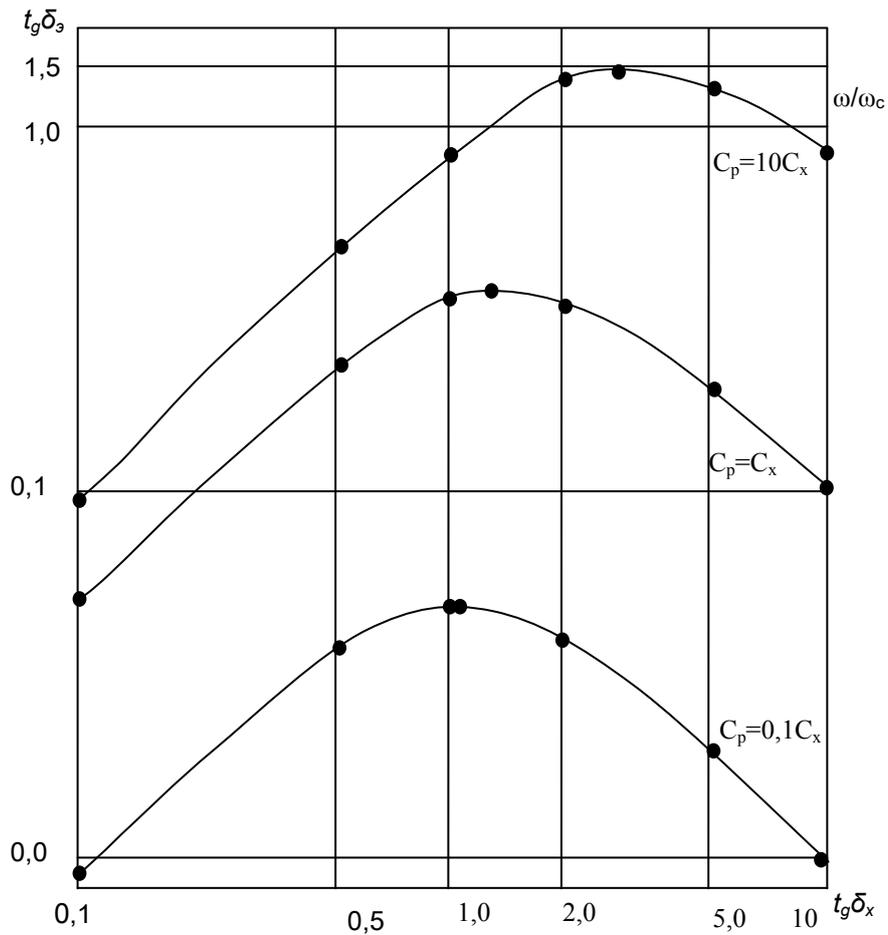
Выделив в этом выражении мнимую часть проводимости и приравняв ее нулю, получим:

$$\omega^4 L R_x^2 C_p C_x (C_p + C_x) - \omega^2 [R_x^2 (C_p + C_x)^2 - LC_p] - 1 = 0. \quad (5)$$

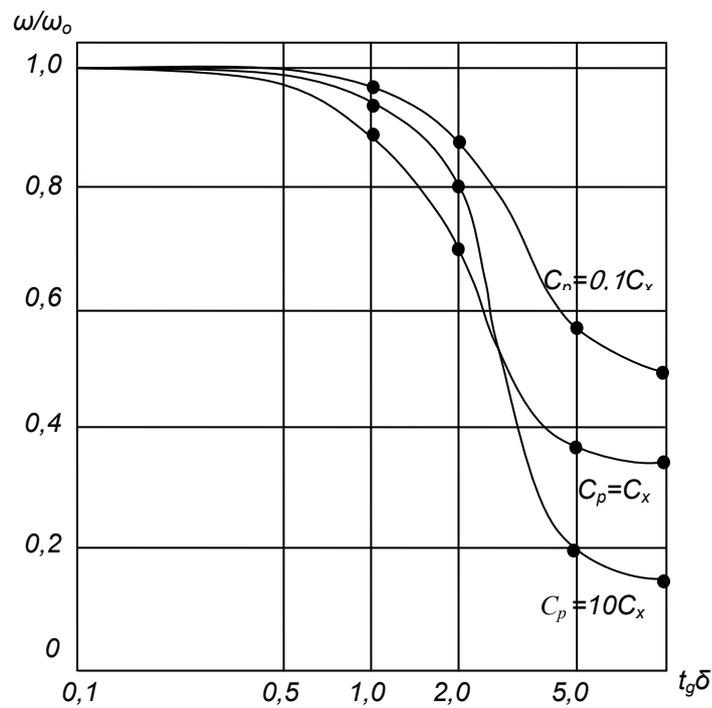
Отсюда резонансная частота колебательного контура имеет вид

$$\omega = \frac{(C_p + C_x)^2 R_x^2 - LC_p + \sqrt{[(C_p + C_x)^2 R_x^2 - LC_p]^2 + 4LR_x^2 C_p C_x (C_p + C_x)}}{2LR_x^2 C_p C_x (C_p + C_x)} \quad (6)$$

В данном выражении знаки перед радикалами выбраны из физических соображений.



a



b

Рис. 2:

a – зависимость эквивалентных потерь, вносимых в контур, от потерь в исследуемой среде; **b** – зависимость относительной ошибки измерений от величины потерь в исследуемой среде.
 Эти зависимости построены по формуле (1)

Из этого выражения следует, что при наличии разделительной емкости C_p (изолирующих прокладок между электродами датчика и исследуемыми материалами) резонансная частота колебательного контура, в который включен датчик, становится функцией не только истинной емкости C_x , но и потерь R_x . Определение истинной емкости датчика по значению частоты в этом случае будет произведено с ошибкой.

Для оценки этой ошибки преобразуем выражение (6) в удобную для анализа форму. Обозначив через ω_0 резонансную частоту контура, изображенного на рис.1., б при отсутствии потерь в датчике ($R_x \rightarrow \infty$),

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \frac{C_p C_x}{C_p + C_x}}}$$

и подставив его в выражение (6), после преобразований получим:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{0,5 \left[1 - \frac{LC_p}{(C_p + C_x)^2 R_x^2} \right] + 0,5 \sqrt{\left[1 - \frac{LC_p}{(C_p + C_x)^2 R_x^2} \right]^2 + \frac{LC_p C_x}{(C_p + C_x)^3 R_x^2}}}$$

Воспользовавшись известным соотношением

$$\operatorname{tg}^2 \delta_x = \frac{1}{\omega C_x^2 R_x^2} = \frac{L}{C_x R_x^2}$$

и введя обозначения

$$m = \frac{C_p C_x}{(C_p + C_x)^2} \quad \text{и} \quad n = \frac{C_p C_x^2}{(C_p + C_x)^3},$$

окончательный получим результат:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{0,5(1 - m \operatorname{tg}^2 \delta_x) + 0,5 \sqrt{(1 - m \operatorname{tg}^2 \delta_x)^2 + n \operatorname{tg}^2 \delta_x}} \quad (7)$$

Представляют интерес количественная оценка влияния потерь в датчике на результаты измерения в зависимости от соотношения между C_p и C_x . Расчет произведем для трех случаев:

а) $C_p = 10C_x$	$(m=0,0826;$	$n= 0,0075);$
б) $C_p = C_x$	$(m=0,25;$	$n= 0,125);$
в) $C_p = 0,1C_x$	$(m=0,0826;$	$n= 0,075);$

Интервал изменения $\operatorname{tg} \delta_x$ берем в пределах от нуля до 10 с дискретными значениями: 0; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10. Результаты расчета приведены в виде графиков на рис.2, б. На основании полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

а) при изменении $\operatorname{tg} \delta_x$ от нуля до 0,5 соотношение между C_p и C_x сравнительно мало влияет на погрешность измерений.

б) при практически используемых соотношениях $C_p = (1 \div 0,3)C_x$ – относительная ошибка измерения истинной емкости датчика в материалах с $\operatorname{tg} \delta_x \geq 5$ превышает 50%.

Из приведенного анализа следует, что включение датчика в колебательный контур по схеме (рис.1,б) не позволяет измерить истинную емкость датчика, т.к. на результаты измерений очень влияет

проводимость материала. Это свойство приводит к потере основного преимущества диэлектрических методов измерений влажности перед кондуктометрическими. В особенности это справедливо для материалов с $\text{tg } \delta_x > 1$, к которым относится большинство влажных строительных материалов.

Существуют различные способы уменьшения влияния потерь в материале на результаты измерения истинной емкости датчика как функции влажности. Рассмотрим некоторые, наиболее эффективные методические и схемные приемы, позволяющие определять расчетным путем или непосредственно измерением истинную емкость датчика влажности проводящих сред. Наиболее простым и распространенным методическим приемом учета влияния потерь в емкостном датчике, включенном в колебательный контур, является одновременное измерение кажущейся емкости C_k и напряжения на колебательном контуре U_k с последующим определением истинной емкости датчика расчетным путем. Этот способ использован автором работы [2] в разработанных им влагомерах для рыхлых грунтов. В ходе градуировки влагомера экспериментальным путем устанавливается связь между U_k и параметром:

$$K = \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \delta_x}$$

По данным измерений C_k и U_k диэлектрическую проницаемость материала находим из формулы:

$$\epsilon = K \frac{C_k}{C_0} \quad (8)$$

где C_0 – емкость пустого датчика.

В силу ряда упрощений и допущений точность такого рода вычислений весьма невелика. Поэтому в задачах, где требуется достаточно точное определение ϵ , применение такой методики нецелесообразно.

Другим приемом есть использование генератора с шунтирующим диодом для измерения величины диэлектрических потерь конденсатора – датчика [3]. При этом одновременно также измеряется C_k . Отличие этой методики от предыдущей состоит в том, что она позволяет измерить непосредственно (а не косвенно) значение активной проводимости конденсатора g_x , чем обеспечивается более высокая точность измерений. Несмотря на это, генератор с шунтирующим диодом не нашел практического применения в емкостных влагомерах.

Говоря о схемных приемах устранения влияния потерь на результаты измерения истинной емкости датчика, необходимо в первую очередь указать на очень простой и эффективный прием, заключающийся в том, что контур с включенным датчиком шунтируют сопротивлением, намного меньшим минимально возможного омического сопротивления исследуемого материала между электродами датчика [4]. При этом потери в контуре остаются практически постоянным при изменении потерь в датчике в широких пределах и, следовательно, изменение резонансной частоты такого контура будет определяться исключительно изменением емкости датчика.

Однако, техническая реализация такой простой на первый взгляд идеи имеет ряд трудностей. Основным затруднением является то, что условие самовозбуждения генератора выполняется лишь до некоторой минимальной величины резонансного сопротивления контура. Если эквивалентное активное сопротивление, шунтирующее контур, меньше этой величины, колебания срываются и измерение становится невозможным. Запас генератора по самовозбуждению удобно характеризовать величиной

«отрицательного» сопротивления, численно равной минимальной величине резонансного сопротивления контура, при котором еще выполняется условие самовозбуждения. Это условие записывается в виде:

$$|R_{(-)}| \leq R_{oe_{min}} \quad (9)$$

где $R_{(-)}$ – отрицательное сопротивление генератора; $R_{oe_{min}}$ – минимальное резонансное сопротивление колебательного контура.

При наличии в контуре шунта параллельно датчику уменьшение влияния потерь $R_{oe_{min}}$ определяется, в основном, величиной сопротивления шунта $R_{ш}$, как указывалось выше, должно удовлетворять условию $R_{ш} \leq 0,1 R_{oe_{min}}$. Следовательно, в этом случае должно выполняться (6) условие:

$$|R_{(-)}| \leq R_{ш} \quad (10)$$

При величине $R_{ш}$ порядка сотен Ом, что имеет место для большинства строительных материалов, величина $R_{(-)}$, а следовательно и $R_{(-)}$ должна составлять не более нескольких десятков сантиметров.

В подавляющем большинстве диэлектрометрических влагомеров применяются транзисторные генераторы высокой частоты, у которых $R_{(-)}$ составляет от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^2$ см. Очевидно, что шунтирование колебательного контура сопротивлением $R_{ш}$, выбранным в соответствии с приведенными выше соображениями, приведет к срыву генерации и измерительная схема станет неработоспособной.

Принципиальное решение этого вопроса предложено в работе [5], где приведена схема емкостного влагомера, генератор которого выполнен на туннельном диоде. Отличительной чертой этого полупроводникового прибора является наличие падающего участка на вольт-амперной характеристике, что позволяет использовать туннельный диод в качестве отрицательного сопротивления, в частности, в схемах генераторов. При этом, в отличие от широко распространенных ламповых и транзисторных схем $R_{(-)}$, генератор на туннельном диоде составляет от нескольких сотен до десятых долей Ом (в зависимости от типа диода). Таким образом, шунтируя контур генератора на туннельном диоде малым сопротивлением $R_{ш}$, можно практически устранить влияние переменных потерь в датчике при сохранении работоспособности измерительной схемы. Однако влагомеры с генератором на туннельном диоде не нашли широкого применения. Одной из основных причин этого является сложность обеспечения стабильной рабочей точки на падающем участке вольт-амперной характеристики туннельного диода. Дело в том, что туннельный диод, как и любой другой полупроводниковый прибор, обладает собственной емкостью, величина которой сильно зависит от приложенного к диоду напряжения. В схеме генератора туннельный диод включается (по переменному току) параллельно колебательному контуру, а, значит, и датчику.

Как правило, емкость датчика существенно меньше емкости туннельного диода, поэтому даже небольшие относительные изменения последней, вследствие нестабильности напряжения на Диоде, могут привести к существенным погрешностям в измерениях емкости датчика, а, следовательно, и влажности. Отсюда вытекает необходимость жесткой стабилизации рабочей точки диода. У большинства выпускаемых отечественной промышленностью туннельных диодов величина напряжения, при котором рабочая точка находится на падающем участке, составляет 0,2–0,5 В. Качественная стабилизация таких малых напряжений (при сравнительно больших токах) представляет собой сложную техническую задачу,

которая может быть реализована только в виде сложного и громоздкого лабораторного прибора, малопригодного для производственных условий.

Существенно уменьшить влияние переменных потерь в датчике на результаты измерений позволяют так называемые двухчастотные и многочастотные методы [6].

В этих методах меняют условия измерения так, чтобы при сопоставлении результатов, полученных при различных условиях измерения, можно было получить совокупность функционально разделяемых сигналов. Изменение условий измерения в этих методах осуществляется введением в функцию $C(\varepsilon, \operatorname{tg} \delta)$ параметра разделения, значение которого можно менять произвольно, независимо от значений контролируемых параметров. Используя в качестве параметра разделения частоту электрического поля и задавая ей различные значения, получают систему уравнений вида:

$$C = \varphi(\varepsilon_i, \operatorname{tg} \delta_i, f_i). \quad (11)$$

Тогда задача нахождения параметра сводится к решению этой системы. Следует отметить, что техническая реализация многочастотных методов весьма сложна, кроме того, ряд методических вопросов еще не ясен.

В последнее время все большее внимание специалистов в области электровлагометрии привлекает способ измерения емкости датчика, в котором принципиально устраняется влияние переменной активной проводимости (в параллельной схеме замещения). В основе способа – сравнение модулей напряжения на измерительном двухполюснике, питаемом от высокочастотного генератора тока, при параметрической модуляции напряжений на двухполюснике. Измерительный двухполюсник представляет собой последовательное соединение постоянной индуктивности L с параллельно включенными емкостью и активным сопротивлением (рис.3).

Роль параллельной RC-цепи играет емкостной датчик, в электрическом поле которого находится исследуемый материал, обладающий диэлектрической проницаемостью и потерями, с параллельно включенным градуированным конденсатором переменной емкости. Параметрическая модуляция напряжения на двухполюснике осуществляется периодическим замыканием и размыканием ключа K .

Покажем, что на результаты измерения емкости конденсатора потери таким способом не оказывают влияния.

Рассмотрим эквивалентные схемы, приведенные на рис.3.

На рис.3, *а* двухполюсник представляет собой последовательный колебательный контур, а на рис.3, *б* – параллельный колебательный контур.

Измеряемая емкость в обоих случаях представлена параллельной схемой замещения. Параллельно датчику включен измерительный конденсатор переменной емкости C_n .

Двухполюсник питается от генератора высокочастотного тока с частотой ω . Модуляция параметров двухполюсника осуществляется в первом случае (рис.3, *а*) путем периодического замыкания и размыкания нижнего плеча двухполюсника с помощью ключа K , а во втором случае (рис.3, *б*) – путем периодического подключения к двухполюснику дополнительной постоянной емкости C_d также с помощью ключа K . Выражения для комплексного сопротивления (комплексной проводимости) двухполюсника при разомкнутом и при замкнутом ключе K имеют вид соответственно:

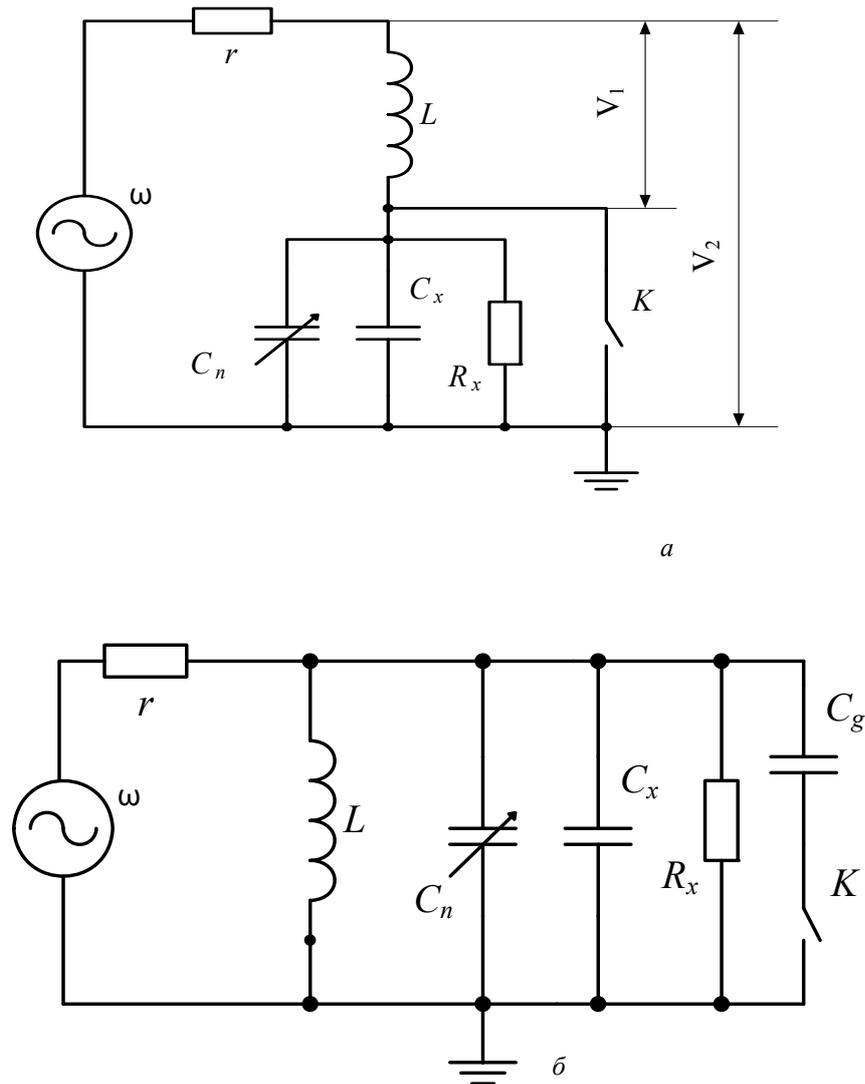


Рис.3. Схемы измерения емкости методом сравнения напряжений на двухполюснике при параметрической модуляции

Для последовательного контура (рис. 3, а):

$$Z_p = \frac{j\omega L - \omega^2 L(C_{\Pi} + C_x)R_x + R_x}{1 + j\omega(C_{\Pi} + C_x)R_x}; \quad (12)$$

$$Z_3 = j\omega L \quad (13)$$

для параллельного контура (рис. 3, б)

$$Y_p = \frac{1}{R_x} - j \left[\frac{1}{\omega L} - \omega(C_{\Pi} + C_x) \right]; \quad (14)$$

$$Y_3 = \frac{1}{R_x} - j \left[\frac{1}{\omega l} - \omega(C_{\Pi} + C_x + C_g) \right]. \quad (15)$$

Модули комплексных сопротивлений и проводимостей двухполюсника, соответственно, имеют вид:

$$|Z_p| = \frac{\sqrt{R_x^2 + [\omega L - \omega(C_{\Pi} + C_x)R_x^2 + \omega^3 L(C_{\Pi} + C_x)^2 R_x^2]^2}}{1 + \omega^2(C_{\Pi} + C_x)^2 R_x^2}; \quad (16)$$

$$|Z_3| = \omega L \quad (17)$$

$$|Y_p| = \sqrt{\frac{1}{R_x^2} + \frac{[1 - \omega^2 L(C_{\Pi} + C_x)]^2}{\omega^2 L^2}}; \quad (18)$$

$$|Y_3| = \sqrt{\frac{1}{R_x^2} + \frac{[1 - \omega^2 L(C_{\Pi} + C_x + C_g)]^2}{\omega^2 L^2}}. \quad (19)$$

Из этих выражений следует, что величина модуля комплексного сопротивления (проводимости) при неизменных параметрах двухполюсника в общем случае принимает различные значения в зависимости от того, разомкнут или замкнут ключ K . Однако можно показать, что при определенных соотношениях между параметрами двухполюсника и частотой ω величина модуля полного сопротивления (проводимости) двухполюсника остается постоянной независимо от того, замкнут или разомкнут ключ K .

Условия, удовлетворяющие такому состоянию двухполюсника, можно получить, приравняв модули комплексного сопротивления (проводимости) двухполюсника при замкнутом и разомкнутом ключе K .

Соотношения между параметрами двухполюсника и частотой питающего генератора, полученные из условия $|Z_p| = |Z_3|$ или $|Y_p| = |Y_3|$, имеют следующий вид (промежуточные преобразования опущены):

$$\text{по схеме рис. 3, а:} \quad \omega^2 L(C_{\Pi} + C_x) = \frac{1}{2}; \quad (20)$$

$$\text{откуда:} \quad C_x = \frac{1}{2\omega^2 L} - C_{\Pi}; \quad (21)$$

$$\text{по схеме (рис.3, б)} \quad \omega^2 L(C_{\Pi} + C_x + C_g/2) = 1, \quad (22)$$

$$\text{Откуда} \quad C_x = \frac{1}{\omega^2 L} - (C_{\Pi} + C_g/2). \quad (23)$$

В выражениях (21) и (23) не вошли потери R_x , следовательно, при выполнении условия равенства полных проводимостей (сопротивлений) результаты измерения емкости C_x принципиально не зависят от величины потерь сквозной проводимости R_x .

Нетрудно видеть, что при $|Z_p| \neq |Z_3|$ или $|Y_p| \neq |Y_3|$ высокочастотное напряжение на двухполюснике будет модулировано по амплитуде.

Частота модуляции равна частоте переключения ключа K , а амплитуда модуляции будет тем больше, чем сильнее отличаются модули полных сопротивлений (проводимостей) двухполюсника при разомкнутом и замкнутом ключах.

Очевидно, что при выполнении указанного выше условия амплитуда будет равна нулю, т.е. высокочастотное напряжение на двухполюснике станет немодулированным. Таким образом, равенство амплитуд, в.ч. напряжения (отсутствие модуляции), на двухполюснике при разомкнутом и замкнутом ключах K свидетельствует о равенстве модулей полных сопротивлений (проводимостей), т.е. о выполнении равенства (20) или (22) для схем (рис.3, а) и (рис.3, б). Следовательно, фиксируя отсутствие модуляции в.ч. напряжения на двухполюснике, можно по величине C_{Π} однозначно определить

C_x независимо от величины R_x (при условии $\omega = \text{const}$ и $L = \text{const}$). Техническая реализация этих теоретических предпосылок может быть различной.

Выводы

Анализ влияния диэлектрических потерь на результаты измерения истинной емкости датчика показывает, что изоляция электродов датчика или включение последовательно с датчиком небольшой емкости – приемы, часто применяемые для сохранения работоспособности измерительной схемы во влагометрии проводящих сред – приводят к потере основных преимуществ высокочастотных методов влагометрии, т.к. не только не ослабляют влияния электропроводности материала на результаты измерений, но и усугубляют это влияние.

ЛИТЕРАТУРА

36. Хурцилава А.К. К вопросу об измерении истинной емкости датчиков влажности проводящих сред // Сб. докл. II Республиканской научно-технической конференции по метрологии. Тбилиси. – 1972. – с.32–38.
37. Черняк Г.Я. Диэлектрические методы исследования влажных грунтов.– М.: Недра. 1964. – 250 с.
38. Момот Г.Е. Генератор с шунтирующим диодом и его применение. – М.: Энергия.– 1959. – 230 с.
39. Берлинер М.А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. – М.: – Л.: Энергия. 1973. – 340 с.
40. Авторское свидетельство №183472 Электронный влагомер / Ройфе В.С. Бюл. изобр. – 1966. – №13.
41. Худoley Л.Л. Исследование электрофизических свойств сыпучих материалов методом свипирования в диапазоне высоких частот // В сб. Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока.– М.: Энергия, 1970. – с. 25– 27.

Надійшла 13.11.2008