

**Литература:** 1. *Радин А.М., Третьяков О.А., Шестопалов В.П.* Линейная самосогласованная теория дифракционного излучения // ЖТФ. 1969. Т.39, №7. С.1180. 2. *Сологуб В.Г., Шестопалов В.П., Половников Г.Г.* Дифракция электромагнитных волн на металлических решетках с узкими щелями // ЖТФ. 1969. Т.39, №4. С.666.

Поступила в редколлегию 12.02.2001

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Руженцев И.В.

**Зуев Николай Григорьевич**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики ХТУРЭ. Научные интересы: математическая физика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

**Хмель Сергей Иванович**, соискатель кафедры МИТ ХТУРЭ. Научные интересы: радиофизика и измерительная техника. Адрес: Украина, 61726, Харьков, просп. Ленина, 14, тел. 14-08-02.

**Чумаченко Виктор Савельевич**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научного физико-технологического центра НАНУ. Научные интересы: математическая физика. Адрес: Украина, 61145, Харьков, ул. Новгородская, 1, тел. 32-45-67.

**Чумаченко Светлана Викторовна**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры АПВТ ХТУРЭ. Научные интересы: математическая физика. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

УДК 543.083/.084

## ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВЫХ СРЕД

*ГОРДИЕНКО Ю.Е., ГУД Ю.И., ПАШКОВ А.В.,  
СЛИПЧЕНКО Н.И.*

Рассматриваются принципы построения емкостных тонкопленочных датчиков влажности газовых сред, направленные на повышение их метрологической эффективности и подавление влияния мешающих факторов. В отличие от традиционных емкостных датчиков влажности предложен новый вариант методики измерений, базирующийся на регистрации действительной и мнимой части комплексной емкости и формировании комбинированных выходных информативных сигналов. Предлагаются конструктив тонкопленочного сенсора емкостного датчика влажности и его электродинамическая теория, а также рекомендации по выбору оптимального рабочего диапазона частот датчика.

В настоящее время количественное определение влаги в газовых средах далеко не исчерпывается атмосферной гигрометрией или оценкой влажности газов по пробам. Возникают задачи дистанционного измерения влажности атмосферы в различных ее слоях; контроля влагосодержания потоков технологических газов; процессов сушки объектов газовыми теплоносителями [1] и др. Решение таких задач целесообразнее всего осуществлять, используя электрические датчики влажности газовых сред [2, 3]. Функционирование их основано на применении сенсоров (первичных измерительных преобразователей), у которых под действием содержащейся в окружающей среде влаги изменяется какой-нибудь из электрофизических параметров: электрическое сопротивление; электрическая емкость; термо- э.д.с.; фото- э.д.с. и т.д.

Наиболее широко для этих целей используются сенсоры резистивного и емкостного типа [4]. У обоих типов сенсора основной частью является электроматериал со свойством хорошо обратимого влагопоглощения. У резистивного сенсора он должен иметь конечное удельное сопротивление, а у емкостного – хорошие диэлектрические свойства (низкий тангенс угла диэлектрических потерь и невысокую диэлектрическую проницаемость).

В разработке современных датчиков влажности материалов, сред и объектов, наряду с обычными задачами повышения метрологической эффективности (увеличения чувствительности, долговечности, воспроизводимости градуировки и т.п.), существуют проблемные моменты, связанные с подавлением влияния мешающих факторов на результат измерения и исключением необходимости индивидуальной градуировки [4]. В последнее определение входит как градуировка каждого экземпляра, так и градуировка под данный объект.

Практика показывает, что такие важнейшие характеристики сенсоров как долговечность и воспроизводимость чувствительности значительно выше у емкостных. Это объясняется различием механизмов электропроводности и поляризации гигроскопичных электроматериалов.

Имеется ряд причин отдавать предпочтение емкостным сенсорам. Важнейшая из них – по меньшей мере, двухпараметровое воздействие влаги на поляризацию гигроскопичных диэлектриков. Ввиду высоких значений диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь воды поглощение ее сенсором емкостного типа приводит к изменению действительной и мнимой части его емкости. При этом часто имеет место существенная частотная зависимость указанных величин. Эти обстоятельства играют важную роль при разработке датчиков, инвариантных к так называемым мешающим факторам [4]. Следует отметить, что такой подход к решению проблемы исключения (или подавления) мешающих факторов ранее практически не применялся.

В первую очередь при этом создаются предпосылки исключения влияния (в определенных рамках) технологии формирования чувствительного слоя и его структуры на воспроизводимость метрологических параметров сенсора. В результате может отпасть необходимость индивидуальной градуировки сенсоров, что значительно упрощает подавление таких существенных мешающих факторов как температура, давление и состав газовых сред.

Дальнейший анализ будем производить, исходя из следующих основных требований к эксплуатационным свойствам датчиков: высокой чувствительности; высокой воспроизводимости градуировочных характеристик; максимальной возможности подавления влияния мешающих факторов; возможности встраивания в технологические процессы.

В отличие от традиционных емкостных датчиков влажности, базирующихся на измерении действительной части емкости, нами выдвигается принцип, основанный на измерении обеих составляющих комплексной емкости и формировании выходных сигналов измерительной информации датчика в виде их комбинации.

Поясним его суть, используя весьма приближенные качественные соображения. При заданном влагозаполнении сенсорной части датчика действительная и мнимая составляющие ее емкости в отдельности могут существенно зависеть от структуры влагопоглощающего диэлектрика, особенности включения влаги в эту структуру, эффективной геометрии поглощающей части сенсора и т.п. Отношение же этих составляющих к инвариантности по указанным факторам будет тем ближе, чем идентичнее упомянутые зависимости. Возможна компенсация неидентичности путем другой комбинации участия этих составляющих в формировании выходного сигнала измерительной информации самого датчика.

Исходя из общих соображений, можно утверждать, что чувствительность емкостного сенсора (первоначально задающая чувствительность датчика) определяется относительным изменением его емкости  $\Delta C/C_0$  при заданном изменении влагопоглощения. Полная величина  $C_0$  определяется геометрией сенсора и диэлектрической проницаемостью влагопоглощающего материала. Однако в нее может входить емкость, не подвергающаяся воздействию влаги из окружающей среды. Естественно, что для повышения чувствительности вклад последней необходимо уменьшать. При этом можно будет утверждать, что чувствительность сенсора определится соотношением диэлектрических параметров воды и материала на рабочей частоте. Следовательно, с одной стороны, рабочая частота датчика должна приходиться на область максимального отношения указанных параметров, с другой — удельная емкость сенсора не может быть большой по причине компланарности оптимальной геометрии его рабочих электродов (рис. 1, а, б). При некомпланарной структуре величина влагонепоглощающей части  $C_0$  значительно возрастает.

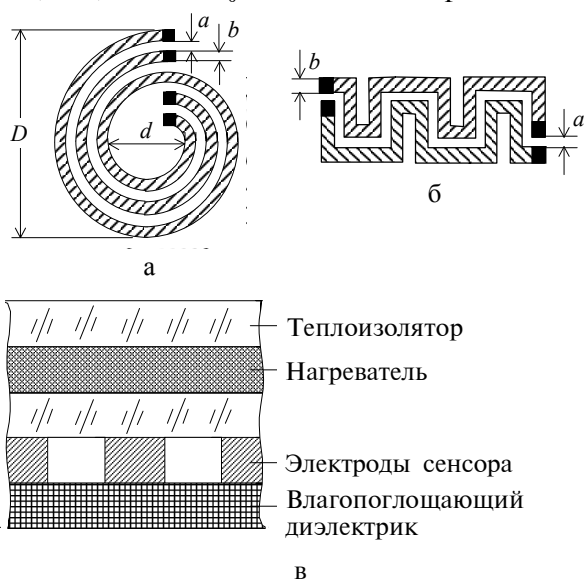


Рис. 1

В дополнение следует отметить, что  $\text{tg} \delta$  воды в области низких частот сильно зависит от ее химического состава [5]. В области частот выше  $10^7$  Гц эта зависимость незначительна. Кроме того, высокая чувствительность датчика при фиксированном  $\Delta C/C_0$  сенсора по обеим составляющим реализуется аппаратно проще на высоких частотах.

Совокупность перечисленных аргументов предопределяет целесообразность разработки датчиков влажности газовых сред, функционирующих на частоте выше  $10^7$  Гц. Следует отметить, что это утверждение не соответствует традиционному подходу емкостной влагометрии и, в первую очередь, продумано предложением измерять обе составляющие изменения комплексной емкости сенсора.

С учетом указанных выше тенденций в создании новых датчиков влажности и выдвинутых принципов можно предложить следующий алгоритм их разработки.

- ♦ Выбор материала влагопоглощающего диэлектрика для сенсора, обеспечивающего, кроме обратимости процесса, минимальную его зависимость от давления и температуры контролируемого газа; структурную и химическую стойкость к воздействию окружающей атмосферы, включая измеряемые газовые среды.
- ♦ Определение оптимального диапазона рабочих частот с учетом необходимости измерения на нескольких частотах для подавления специфических мешающих факторов.
- ♦ Проектирование конструктива сенсора и технологии его реализации.
- ♦ Экспериментальное исследование сенсора, в том числе и количественных характеристик влияния мешающих факторов.
- ♦ Проектирование функциональной схемы датчика и схем электрических принципиальных его отдельных узлов.

Рассмотрим более подробно первые стадии этого алгоритма, предполагая в соответствии с целями статьи анализировать возможности новых принципов.

Выбор материала диэлектрика обычно, в первую очередь, учитывает такие критерии как чувствительность сенсора и ее воспроизводимость. Выделенные в нашей формулировке дополнительные условия связаны с необходимостью упростить процедуры подавления влияния мешающих факторов.

В принципе, в связи с необходимостью удаления влаги из сенсора перед следующим измерением влияние температуры можно исключить, термостабилизируя его электронно-управляемым подогревателем. Однако учет влияния давления газа потребует измерения в двух температурных точках. Поэтому идеальным является материал, у которого практически отсутствует зависимость влагопоглощения от давления газа и температуры.

В такой постановке мы предлагаем перейти к измерению влажности газовых сред по температуре точки росы, которая фиксируется емкостным способом. В этом случае материал диэлектрика должен быть влагонепоглощающим, скорее типа безщелоч-

ного стекла или слоя кремния. Схематическое изображение сенсора такого типа представлено на рис. 2. При этом сам датчик будет иметь простую функциональную схему, однако, потребуются термоэлемент.

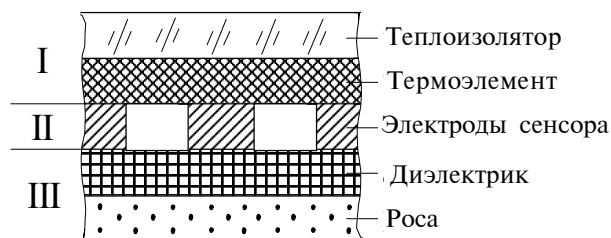


Рис. 2

Рабочий диапазон частот датчика для такого варианта сенсора более целесообразно сместить в область частот  $10^8 \dots 10^9$  Гц, в которой слой конденсата воды фиксируется с минимальным влиянием мешающих факторов.

Функциональная схема датчика, основанного на этом новом принципе, может строиться по автодлинному типу [6]. Регистрацию точки росы при этом более целесообразно производить по переходу к насыщению зависимости амплитуды или частоты автодина от температуры.

Определенные проблемы в этом варианте датчика возникнут при совмещении сенсора и охлаждающего термоэлемента. Для обеспечения высокой точности регистрации точки росы ВЧ добротность сенсора должна быть как можно больше. Однако при хорошем тепловом контакте диэлектрического конденсатора с термоэлементом последний будет уменьшать добротность сенсора.

Учитывая другие известные ограничения метода измерения влажности газов по точке росы [1], следует разрабатывать и обычный емкостной вариант датчика. Сложность его зависит от необходимости и многопараметровости подавления влияния мешающих факторов.

На рис. 3 приведена структурная схема такого датчика, реализующая подавление влияния структурной нестабильности материала сенсора и условий влагосодержания в нем.

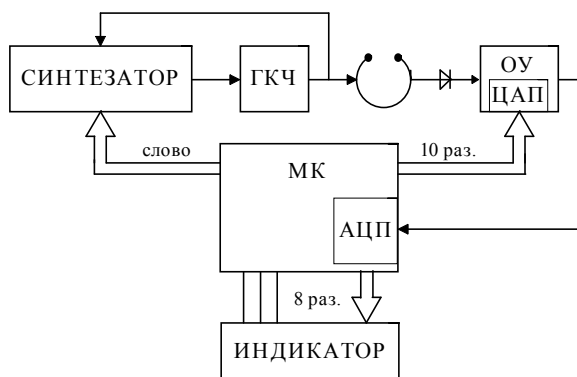


Рис. 3

Использование микроконтроллера позволяет выбрать несколько вариантов комбинированных информативных сигналов, сводя такой датчик к адаптивному типу [4].

Исходя из ранее аргументированной обусловленности рабочего диапазона частот датчика, конструктив его сенсора (рис. 1, 2) должен вписываться в требования к параметрам колебательного контура на УВЧ. Для предварительных оценок взаимосвязи этих параметров сенсора с его геометрией можно воспользоваться следующими соотношениями.

Емкость пленочных сенсоров такой конструкции связана с геометрией приблизительно следующим образом:

$$C = \beta \epsilon_p l, \quad (1)$$

где  $\beta$  – размерный коэффициент, определяемый соотношением  $a/b$  (рис.1);  $\epsilon_p$  – результирующая диэлектрическая проницаемость подложки, на которой сформирован пленочный сенсор, и среды;  $l$  – длина общей границы, образующей пленочный конденсатор.

Индуктивность и добротность пленочных сенсоров (рис. 1, а, б) можно оценить, используя такие упрощенные выражения:

$$L = \frac{25 D_{cp} N}{1 + 3H / D_{cp}}; \quad (2)$$

$$Q = \frac{4 f L b h t}{\rho d^2 \left[ \left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right]}, \quad (3)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр витка;  $N$  – число витков спирали;  $H$  – ширина спирали ( $H = Nh + b$ );  $b$  – ширина проводника;  $h$  – шаг спирали;  $t$  – толщина проводника;  $f$  – частота;  $\rho_s$  – поверхностное сопротивление металлизации;  $d$  – внутренний диаметр спирали;  $D$  – внешний диаметр спирали.

Однако для точной оценки чувствительности сенсора и зависимости ее от мешающих факторов необходима более строгая его математическая модель. В особенности важно учесть в ней электромагнитную природу поля в сенсоре.

Более точная теория емкостных сенсоров достаточно хорошо разработана в электростатическом приближении для их различных конфигураций [7]. Однако практическое использование ее весьма ограничено из-за чрезвычайной громоздкости аналитических выражений и их разнотипности для отличающейся геометрии. Кроме того, неясна возможность прямой замены  $\epsilon_i$  на комплексное ее значение в конечных выражениях.

В целом же на ВЧ целесообразно формировать электродинамическую теорию, в которую комплексная диэлектрическая проницаемость слоев  $\tilde{\epsilon}_i$  будет входить естественным образом.

Для этого можно воспользоваться подходом, развитым нами в работе [8]. Допустимость приближения заданного поля (в случае тонкопленочных сенсоров и отсутствия необходимости предусматривать влияние высших типов колебаний) не вызывает сомнения. Поэтому соответствующая теория может строиться по укороченному алгоритму, который можно назвать квазиодномодовым приближением.

Принцип этого приближения проиллюстрируем на примере коаксиального сенсора (рис. 2). Электрическое и магнитное поля непосредственно в металлической части II сенсора будем считать заданными, определяемыми соотношениями

$$E_r = \frac{U_0}{r} ; \quad H_\varphi = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{U_0}{r} . \quad (4)$$

В соответствии с [8] магнитное и электрическое поля в областях I и III представим в виде

$$H_\varphi^{I,III} = -j\omega \tilde{\epsilon}_1^{I,III} \times \\ \times \int_0^{r_2} \int_{r_1} J_1(\omega r) J_1(\omega r') \frac{\omega r'}{\gamma_1^{I,III}} E_r(r') \times \\ \times \left[ \text{cth}(\gamma_1^{I,III} \Delta z_1) - \text{sch}(\gamma_1^{I,III} \Delta z_1) R_1^{I,III} \right] dr' d\omega ,$$

$$E_r^{I,III} = - \int_0^{r_2} \int_{r_1} J_1(\omega r) J_1(\omega r') \omega r' E_r(r') \times \\ \times \left[ \text{th}(\gamma_1^{I,III} \Delta z_1) + \text{csch}(\gamma_1^{I,III} \Delta z_1) R_1^{I,III} \right] dr' d\omega ,$$

где  $r_1$  – радиус внутреннего штыря;  $r_2$  – радиус отверстия;  $R_1$  – находится из рекуррентного соотношения

$$R_m^{I,III} = \left( \frac{\tilde{\epsilon}_{m-1}^{I,III}}{\gamma_{m-1}^{I,III}} \right) \text{sch}(\gamma_{m-1}^{I,III} \Delta z_{m-1}) \times \\ \times \left\{ \left( \frac{\tilde{\epsilon}_{m-1}^{I,III}}{\gamma_{m-1}^{I,III}} \right) \text{cth}(\gamma_{m-1}^{I,III} \Delta z_{m-1}) + \right. \\ \left. + \left( \frac{\tilde{\epsilon}_m^{I,III}}{\gamma_m^{I,III}} \right) \left[ \text{cth}(\gamma_m^{I,III} \Delta z_m) - \text{sch}(\gamma_m^{I,III} \Delta z_m) R_{m+1}^{I,III} \right] \right\}^{-1} ,$$

в котором  $R_{m+1}^{I,III} = 1$  для изображенного на рис. 2

варианта сенсора;  $\gamma_m^{I,III} = \sqrt{\omega^2 - \tilde{\epsilon}_m^{I,III} k_0^2}$ ;  $\omega$  – круговая частота;  $\tilde{\epsilon}_m^{I,III}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость  $m$ -го слоя в области I или III;  $k_0$  – постоянная распространения в свободном пространстве;  $\Delta z_m$  – толщина  $m$ -го слоя в области I или III.

Характеристическое уравнение для определения  $\tilde{\omega} = \omega' + j\omega''$  и связанных с этим параметром величин сигналов измерительной информации  $\Delta\omega/\omega_0$  и  $\Delta Q/Q$  запишется в виде

$$\left. \frac{H_\varphi^{II}}{E_r^{II}} \right|_{z=+h_M/r} = \left. \frac{H_\varphi^{III}}{E_r^{III}} \right|_{z=-h_M/r} .$$

Аналогичным образом могут быть составлены характеристические уравнения для других конфигураций сенсора.

В заключение отметим, что высказанные принципы и положения в полной мере соответствуют направлению теоретических и практических подходов в использовании и разработке эффективных в метрологическом отношении емкостных датчиков влажности газовых сред.

**Литература:** 1. *Бегунов А.А.* Теоретические основы и технические средства гигрометрии. М.: Изд-во стандартов, 1988. 176 с. 2. *Лапишин А.А.* Электрические влагомеры. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 114 с. 3. *Берлинер М.А.* Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.-Л.: Энергия, 1965. 488 с. 4. *Кудрявцев А.В., Шевченко В.Н.* Емкостные измерители влажности жидких сред. Фрунзе: Илим, 1989. 53 с. 5. *Берлинер М.А.* Измерение влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с. 6. *Овчаренко Л.А.* Анализ СВЧ автодинного измерительного преобразователя для контроля пленочных материалов электроники // Радиотехника. 1985. Вып. 73. С. 126-131. 7. *Матис И.Г.* Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: Зинатне, 1977. 255 с. 8. *Панченко А.Ю., Гордиенко Ю.Е., Фар Р.С.* Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонаторных СВЧ датчиков апертурного типа // Радиотехника. 1998. Вып. 107. С. 93-103.

Поступила в редколлегию 01.06.2001

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Бых А.И.

**Гордиенко Юрий Емельянович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-62, 32-12-76.

**Гуд Юрий Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: неразрушающий контроль материалов электронной техники. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (0572) 40-93-62.

**Пашков Александр Викторович**, соискатель кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХТУРЭ. Научные интересы: теоретические проблемы микроэлектроники, создание новых материалов и структур для датчиков. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-62, 32-12-76.

**Слипченко Николай Иванович**, канд. техн. наук, профессор, проректор по научной работе ХТУРЭ. Научные интересы: радиофизика и электроника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-90-20.