

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЩУПОВОГО ТИПА

В.С. КОРКО, к.т.н.; В.Н. ЛОВЕРОВ, к.т.н. (БАТУ)

Первичный измерительный преобразователь (ПИП) является важным элементом измерителя влажности. Он преобразует физические параметры материалов, содержащих воду в различных фазах, в электрические величины: сопротивление, емкость, индуктивность. При высокочастотном методе измерения влажности в качестве ПИП используется конденсатор, емкость которого зависит от его конструкции, размеров и окружающего его пластины материала (среды) исследования. Таким образом, ПИП имеет в своем составе пластины (электроды), образующие конденсатор, элементы крепления этих пластин и соединительные провода.

Наибольшее распространение в высокочастотной волгометрии получили конденсаторы следующих типов [1,2]:

- 1) с криволинейными (цилиндрическими) или плоскими пластинами, расположенными на одной общей поверхности (копланарные пластины);
- 2) с коаксиальными цилиндрическими пластинами, имеющими общую ось и расположенными на разных поверхностях;
- 3) с плоскими пластинами, расположенными на параллельных плоскостях (плоскопараллельные пластины);
- 4) с одиночным электродом (пластиной) в виде проводящего стержня конечной длины. Такой ПИП измеряет емкость и проводимость среды измерения относительно земли.

У конденсаторов с цилиндрическими и плоскими электродами при соприкосновении материала с пластинами (или при приближении материала к пластинам) изменяется краевая емкость. Это конденсаторы с продольным или параллельным внешним электрическим полем, в отличие от обычных конденсаторов, у которых "внутреннее" поле направлено поперек материала, находящегося между обкладками. Такие ПИП могут быть односторонними и двухсторонними, но всегда с их помощью измеряют емкость слоев материала, близких к поверхности. При этом возникает двойная задача:

- 1) измерение электрических параметров материала при известных значениях емкости конденсатора;
- 2) измерение емкости конденсатора при известных параметрах материала (при градуировке ПИП).

При измерении параметров материала его диэлектрическую проницаемость нельзя определить по отношению емкости конденсатора с материалом между обкладками

и емкости пустого конденсатора. Емкостные ПИП, кроме рабочей емкости, заполняемой материалом, имеют еще и паразитные емкости. Рабочая емкость без материала называется "воздушная" C_0 . Паразитная емкость характеризуется двумя составляющими, а именно, емкостью выводов, изоляционных деталей, составляющих дополнительную емкость C_0 и емкостью, обусловленную краевым эффектом искривления поля у краев обкладок конденсатора C_k . Дополнительная емкость такого конденсатора постоянна, в то время как краевая зависит от степени загрузки или погружения в материал. Таким образом, если пренебречь индуктивностью и активной проводимостью, суммарная емкость ПИП, заполненного исследуемым веществом с диэлектрической проницаемостью ε , определится по формуле:

$$C = \varepsilon C_0 + C_0 + C_k.$$

Для измерения влажности материала в ограниченных объемах (мешки, тюки, защищенный грунт) удобно использовать щуповые цилиндрические и плоские (ножевые) ПИП. Такие устройства можно выполнить в диэлектрической трубе (рис. 1) или на диэлектрической полоске, которые составляют основу (каркас) ПИП. На таком каркасе можно закрепить электроды (пластины) конденсатора в виде колец или полосок, а также соединительные провода.

Поскольку ПИП подключается к измерительному устройству с помощью соединительных проводов, то измеряемые значения емкости будут определяться не только свойствами среды измерения, но и параметрами соединительной линии. Учитывая это, емкость ПИП необходимо определять по формуле [1]:

$$C = \frac{C_u}{1 + \omega^2 LC_u},$$

где C_u - емкость, определяемая материалом, заполнившим конденсатор;

L - индуктивность соединительных проводов;

$\omega = 2\pi f$ - рабочая круговая частота.

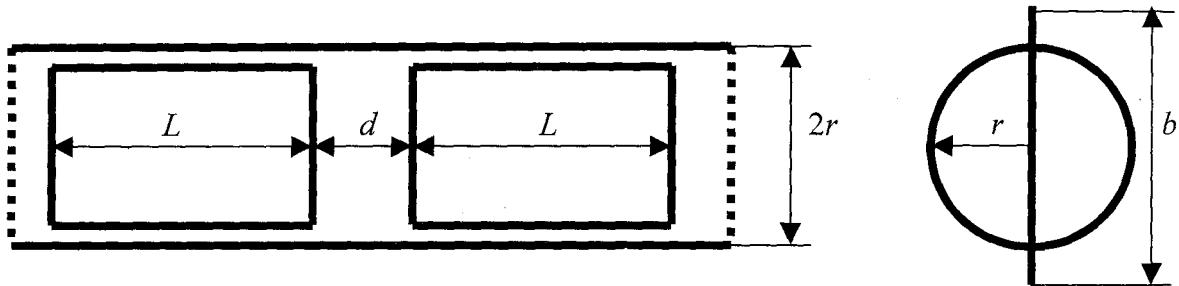


Рис. 1. Размещение пластин в щуповом ПИП.

Для уменьшения индуктивности соединительных проводов принимаются специальные меры. Например, каждый из проводников закручивается с общим, замкнутым накоротко витком дополнительного проводника. При этом увеличивается взаимная индуктивность двух рабочих проводников. Так как токи в соединительных рабочих проводниках направлены встречно, взаимоиндуктивность M вызывает уменьшение общей индуктивности L при допустимом увеличении паразитной емкости [1].

С учетом вышеизложенного, для расчета емкости щупового ПИП можно использовать формулу [2]:

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln \frac{d}{r} + \ln \frac{L}{d} - 0,31}, \quad (1)$$

где $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ - диэлектрическая проницаемость среды измерения;

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума;

ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость среды измерения;

L, r, d - длина, радиус сечения пластин и расстояние между пластинами конденсатора.

Формула (1) справедлива при $d \ll L$. При этом емкость щупового датчика не зависит от расстояния между пластинами d . Зависимость емкости от размеров L и r носит сложный характер, что обусловлено знаменателем формулы (1), который после преобразования примет вид:

$$\ln L - \ln r - 0,31. \quad (2)$$

Если $\ln L < \ln r + 0,31$, емкость цилиндрического конденсатора будет отрицательной и с уменьшением длины пластин будет уменьшаться. Если же $\ln L > \ln r + 0,31$, емкость конденсатора станет положительной и с увеличением L также будет уменьшаться. При равенстве $\ln L = \ln r + 0,31$ емкость, согласно выражению (1), будет стремиться к бесконечности.

Установим критические размеры конденсатора, при

которых изменяется знак функции (2).

$$\ln L_{кр} = \ln r + 0,31,$$

что соответствует

$$e^{\ln L_{кр}} = e^{(\ln r + 0,31)} = e^{\ln r} e^{0,31}.$$

Окончательно получим:

$$L_{кр} = r e^{0,31} \approx 1,36r. \quad (3)$$

Таким образом, чем ближе длина пластин к $L_{кр}$ при неизменном радиусе, тем больше емкость ПИП. В то же время величина емкости в сильной степени зависит от размеров L и r . Естественно желание иметь как можно меньших размеров щупы ПИП, но при этом и емкость уменьшается. Кроме того, необходимо учитывать и тот факт, что при малых размерах щупа влияние неоднородностей исследуемого материала и его засоренности будет сильнее ощущаться и приведет к искажению результатов измерения. Поэтому все размеры щупового ПИП должны быть значительно больше гранул исследуемого материала и его примесей.

Емкость щупового ПИП, рассчитанная по формуле (1) на ПЭВМ IBM-386, для различных значений L и r приведена на рис.2. На графиках представлена зависимость $C = f(L)$ при определенных заданных значениях r .

Щуповой ПИП также можно выполнить плоским, "ножевого" типа. При этом пластины конденсатора выполняются плоскими, прямоугольными, расположенными рядом на поверхности щупа (копланарными). К такому конденсатору можно перейти от цилиндрического диаметром $2r$, если сжать его по диаметру. При этом ширина пластины будет равна половине диаметра, а именно, $b = \pi r$. Длина пластин останется такой же, как и для цилиндрического конденсатора (L).

Расчет емкости такого конденсатора также можно осуществить по формуле (1), вместо радиуса r подставив $b = \pi r$ (ширину пластин). Результаты расчета имеют такой же характер, как и для случая цилиндрического конденсатора.

Экспериментальные исследования цилиндрического

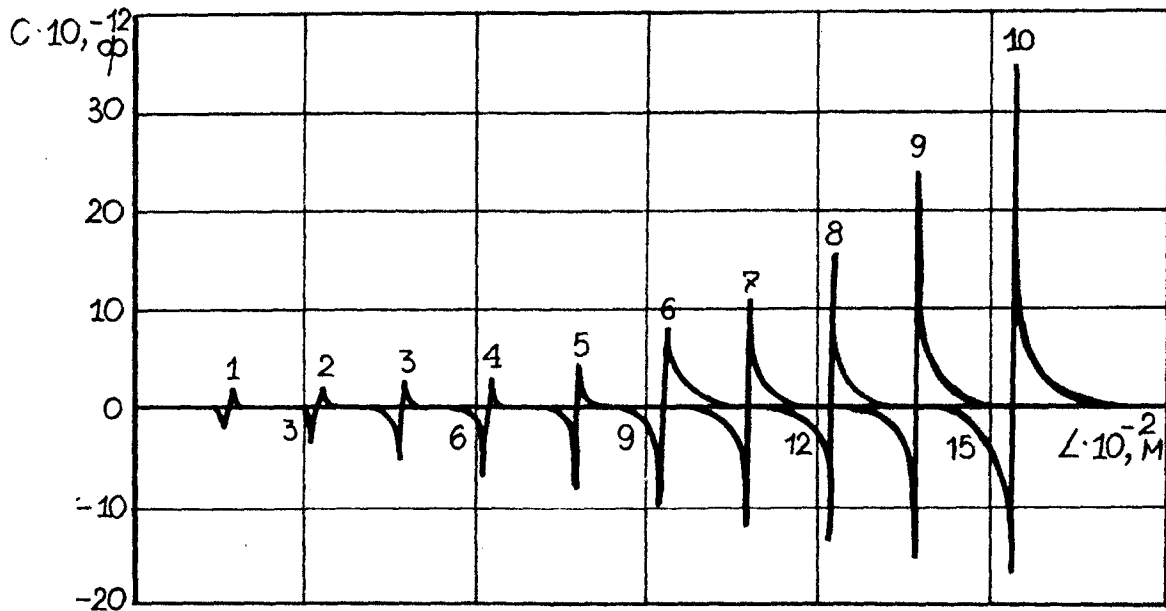


Рис. 2. Зависимость емкости ПИП от длины электродов при разных значениях радиуса:
1 - 1,1 см; 2 - 2,2 см; 3 - 3,3 см; 4 - 4,5 см; 5 - 5,6 см; 6 - 6,7 см; 7 - 7,8 см; 8 - 8,9 см; 9 - 10 см; 10 - 11,2 см.

конденсатора с фиксированным радиусом $r = 1,5$ см при переменной длине $0,5 \leq L(0,5) \leq 5$ см и расстоянии между пластинами $d = 0,5$ см подтвердили существование критических размеров, так как вблизи критической длины пластин $L_{кр} \approx 1,36r = 2,38$ см разброс показаний прибора от эксперимента к эксперименту увеличился.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Как следует из приведенных графиков (рис. 2), емкость ПИП в сильной степени зависит от его размеров, а именно, длины пластин конденсатора L и их радиуса r . Причем для каждого значения радиуса пластин есть своя критическая длина $L_{rh} \approx 1,36r$.

2. Если при постоянном радиусе r изменять длину пластин L , переходя через критическую, то емкость меняет знак. Такое явление можно объяснить тем, что в формировании электрического параллельного поля конденсатора участвуют активно только сравнительно близко расположенные участки пластин, ограниченные $L < L_{кр}$. Дальнейшее увеличение длины пластин, когда

$L > L_{кр}$ приводит, видимо, к появлению участков, формирующих в основном рассеянное электромагнитное поле, определяемое индуктивностью [3].

3. Возможности щуповых ПИП цилиндрической и плоской (ножевой) формы примерно одинаковы и зависимость емкости от размеров имеет примерно одинаковый характер.

4. Щуповой ПИП малых размеров, например, с радиусом $r = 0,5$ см, приводит к уменьшению критической длины $L_{кр}$. При таком малом конденсаторе емкость его получается тоже незначительной, в пределах нескольких пикофард.

5. Значительное увеличение длины пластин относительно их диаметра, то есть при $L \gg L_{кр}$ особых выгод не сулит, так как емкость ПИП при этом растет медленно.

6. Нежелательно изготовление пластин конденсатора с длиной близкой к критической, так как незначительные ошибки в изготовлении и неквалифицированное применение приведет к большому разбросу результатов измерения.

7. Увеличение радиуса пластин до $r = 10$ см позволит при длине пластин меньше критической ($L < 10$ см) получить значение емкости ПИП до сотни пикофард. Однако размеры такого ПИП получаются значительными, что требует большей пробы материала.

Литература

1. Берлинер М.А. Измерение влажности. М.: Энергия, 1973. 400с.
2. Мойк И.Б., Ротов Н.А., Горбунов А.В. Термо- и влагометрия пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1988. 241с.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 438с.