

На графіках може бути декілька точок перегину. Відстань, на якій знаходиться “друга точка перегину” показує початок чутливого елемента. Коли графік температурного перебігу термоперетворювача не має “другої точки перегину”, можливо, що відстань від чутливого елемента до початку захисної трубки є меншою, ніж 1 мм (дискретність встановлення глибини занурення).

Коли різниця між температурами на сусідніх позиціях є меншою від 1 К, то це означає, що термічним способом знайдено закінчення чутливого елемента.

Виконаний аналіз показав, що термічним способом можливо встановити геометричні розміри чутливого елемента з похибкою не більшою, ніж $\pm 1\%$, що є достатнім для встановлення розмірів мініатюрних калібраторів температури на основі реперних матеріалів.

1. Датчики для измерения температуры в промышленности. Самсонов Г.В., Киц А.И., Кюздени О.А., и др.– К., 1972. 2. Приборы для измерения температуры контактным способом. Под ред. Бычковского. – Львов, 1978. 3. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры.– К., 1983. 4. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. – М., 1986. 5. Бернгард Ф., Богун Д.,

Августин С., Маммен Х., Донин А. Применение самокалибрирующихся термометров с реперными материалами при температурах 500–650°C в парогенераторах. // Вимірювальна техніка та метрологія. – №63. – 2003. – С.55–59. 6. Стадник Б., Дорожовець М., Бернгард Ф., Кулик О. Корекція похибок вимірювання термометра із вбудованим реперним калібратором і вторинним температурним сенсором. // Вимірювальна техніка та метрологія.– №63. – 2003. – С.70–74. 7. Прохоренко С., Стадник Б., Ватурський Я. Попередні результати апробації температурного репера на базі In–Ga–Sn евтектики.– // Вимірювальна техніка та метрологія. – №63. – 2003. – С.28–30. 8. Іванова Е.П., Іванов Ю.А., Йогельсон Г.Л., Косенко О.А., Назаренко Л.А. Багатоканальний калібратор ТС–400 для градування контактних датчиків температури. Тези доповіді 8-ої міжнародної конф. “Температура–2003”. – Львів: Ліга-прес.–2003.– С.69. 9. Устройство для поверки термоэлектрических преобразователей. – А.С.1415082(СССР). А.А. Саченко, В.Ю. Мильченко, И.П. Куритный, В.В. Кочан.–Опубл.Б.И., 1988, №29. 10. Ronsin H., Elgonrdon, M. Extension of the minicell thermocouple calibration technique to the palladium fixed point/ Tempako–96.–Levrotto–Bella, Torino/–1996/ – p.189–194. 11. Lehman H., Bernhard F. Self–calibration thermocouples/ Tempako–96.–Levrotto–Bella, Torino. – 1996.–p.195–206. 12. Электрические измерения незлектрических величин. Под ред. П.В. Новицкого.– Л., 1975.

УДК 621.317

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЄМНІСНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ВНУТРІШНІМ ЕЛЕКТРОДОМ СКЛАДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

© Івах Роман, 2006

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Розглянуто основні вимоги до ємнісних первинних перетворювачів. Запропонована методика розрахунку ємності та провідності циліндричного ємнісного первинного перетворювача із внутрішнім електродом складної конструкції.

Рассмотрены основные требования к емкостным первичным преобразователям. Предложена методика расчета емкости и проводимости цилиндрического емкостного первичного преобразователя с внутренним электродом сложной конструкции.

The main requirements to capacitive primary converters are reviewed. The technique of calculation of capacitance and conductivity of the cylindrical capacitive primary converter with an internal welding rod of a composite design is offered.

Вступ. Ємнісним називають перетворювач у вигляді конденсатора, ємність якого залежить від вимірюваної неелектричної величини. Ємність кон-

денсатора визначається його конструктивними параметрами та діелектричною проникністю середовища між обкладинками конденсатора. Найпошире-

ніші перетворювачі з плоскими та циліндричними електродами. Значною перевагою ємнісних перетворювачів є те, що конструкцію (форму) конденсатора легко можна пристосувати до широкого кола вимірювальних задач, що дає можливість за допомогою однієї вимірювальної схеми виконувати різноманітні вимірювання неелектричних величин.

Основною перевагою ємнісних методів вимірювання порівняно з подібними методами є те, що конденсатори можна виготовити з достатньо великою точністю та малими втратами; відповідно, конденсатор може бути майже ідеальним порівняно з катушкою індуктивності, коефіцієнт добротності якої завжди обмежений порівняно малою величиною.

Ємнісні первинні перетворювачі (ЄПП) дуже часто працюють в області слабких електромагнітних полів. Для таких випадків діелектричне середовище достатньо характеризувати двома параметрами: діелектричною проникністю та кутом діелектричних втрат.

У ємнісних первинних перетворювачах, які використовуються для дількометричних засобів вимірювання, під час дії неелектричної величини ємність змінюється завдяки зміні діелектричної проникності.

Перетворювачі зі зміною діелектричної проникності середовища між електродами застосовують для вимірювання рівня рідин (мазуту, палива, води, кислот) та сипких матеріалів (порошкоподібних харчових продуктів, зерна, піску, цементу, вугільної пилюки тощо), вологості твердих, рідких та сипких матеріалів, товщини ізоляційних матеріалів та інших неелектричних величин, які пов'язані з діелектричною проникністю відповідними функціональними залежностями.

Вимоги до ємнісних первинних перетворювачів

Властивості, які повинен мати кожен первинний перетворювач (ПП), щоб відповідати своєму призначенню, доволі різноманітні. Розглянемо найважливіші і особливу увагу звернемо на те, як вони виражені у ЄПП порівняно з іншими типами ПП.

Однозначність залежності між вхідною та вихідною величинами, без гістерезису. Ця властивість зумовлена суто конструктивними та технологічними характеристиками і не пов'язана з принципом дії ПП, так що така вимога може бути добре виконаною у більшості ПП: вона не повністю виконується у перетворювачів, дія яких ґрунтується на зміні властивостей твердого діелектрика (наприклад, залежність від температури), де інколи з'являється гістерезис.

Зручна форма залежності між вхідною та вихідною величинами, бажано лінійна. Ємнісні первинні перетворювачі дають змогу реалізувати не тільки лінійні, а й будь-які інші залежності, а саме гіперболічні, експоненціальні, логарифмічні, степеневі тощо.

Чутливість ЄПП важко порівнювати з чутливістю ПП інших типів, оскільки її можна визначити для кожного окремого типу перетворювача індивідуально. За звичайних умов чутливість ЄПП приблизно дорівнює чутливості імпедансних сенсорів (порівнюючи, наприклад, мікрометри, побудовані за різноманітними принципами). Що стосується величини вихідного сигналу, то вона становить близько декілька мілівольт до вольта, однак можна досягти і декілька вольт.

Стабільність характеристик в часі також залежить від типу перетворювача: у повітряних конденсаторів вона задовільна, деякі діелектрики нестабільні.

Однонапрявленість дії: навантаження вихідного кола не повинно давати ніякого впливу на вимірювану неелектричну величину. В ЄПП ця умова виконується ідеально.

Мале значення сталої часу: більшість типів ЄПП дають змогу одержати меншу сталу часу порівняно з іншими перетворювачами; кращими у цьому розумінні є тільки фотоелектричні та радіаційні ПП. Стала часу механічних ПП залежить від їхніх механічних властивостей. Вимірювальна апаратура може відстежувати процеси, які тривають частки мікросекунд.

Найменший вплив зовнішніх чинників на характеристики. Температура, положення, вібрація тощо мають вплив, що можна врахувати під час конструювання. Тільки перетворювачі, принцип дії яких ґрунтується на зміні діелектричної сталої різних матеріалів, бувають чутливими до впливу температури.

Стійкість до хімічних, атмосферних та інших впливів також є властивістю конструкції, і ніяк не обмежена принципом дії ПП.

Простота та технологічність конструкції. З цього погляду ЄПП є ідеальними якраз для конструювання та виробництва: переважну більшість перетворювачів можна виготовити на звичайних верстатах, як правило, токарних. Легким є і складання ЄПП зі звичайних механічних деталей.

Можлива взаємозамінність окремих зразків, точність зазвичай значно вища від тієї, яка вимагається; тим вони позитивно відрізняються від аналогічних індуктивних ПП або ПП опору.

Простота монтажу та експлуатації. ЄПП, як правило, можуть виготовлятися як звичайні деталі

типу арматури, механічних калібраторів тощо, так що вони не становлять собою ніякого нового надзвичайного елемента.

Легко може бути задоволена вимога не використовувати дефіцитних матеріалів або речовин, шкідливих для здоров'я людей, тварин або для довкілля.

Отже, з вищенаписаного можна зробити висновок, що ємнісні первинні перетворювачі добре задовольняють переважній більшості вимог.

Мета роботи. Для вимірювання діелектричних параметрів сипких матеріалів, наприклад, вологості [1], можуть використовуватися різноманітні конструкції ЄПП, які забезпечують мінімальний вплив неповноти заповнення вимірювальної камери сипким матеріалом на результат вимірювання ємності та підвищують чутливість ЄПП. Серед них:

- ЄПП циліндричної форми з внутрішнім електродом увігнутої форми (рис. 1, а);
- ЄПП циліндричної форми з внутрішнім електродом опуклої форми (рис. 1, б);

Як видно з рис. 1, форма зовнішнього електрода є циліндричною, оскільки це зручно, наприклад, для портативних вологомірів сипких матеріалів. Форма внутрішнього електрода є увігнутою або опуклою. Ступінь увігнутості та опуклості внутрішніх електродів буде визначатися поліноміальною залежністю певного порядку:

$$y = f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (1)$$

$a_n \neq 0, n \geq 1$

Основною вимогою, яку ставлять до первинних перетворювачів вологомірів сипких матеріалів, є вимога відтворюваності чинників, які впливають на результати вимірювання. У зв'язку з цим у деяких первинних перетворювачах передбачаються додаткові пристрої, призначені для створення однакових умов підготовки або введення проби досліджуваного СМ у вимірювальну камеру, оскільки правильний відбір проби – найважливіша умова об'єктивної оцінки посівних якостей насіння. Недбалість або помилка у її відборі позбавляє змісту всі подальші аналізи, якщо вони виконані навіть з надзвичайною точністю.

Крім того, до конструкції ПП ставлять і інші вимоги, наприклад: невелика вага (особливо в переносних вологомірах), високий опір ізоляції, який повинен бути в кілька разів вищим від максимального опору матеріалу між електродами. Остання вимога зумовлює необхідність ретельного очищення і спостереження за станом ізоляції під час експлуатації, особливо якщо можливе забруднення або зволоження ізоляції досліджуваним матеріалом.

Дослідження запропонованих конструкцій ЄПП (рис. 1, а, б) передбачає встановлення залежності ємності первинного перетворювача від геометричних параметрів перетворювача та діелектричної проникності. Для цього запропонована методика розрахунку ЄПП нестандартної конструкції.

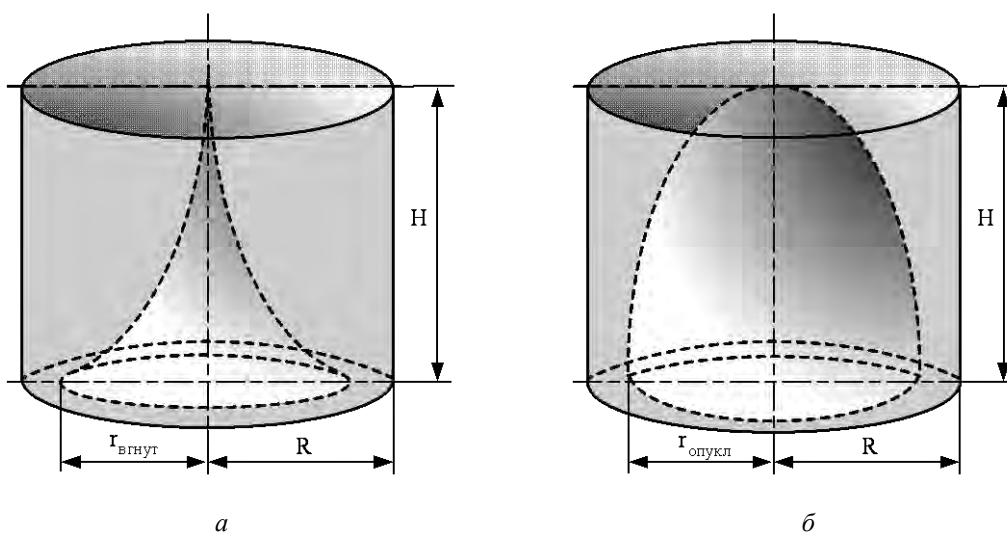


Рис. 1. Конструкції циліндричних ЄПП:
 а) із увігнутим внутрішнім електродом;
 б) з опуклим внутрішнім електродом

Методика розрахунку ЄПП нестандартної конструкції

Методика визначення ємності ЄПП. Методика визначення ємності ЄПП така: внутрішній та зовнішній електроди зобразимо у вигляді циліндрів однакової нескінченно малої висоти dy (рис. 2), тоді ємність dC між зовнішнім циліндром радіуса R та внутрішнім циліндром радіуса x , визначаємо так:

$$dC = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{cm} \frac{dy}{\ln \frac{R}{x}}. \quad (2)$$

Підсумувавши усі ці ємності dC , отримаємо сумарну ємність ЄПП:

$$C = \int_0^H 2\pi\epsilon_0\epsilon_{cm} \frac{dy}{\ln \left(\frac{R}{x}\right)}, \quad (3)$$

де H – висота електродів, ϵ_0 – діелектрична стала, ϵ_{cm} – діелектрична проникність сипкого матеріалу, R – радіус зовнішнього циліндричного електрода, x – радіус основи внутрішнього електрода, значення якого змінюється зі зміною висоти.

Отож, необхідно знайти залежність зміни радіуса основи внутрішнього електрода від висоти. Для цього розглянемо запропоновані форми внутрішніх електродів у декартовій системі координат (рис. 3).

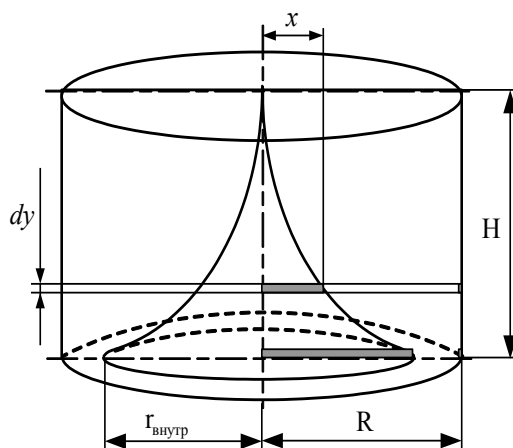


Рис. 2. До методики визначення ємності первинного перетворювача нестандартної конструкції

Як видно з рис. 3, якщо $x = r_{внутр}$ (рис. 3, а) або $x = r_{опукл}$ (рис. 3, б) висота електрода y дорівнює нулю, відповідно, якщо $x = r_{внутр} = r_{опукл} = 0$ висота внутрішнього електрода становить H , то залежність $y = f(x)$, яка задана поліноміальною залежністю (1), знайти неважко, але нам необхідно визначити залежність $x = f(y)$, де x, y – поточні координати радіуса та висоти внутрішнього електрода відповідно.

У табл. 1 та 2 наведено математичні залежності $y = f(x)$ та $x = f(y)$ для довільного порядку полінома.

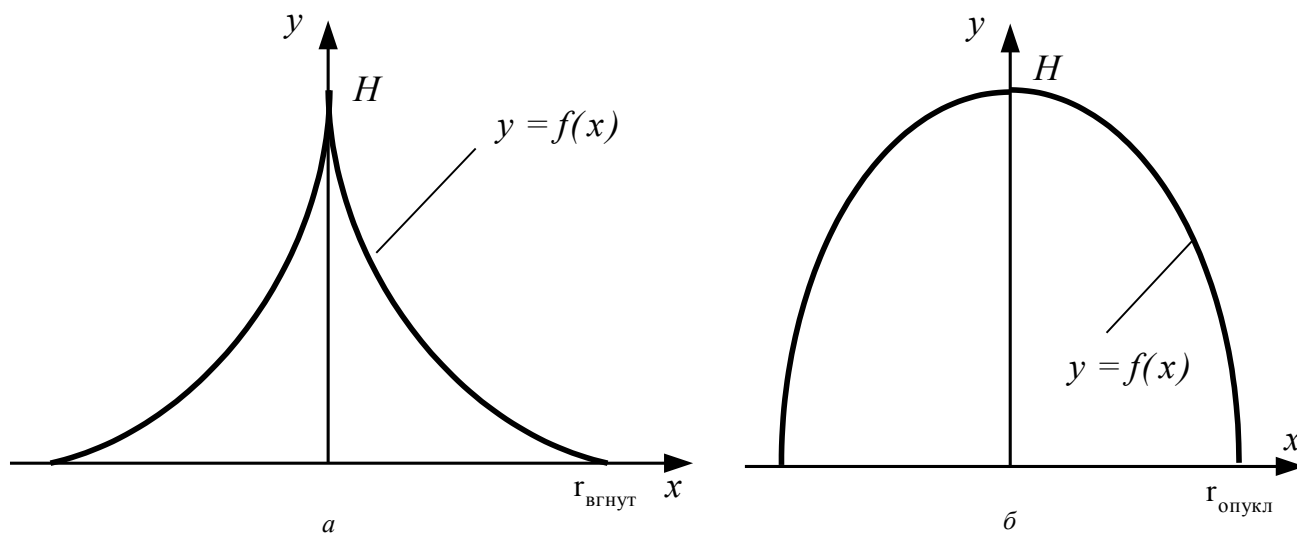


Рис. 3. Внутрішні електроди конструкцій ЄПП в декартовій системі координат:
а) увігнутої форми, б) опуклої форми

Таблиця 1

Математичні вирази для визначення поточного радіуса внутрішнього електрода увігнутої форми

Порядок полінома	$y = f(x)$	$x = f(y)$
1	$y = -\frac{H}{r_{\text{вгнут}}}x + H$	$x = r_{\text{вгнут}} \left(1 - \frac{y}{H}\right)$
2	$y = \frac{H}{r_{\text{вгнут}}^2}x^2 - \frac{2H}{r_{\text{вгнут}}}x + H$	$x = r_{\text{вгнут}} \left(1 - \sqrt{\frac{y}{H}}\right)$
3	$y = -\frac{H}{r_{\text{вгнут}}^3}x^3 + \frac{3H}{r_{\text{вгнут}}^2}x^2 - \frac{3H}{r_{\text{вгнут}}}x + H$	$x = r_{\text{вгнут}} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{y}{H}}\right)$
4	$y = \frac{H}{r_{\text{вгнут}}^4}x^4 - \frac{4H}{r_{\text{вгнут}}^3}x^3 + \frac{6H}{r_{\text{вгнут}}^2}x^2 - \frac{4H}{r_{\text{вгнут}}}x + H$	$x = r_{\text{вгнут}} \left(1 - \sqrt[4]{\frac{y}{H}}\right)$

Таблиця 2

Математичні вирази для визначення поточного радіуса внутрішнього електрода опуклої форми

Порядок полінома	$y = f(x)$	$x = f(y)$
1	$y = -\frac{H}{r_{\text{опукл}}}x + H$	$x = r_{\text{опукл}} \left(1 - \frac{y}{H}\right)$
2	$y = -\frac{H}{r_{\text{опукл}}^2}x^2 + H$	$x = r_{\text{опукл}} \left(\sqrt{1 - \frac{y}{H}}\right)$
3	$y = -\frac{H}{r_{\text{опукл}}^3}x^3 + H$	$x = r_{\text{опукл}} \left(\sqrt[3]{1 - \frac{y}{H}}\right)$
4	$y = -\frac{H}{r_{\text{опукл}}^4}x^4 + H$	$x = r_{\text{опукл}} \left(\sqrt[4]{1 - \frac{y}{H}}\right)$
.....		
n	$y = -\frac{H}{r_{\text{опукл}}^n}x^n + H$	$x = r_{\text{опукл}} \left(\sqrt[n]{1 - \frac{y}{H}}\right)$

Отже, як видно з табл. 1, значення поточного радіуса внутрішнього електрода увігнутої форми з радіусом основи $r_{\text{вгнут}}$ та висотою H можна визначити за формулою:

$$x = r_{\text{вгнут}} \left(1 - \sqrt[n]{\frac{y}{H}}\right) \quad (4)$$

Відповідно з табл. 2 значення поточного радіуса внутрішнього електрода опуклої форми з радіусом основи $r_{\text{опукл}}$ та висотою H обчислюють за такою формулою:

$$x = r_{\text{опукл}} \left(\sqrt[n]{1 - \frac{y}{H}}\right) \quad (5)$$

У (4) та (5) n – порядок полінома, яким визначається відповідно ступінь увігнутості або опуклості внутрішнього електрода.

Отже, з урахуванням (3), (4) та (5) ємність ЄПП циліндричної форми з увігнутим внутрішнім електродом визначається за формулою:

$$C_{\text{вгнут}} = C_0 + \int_0^H 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{см}} \frac{dx}{\ln \left(\frac{R}{r_{\text{вгнут}} \left(1 - \sqrt[n]{\frac{x}{H}} \right)} \right)}, \quad (6)$$

відповідно ємність ЄПП циліндричної форми з опуклим внутрішнім електродом знаходять за формулою:

$$C_{\text{опукл}} = C_0 + \int_0^H 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{см}} \frac{dx}{\ln \left(\frac{R}{r_{\text{опукл}} \left(\sqrt[n]{1 - \frac{x}{H}} \right)} \right)}. \quad (7)$$

У (6) та (7) $r_{\text{вгнут}}$ і $r_{\text{опукл}}$ – радіуси основ відповідно увігнутого та опуклого внутрішніх електродів, H – висота ЄПП, R – радіус зовнішнього циліндричного електрода, C_0 – конструктивна ємність, оскільки в реальних конструкціях ЄПП для забезпечення механічної міцності та зменшення відносного переміщення електроди фіксують за допомогою прокладок, шайб тощо. Наявність таких конструктивних елементів, а також виводів провідників для під'єднання перетворювача до вимірювальної схеми, призводить до того, що перетворювач має так звану конструктивну складову ємності.

Методика визначення провідності ЄПП. Методика визначення провідності аналогічна до методики визначення ємності ЄПП. Згідно з [2, ст. 6] провідність коаксіального циліндра становить:

$$G = \frac{I}{U} = \frac{2\pi\gamma H}{\ln \frac{R}{r}},$$

де γ – питома провідність матеріалу, що міститься в міжелектродному просторі; H – висота ЄПП,

R – радіус зовнішнього циліндричного електрода, r – радіус внутрішнього циліндричного електрода.

Для порівняння ємностей коаксіального циліндра становить:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon H}{\ln \frac{R}{r}}.$$

Отже, провідність ЄПП циліндричної форми з увігнутим внутрішнім електродом знаходять за формулою:

$$G_{\text{вгнут}} = G_0 + \int_0^H 2\pi\gamma \frac{dx}{\ln \left(\frac{R}{r_{\text{вгнут}} \left(1 - \sqrt[n]{\frac{x}{H}} \right)} \right)},$$

відповідно провідність ЄПП циліндричної форми з опуклим внутрішнім електродом визначають за формулою:

$$G_{\text{опукл}} = G_0 + \int_0^H 2\pi\gamma \frac{dx}{\ln \left(\frac{R}{r_{\text{опукл}} \left(\sqrt[n]{1 - \frac{x}{H}} \right)} \right)}.$$

Отже, використовуючи запропоновану методику розрахунку ємнісного первинного перетворювача, автором були встановлені поліноміальні залежності для розрахунку ємності та провідності ЄПП. Отримані залежності можна використовувати для дослідження, наприклад, чутливості ЄПП відносно діелектричної проникності, впливу висоти заповнення міжелектродного простору сипким матеріалом на результат вимірювання тощо.

1. Івах Р., Дорожовець М., Питель І. Систематизація методів вимірювання вологості сипких матеріалів // Вимірювальна техніка і метрологія № 62, 2003, С. 97–101.
2. Тареев Б.М., Короткова Н.В., Петров В.М., Преображенский А.А. Электрорадиоматериалы: Учеб. пособие для студентов вузов / Под ред. Тареева Б.М. – М., 1978.