

DOI 10.26886/2311-4517.5(90)2023.4

УДК: 621.385.69

НВЧ СЕНСОР ВОЛОГОСТІ ГАЗУ

Йосип Йосипович Білінський, професор

<http://orcid.org/0000-0002-9659-7221>

e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com

Віталій Валерійович Красносельський, аспірант

<http://orcid.org/0009-0007-4929-6147>

e-mail: wommerses@gmail.com

Марина Олегівна Скалецька, аспірантка

<http://orcid.org/0009-0003-4872-4884>

e-mail: maryna.skaletska@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна

Стаття присвячена методам вимірювання вологості в різних типах матеріалів та середовищ за допомогою надвисокочастотних радіохвиль. Розглянуті різні підходи до вимірювання вологості, включаючи методи вільного простору, резонаторні методи та хвилеводні методи. Зазначено переваги використання вологомірів на надвисокочастотних радіохвилях, такі як безконтактність вимірювань та висока чутливість. Детально описано принципи роботи різних методів та їхнє практичне застосування. Також звертається увага на обмеження і труднощі в застосуванні деяких методів, особливо в контексті вимірювань твердих матеріалів і рідин.

Ключові слова: вологість, високочастотні радіохвилі, вологомір, методи вимірювання, діелектричні властивості, безконтактні вимірювання.

Y. Bilinskiy, Professor; V. Krasnoselskiy, Graduate student; M. Skaletska, Graduate student; Microwave gas humidity sensor / Vinnytsia National Technical University, Ukraine, Vinnitsa.

The article is devoted to methods of measuring humidity in various types of materials and environments using ultrahigh-frequency radio waves. Various approaches to moisture measurement are reviewed, including free-space methods, cavity methods, and waveguide methods. The advantages of using hygrometers on ultra-high-frequency radio waves, such as non-contact measurements and high sensitivity, are indicated. The working principles of various methods and their practical application are described in detail. Attention is also drawn to limitations and difficulties in the application of some methods, especially in the context of measurements of solid materials and liquids.

Key words: humidity, high-frequency radio waves, hygrometer, measurement methods, dielectric properties, non-contact measurements.

Вступ. Вимірювання вологості твердих матеріалів, рідин та газів на НВЧ є різновидом діелькометричного методу, в якому зміни діелектричних властивостей матеріалу оцінюються за його взаємодією з радіохвилями дециметрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів. Вимірювання властивостей діелектриків на полях надвисокої частоти виконуються вже з початку ХХ ст. (метод Друде); деякі методи (хвилеводні, з двопровідними та коаксіальними лініями) використовувалися і в дослідженнях впливу вологості діелектриків на їх електричні властивості. Однак перехід від лабораторних установок до вологомірів НВЧ промислового призначення відноситься до 50-х років, коли з'явилися вологоміри, засновані на вимірюваннях у вільному просторі; одним з перших був розроблений в СРСР вологомір для деревини [1,10].

В останньому десятилітті застосування вологомірів НВЧ у різних галузях науки та техніки безперервно зростає. Найважливішими перевагами вологомірів НВЧ є можливість безконтактних вимірювань (у вільному просторі), висока чутливість, необмежена верхня межа вимірювань, малий вплив на результати вимірювань хімічного складу матеріалу і деяких інших факторів [2].

При проходженні радіохвиль НВЧ через вологий матеріал відбуваються поглинання та розсіювання енергії електромагнітних хвиль частинками речовини (вологи та сухого скелета). Для отримання інформації про властивості речовини можна використовувати параметри випромінювання, що проходить або відбивається. При цьому конструкція та схема вимірювального пристрою визначаються прийнятим способом локалізації поля НВЧ у досліджуваному матеріалі.

Можна запропонувати таку класифікацію НВЧ методів вимірювання вологості:

1. Методи вільного простору; а) з використанням хвилі, що проходить; б) з використанням відбитої хвилі. В обох модифікаціях вимірюваною характеристикою можуть бути згасання (модуль коефіцієнта передачі або коефіцієнта відображення), зміна амплітуди або фази хвилі.

2. Резонаторні методи.

3. Хвилеводні методи.

Відомі й деякі інші методи, що знайшли дуже обмежене практичне застосування. До них відносяться методи зондові, поверхневої хвилі, обертання площини поляризації.

Вологоміри, засновані на вимірювання у вільному просторі згасання або фазового зсуву хвилі, що проходить, знайшли найбільше практичне застосування. Досліджуваний матеріал

міститься між передавальною та приймальною антенами при нормальному падінні хвилі. На практиці зазвичай використовуються рупорні антени, хоча можливе застосування спрямованих випромінювачів та інших типів, наприклад, діелектричних стрижневих антен.

Резонаторний та хвилеводний методи у своїх модифікаціях, що застосовуються для дослідження діелектриків [3,11], вимагають введення досліджуваного матеріалу в порожнину хвилеводу або резонатора, тобто накладають обмеження на розміри зразка і, по суті, не є безконтактними в механічному сенсі. У той же час локалізація поля в порожнині підвищує чутливість вологоміра і створює можливість вимірювання при низьких вмістах вологи і малої масі зразка.

Хвилеводні методи засновані на впливі діелектричних властивостей матеріалу, введеного в хвилевід, на характеристики, що визначають поширення радіохвиль НВЧ у хвилеводі. Як і раніше розглянутих методах, вимірюються комплексні коефіцієнти передачі й відбиття, їх модулі чи фазові кути; вимірювання виконуються за допомогою хвилі, що проходить або відбитої.

Поширені хвилеводні способи вимірювання ϵ' і ϵ'' діелектриків (методи короткого замикання та холостого ходу, варіації товщини зразка, «нескінченного» шару та інші) знайшли застосування в багатьох лабораторних дослідженнях залежностей діелектричних параметрів різних матеріалів від їх волого-вмісту [4,5]. Застосування цих методів у вологомірах нераціонально, а в автоматичних вологомірах неможливо. Даний тип має меншу чутливість, ніж резонаторні. Основною перешкодою для застосування хвилеводного методу у виробничих умовах є труднощі, пов'язані з введенням

матеріалів (особливо твердих) у хвилевід і пристосуванням досліджуваних зразків до розмірів хвилеводу.

Внаслідок цього хвилеводні вологоміри досі знайшли обмежене застосування в тих випадках, коли зазначені труднощі переборні. У першу чергу це стосується рідких діелектриків — нафти та її фракцій, для яких була розроблена методика вимірювання вмісту вологи, починаючи з дуже коротких довжин хвиль, що знаходяться в сантиметровому і міліметровому діапазонах [5].

Результати дослідження

Залежності, що пов'язують зміну амплітуди $\Delta\alpha$ або фазовий зсув хвилі з параметрами діелектрика, можна вивести з хвильового рівняння для нормального поширення плоскої - синусоїдальної хвилі. При ідеалізації, що відповідає наближенню геометричної оптики (без урахування явищ відображення та дифракції), введення плоскопаралельного шару діелектрика товщиною L між джерелом та приймачем випромінювання НВЧ викликає зміну параметрів біжучої хвилі [2,6]:

$$\Delta\alpha = \ln \frac{E(0)}{E(L)} = \int_0^L \alpha dl; \quad (1.1)$$

$$\Delta\varphi = \int_0^L \left[\beta(l) - \frac{2\pi}{\lambda} \right] dl, \quad (1.2)$$

де l - координата за напрямом поширення хвилі; $E(0)$ і $E(L)$ — напруженість поля для $l = 0$ і $l = L$; α, β — коефіцієнт загасання і фазова постійна, тобто уявна та дійсна складові хвильового числа: $\beta + j\alpha = \gamma$.

З формул (1.1) і (1.2) видно, що це дає інтегральну (усереднену) оцінку властивостей матеріалу на шляху хвилі. Для реальних

матеріалів характерний нерівномірний розподіл вологи. У цих матеріалах закон зміни електричних параметрів координати l , як правило, невідомий.

Вихідною величиною НВЧ перетворювачів вологості служить фазовий зсув $\Delta\varphi$ або ослаблення (загасання) A в децибелах, що вноситься матеріалом (сумарний ефект поглинання та відображення):

$$A = \frac{10 \lg P_0}{P}, \quad (1.3)$$

де P_0 і P - потужності падаючого та минулого випромінювання.

Величини $\Delta\varphi$ та A практично вимірюють відносно газу, тобто щодо значень, що відповідають відсутності матеріалу між антенами.

Прийmemo тепер спрощене припущення про однорідність досліджуваного матеріалу, що визначає незалежність від координати l речовинної та уявної складових ϵ' і ϵ'' його комплексної діелектричної проникності. У цих умовах вирази (1.1) і (1.2) набувають вигляду:

$$\Delta\alpha = \alpha L; \quad (1.4)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda(\beta - 1)}. \quad (1.5)$$

Використаємо відомі співвідношення між коефіцієнтом загасання, фазової постійної та параметрами середовища: ϵ' ; $\text{tg } \delta - \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ і магнітною проникністю μ :

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon' \mu}{2(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)}}; \quad (1.6)$$

$$\beta = 2\pi/\lambda \sqrt{\frac{\epsilon' \mu}{2(1+\sqrt{1+\tan^2 \delta})}} \quad (1.7)$$

Враховуючи, що $A = 10 \lg[\exp(\alpha L)]$, отримуємо:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{\epsilon' \mu}{2(1+\sqrt{1+\tan^2 \delta})}} - 1 \right]; \quad (1.8)$$

$$A = 19,30 \frac{L}{\lambda} \sqrt{\epsilon' \mu \sqrt{1 + \tan^2 \delta}} - 1. \quad (1.9)$$

Формули (1.8) і (1.9) описують зв'язок між вихідними величинами перетворювача вологоміра та електричними параметрами матеріалу. Через припущення, прийняті при їх виведенні, вони є наближеними і не можуть використовуватися, наприклад, для градування вологомірів. У той же час вони показують, що результат вимірювання вологоміром НВЧ (як по загасанню, так і по фазовому зсуву) залежить не тільки від ϵ' , а й від ϵ'' матеріалу, знехтувати впливом втрат можна лише за умови $\tan^2 \delta \ll 1$.

Відомо, що вода поглинає НВЧ сигнали, що може призводити до значного зниження амплітуди сигналу. У НВЧ діапазоні частот вода має резонансні частоти, при яких вона поглинає електромагнітні хвилі з найбільшою ефективністю.

Перші дослідження розрахунків поглинання водяної пари та кисню можна знайти у Ван Флека, разом із фізичною основою та експериментальними результатами, що призводять до вдосконалення розрахунків ширини лінії, включаючи роботи, описані у Ван Флек Вейскопф (1945) і Rosenkranz (1993) [8]. Основними джерелами мікрохвильового поглинання та випромінювання атмосфери є водяна

пара, кисень і рідка вода. В діапазоні частот 20 – 200 ГГц, поглинання мікрохвиль водною парою виникає на 22,235 ГГц і на 183,3 ГГц. Поглинання парою походить від високочастотних резонансів, які збільшуються до інфрачервоної області [7-9]. На рисунку 1 показана загальна крива поглинання водяної пари в залежності від робочої частоти в мікрохвильовому спектрі.

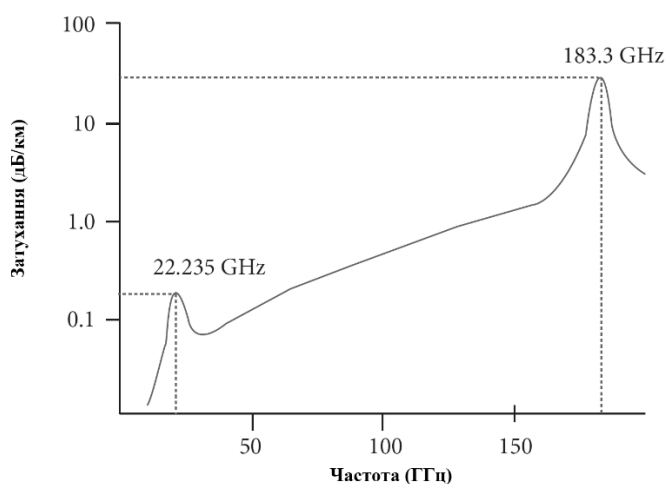


Рисунок 1. Коефіцієнт поглинання водяної пари в НВЧ діапазоні

На рисунку 2 показана узагальнена блок-схема НВЧ сенсора вологості газу.

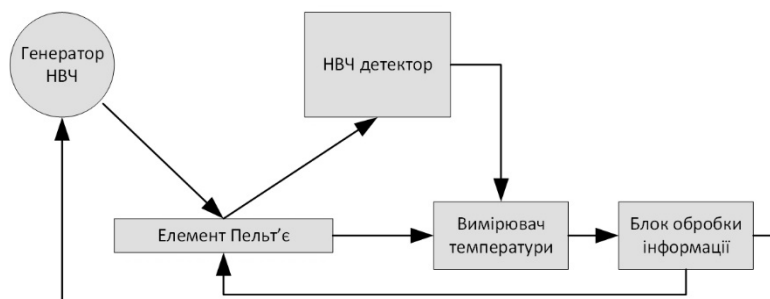


Рисунок 2. Блок-схема НВЧ сенсора

Запропонована схема для виявлення наявності вологи базується на використанні генератора НВЧ з різними робочими частотами, аналізі змін амплітуди відбитих сигналів від поверхні елемента Пельт'є та вимірюванні температури цієї поверхні. Основні кроки такої схеми можна детальніше описати так:

Генератор НВЧ, який може працювати на двох різних робочих частотах: 183.3 ГГц та 150 ГГц. Ці частоти обрані таким чином, щоб одна була чутливою до води, а інша - нечутливою. Генератор створює НВЧ сигнали, які випромінюються і направляються на елемент Пельт'є. Ці сигнали відбиваються від поверхні цього елемента. Проходячи через вологу, частоти НВЧ сигналів можуть зазнавати поглинання, розсіювання та інших змін. Чутливість частоти 183.3 ГГц до води зумовлює зміни в амплітуді відбитого сигналу. Відбите випромінювання реєструється детектором НВЧ. Амплітуда цих сигналів вимірюється. Елемент Пельт'є використовується для охолодження відбивної поверхні. Під час охолодження елемента Пельт'є реєструється температура відбивної поверхні. Це може бути здійснено за допомогою температурних датчиків. При досягненні температури точки роси відбувається зміна амплітуди відбитого НВЧ сигналу 183.3 ГГц. Ця зміна реєструється детектором НВЧ і передається на блок обробки інформації. Блок обробки інформації аналізує зміни амплітуди сигналів, що відбилися від елемента Пельт'є, при різних робочих частотах. Якщо виявляється різка зміна амплітуди, це може вказувати на досягнення точки роси та, отже, на наявність вологи.

Ця детальна схема дозволяє виявляти наявність вологи шляхом аналізу змін амплітуди відбитих НВЧ сигналів під час охолодження відбивної поверхні до температури точки роси.

Таким чином амплітуда сигналу може слугувати параметром порівняння. Різниця у впливі води на сигнали різних частот дозволяє використовувати диференційний метод для ефективного визначення наявності вологи в газі. При цьому зміна сигналу визначається:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } A_1 \gg A_2 \\ 0, \text{ якщо } A_1 = A_2 \end{cases} \quad (1.10)$$

де ΔA – зміна амплітуди сигналу.

Для більш точного вимірювання вологості газів використовується НВЧ прилад, який розроблений з урахуванням властивостей поглинання водяної пари в цьому діапазоні.

PIN-діод можна використовувати для виявлення змін НВЧ (надвисокочастотних) сигналів, особливо якщо ці зміни відбуваються на великих частотах, наприклад, у мікрохвильовому діапазоні частот.

Основними перевагами використання PIN-діода для детекції НВЧ сигналів включає: PIN-діоди мають високу швидкодію, що дозволяє їм виявляти швидкозмінні НВЧ сигнали; вони можуть бути дуже чутливими до слабких НВЧ сигналів, що дозволяє виявляти сигнали з низькою потужністю.

Принцип роботи полягає в тому, що коли НВЧ сигнал впадає на PIN-діод, він генерує надвисокочастотний струм в діоді через фотодіодний ефект. Цей струм може бути виміряний і використаний для виявлення та аналізу НВЧ сигналів.

Для використання PIN-діода для детекції НВЧ сигналів, необхідно враховувати деякі ключові аспекти: PIN-діоди мають бути належним чином поляризовані, зазвичай в режимі зворотного зміщення, щоб досягнути оптимальної діодної детекції; вибір PIN-діода повинен враховувати частотний діапазон НВЧ сигналів, який ви плануєте виявляти; для мінімізації інтерференції і шуму важливо

застосовувати екранування та електромагнітну сумісність; отриманий струм з PIN-діода може бути оброблений за допомогою відповідних електронних ланцюгів для подальшого аналізу чи використання.

PIN-діоди є корисними складовими для реалізації приймачів та детекторів НВЧ сигналів у багатьох застосуваннях, і їх використання може бути оптимальним у відповідності до конкретних вимог та характеристик системи.

Висновки.

НВЧ вимірювання вологості газу має ряд переваг. НВЧ вимірювачі вологості газу можуть швидко виміряти вміст вологи в газах у режимі реального часу. НВЧ метод вимірювання вологості газу має високу точність і надійність. НВЧ вимірювачі вологості газу не впливають на вимірюваний об'єкт і не вимагають контактних елементів. НВЧ вимірювачі вологості газу не містять частин, що рухаються, що забезпечує їх довговічність і надійність в експлуатації. НВЧ вимірювачі вологості газу можуть працювати в умовах високих температур та тисків, що розширює їх застосування. НВЧ вимірювачі вологості газу можуть використовуватися для вимірювання вмісту вологи в різних газах, включаючи агресивні та корозійно-активні гази. НВЧ вимірювачі вологості газу не вимагають частого обслуговування та калібрування, що зменшує витрати на обслуговування.

Література:

1. Недзвецкнй Ю. Э. (1957). *Авторское свидетельство № 107977. «Бюллетень изобретений»*, № 9.
2. Голант В. Е. (1968). *Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы*. М.: Наука, 328 с.
3. Брандт А. А. (1963). *Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах*. М., Физматгиз.

4. Bosisio R. G. and oth. (1970). *Paper sheet moisture measurements by microwave phase perturbation techniques.*— *JI Microwave Power*, № 1.
5. Демьянов А. А. (1971). *Измерение в миллиметровом диапазоне длин волн содержания воды в нефти.*— «*Измерительная техника*», № 8.
6. Saxton J. A. (1987). *Electrical properties of water.* *Wireless Engineer*, 1049, № 312.
7. Liebe H. J., Layton D. H. (1987). *Millimeter wave properties of the atmosphere: laboratory studies and propagation modeling.* (TR-87-224). NTIA Technical Report.
8. van Vleck J. H. (1947a) *The absorption of microwaves by uncondensed water vapor.* *Physical Review* 71(7):425-433. doi: 10.1103/PhysRev.71.425
9. Ware R, Carpenter R, Güldner J, Liljegren J, Nehrkorn T, Solheim F, Vandenberghe F (2003) *A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid.* *Radio Sci* 38(4):8079. doi: 10.1029/2002RS002856
10. Й. Й. Білинський, В. В. Онушко. (2014). *Метод і оптико-електронний засіб вимірювального вимірювання вологості природного газу*, Вінниця: ВНТУ, с. 132.
11. М. Н. Мухитдинов, Э. С Мусаев. (1986). *Оптические методы и устройства контроля влажности*, Энергоатомиздат, с. 96.

References:

1. Nedzvetskny Yu. E. (1957). Author's certificate No. 107977. "Bulletin invented", No. 9.
2. Golant V. E. (1968). *Ultra-high-frequency plasma research methods.* М.: Nauka, 328 p.

3. Brandt A. A. (1963). Research of dielectrics at ultrahigh frequencies. M., Physmatgiz.
4. Bosisio R. G. and oth. (1970). Paper sheet moisture measurements by microwave phase perturbation techniques.— JI Microwave Power, No. 1.
5. A. A. Demyanov (1971). Measurement of water content in oil in the millimeter range of wavelengths. — "Measuring Techniques", No. 8.
6. Saxton J. A. (1987). Electrical properties of water. Wireless Engineer, 1049, No. 312.
7. Liebe H. J., Layton D. H. (1987). Millimeter wave properties of the atmosphere: laboratory studies and propagation modeling. (TR-87-224). NTIA Technical Report.
8. van Vleck JH (1947a) The absorption of microwaves by uncondensed water vapor. Physical Review 71(7):425-433. doi: 10.1103/PhysRev.71.425
9. Ware R, Carpenter R, Güldner J, Liljegren J, Nehr Korn T, Solheim F, Vandenberghe F (2003) A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. Radio Sci 38(4):8079. doi: 10.1029/2002RS002856
10. Y. Y. Bilinskyi, V. V. Onushko. (2014). Method and optical-electronic measuring tool for natural gas humidity measurement, Vinnytsia: VNTU, p. 132.
11. M.N. Mukhitdinov, E. S. Musaev. (1986). Optical methods and humidity control devices, Energoatomizdat, p. 96.