

## НВЧ СЕНСОР ВОЛОГОСТІ ГАЗУ

Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*В роботі запропоновано НВЧ сенсор вологості газу на основі методу точки роси.*

**Ключові слова:** природний газ, вологість, НВЧ.

### *Abstract*

*The paper proposes a microwave gas humidity sensor based on the dew point method*

**Keywords:** natural gas, humidity, microwave.

### Вступ

Вимірювання вологості твердих матеріалів, рідин та газів на НВЧ є різновидом дієлькометричного 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 прийнятним 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 вимірюваннях 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  $\epsilon'$  і  $\epsilon''$  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 минулої 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  $l = L$ ;  $\alpha, \beta$  — коефіцієнт загасання і фазова постійна, тобто уявна та речовинна складові хвильового числа:  $\beta + j\alpha = \gamma$ .

З формул (1.1) і (1.2) видно, що аналізований метод дає інтегральну (усереднену) оцінку властивостей матеріалу на шляху хвилі. Це важлива перевага, тому що для реальних матеріалів характерний нерівномірний розподіл вологи. У цих матеріалів закон зміни електричних параметрів координати  $l$ , як правило, невідомий.

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

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

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

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

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

Використовуємо відомі співвідношення між коефіцієнтом загасання, фазової постійної та параметрами середовища:  $\epsilon''$ ;  $tg \delta = \epsilon''/\epsilon'$  і магнітної проникністю  $\mu$ :

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

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

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

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

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

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  $\epsilon'$ , а й від  $\epsilon''$  матеріалу, знехтувати впливом втрат можна лише за умови  $tg^2 \delta \ll 1$ .

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). Основними джерелами мікрохвильового поглинання та випромінювання атмосфери є водяна пара, кисень і рідка вода. В діапазоні частот 20 – 200 ГГц, поглинання мікрохвильовою 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.

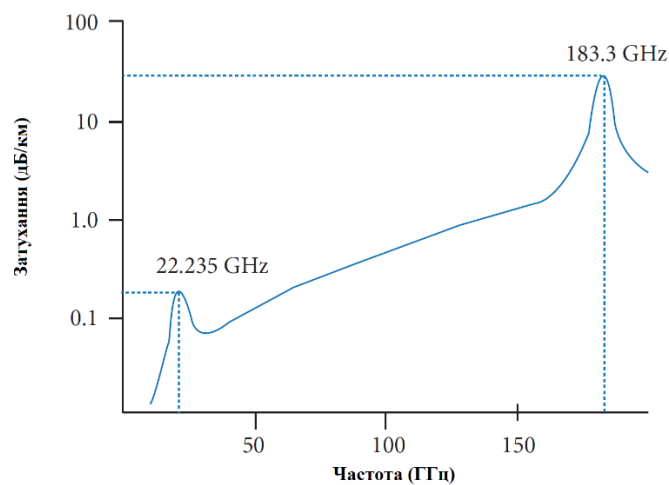


Рисунок 1. Коефіцієнт поглинання водяної пари в НВЧ діапазоні

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

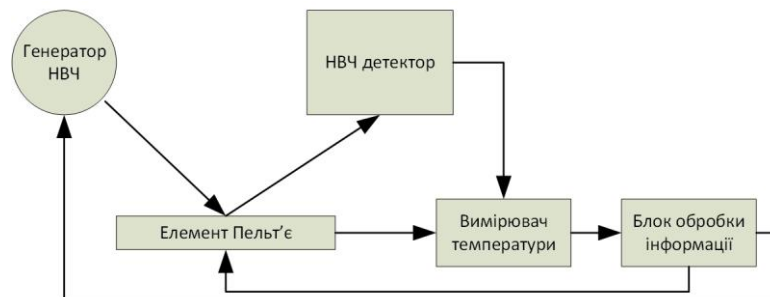


Рисунок 2. Блок-схема НВЧ сенсора

Генератор НВЧ, який має дві робочі частоти (чутлива до води 183.3 ГГц та нечутлива 150 ГГц). Випромінювання відбивається від поверхні елемента Пельт'є та реєструється детектором НВЧ. Елемент Пельт'є охолоджує відбивну поверхню, при цьому вимірюється температура цієї поверхні. При досягненні температури точки роси, амплітуда сигналу НВЧ різко змінюється та реєструється на детекторі, який в свою чергу дає команду реєстрації температури роси та зупиняє подальше охолодження відбивної поверхні. Отримана інформація передається на блок обробки інформації.

Таким чином амплітуда сигналу може слугувати параметром порівняння. При цьому зміна сигналу визначається:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta A > 0 \\ 0, & \text{якщо } \Delta A = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

де  $\Delta A$  – зміна амплітуди сигналу.

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

### 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.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Недзвецкий Ю. Э. Авторское свидетельство № 107977. «Бюллетень изобретений», 1957, № 9.
2. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М., «Наука», 1968.
3. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1963.
4. Bosisio R. G. and oth. Paper sheet moisture measurements by microwave phase perturbation techniques.— *JI Microwave Power*, 1970, № 1.
5. Демьянов А. А. Измерение в миллиметровом диапазоне длин волн содержания воды в нефти.— «Измерительная техника», 1971, № 8.
6. Saxton J. A. Electrical properties of water. *Wireless Engineer*, 1049, № 312.
7. Liebe HJ, Layton DH (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. Й. Й. Білінський, В. В. Онушко, Метод і оптико-електронний засіб вимірювального вимірювання вологості природного газу, Вінниця : ВНТУ, с. 132 2014.
11. М. Н. Мухитдинов, Э. С Мусаев, Оптические методы и устройства контроля влажности, Энергоатомиздат, с. 96, 1986

*Йосип Йосипович Білінський – доктор техн.наук, проф. кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com*

*Віталій Валерійович Красносельський – аспірант кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: wommerses@gmail.com*

*Bilynsky Yosyp Y. — Doctor of Technical Sciences, Prof. Department of Physics, Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia; Email: yosyp.bilynsky@gmail.com*

*Vitalii Krasnosielskyi – postgraduate the Department of Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: wommerses@gmail.com*