



УДК 621.311.25

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-19

**ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК СМУГОВОГО НЕСИМЕТРИЧНОГО
СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ****Граняк Валерій Федорович**, к.т.н., доцент**Кожушко Олександр Вікторович**, бакалавр 3-го року навчання, інженерно-технологічного факультету
Вінницький національний аграрний університет**Valerii Hraniak**, Ph.D. of Eng., Associate Professor**Olexander Kozhushko**, Bachelor of the 3rd year of study, Faculty of Engineering and Technology
Vinnytsia National Agrarian University

В роботі проведено оцінювання методичної складової похибки, що виникає при вимірюванні вологості гетерогенних дисперсних діелектриків смуговим несиметричним сенсором.

В процесі оцінювання було показано, що найбільш значуща складова методичної похибки виникає за рахунок зміни температури та частоти інформаційної хвилі. Залежними від температури величинами, що входять до математичної моделі смугового несиметричного сенсора вологості є: відносна діелектрична проникність діелектрику підложки та об'єкта контролю, довжина і ширина центрального провідника, товщина діелектрика підложки. Залежними від частоти інформаційної хвилі є діелектрична проникність діелектрику об'єкта контролю, а також даний параметр безпосередньо входить до коефіцієнтів рівняння перетворення сенсора.

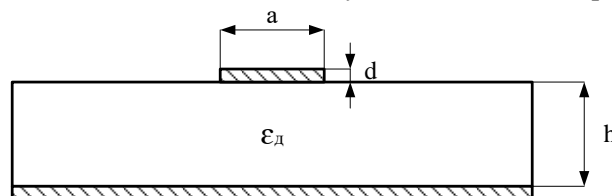
За результатами проведених досліджень було показано, що в процесі вимірювального перетворення вологості в смуговому несиметричному сенсорі має місце методична складова похибки, пов'язана з зміною температури та нестабільністю частоти інформаційної хвилі. Для забезпечення частотної похибки на рівні, що не перевищує 0,5 %, похибка нестабільності частоти інформаційної хвилі при перетворення вологості у вихідну амплітуду інформаційної хвилі не повинна перевищувати ± 3 кГц, що забезпечується існуючими ВЧ генераторами. Температурну складову похибки доцільно вилучити застосувавши метод поправок.

Також було удосконалено математичну модель смугового несиметричного вимірювального перетворення вологості гетерогенних дисперсних діелектриків в високочастотній області, яка відрізняється тим, що враховує параметри температури навколишнього середовища та дозволяє вилучити з результатів вимірювання температурну складову похибки.

Ключові слова: смуговий несиметричний сенсор, вологість, температурна похибка, методична похибка, частотна похибка, затухання.

Ф. 22. Рис. 7. Літ. 74.**1. Вступ**

У відповідності до результатів, наведених у [1], перспективним для здійснення оперативного вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків, а також побудови системах контролю та автоматичного керування технологічними процесами є амплітудний метод вимірювання, що реалізується на базі смугового несиметричного сенсора вологості, будова якого наведена на рис. 1. Суть зазначеного методу полягає у пропусканні через смуговий несиметричний хвилевід, на поверхні якого розміщений досліджуваний зразок, високочастотного інформаційного сигналу, з подальшим вимірюванням зміни його амплітуди на виході сенсора.

**Рис. 1. Поперечний переріз смугового несиметричного сенсора вологості**

Варто відзначити, що до класу гетерогенних дисперсних діелектриків може бути віднесено значний номенклатурний ряд продукції, що випускається переробними АПК (вершкове масло, маргарин, серед тощо), до якого, у відповідності з законом України «Про безпечність та якість харчових продуктів», висуваються підвищені вимоги щодо якості. А так як похибка сенсора вологості, що може використовуватися при побудові систем технічного контролю та автоматичного керування



технологічними лініями виробництва на пряму впливає на показники якості кінцевої продукції, то є очевидним, що оцінювання та пошук шляхів зменшення методичної складової останньої є актуальною науково-прикладною задачею [2].

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Функціональна залежність вихідної напруги від вологості зразка має вигляд [1]:

$$U_{\text{вих}} = \frac{B_1 - B_2 \cdot W}{B_3 - B_4 \cdot W} \quad (1)$$

де W – вологість зразка; $B_1 - B_4$ – постійні для конкретного сенсора коефіцієнти, що визначаються з наступних співвідношень:

$$B_1 = U_{\text{вх}} \cdot F_3 \cdot F_1 \cdot 2\mu \cdot H, \quad (2)$$

$$B_2 = U_{\text{вх}} \cdot F_4 \cdot 2\mu \cdot H, \quad (3)$$

$$B_3 = F_3 \cdot 2\mu \cdot H, \quad (4)$$

$$B_4 = \left(\frac{2,23 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{l^5 \cdot \rho_{\text{мід}} \cdot \pi \cdot f^3} \cdot \ln\left(\frac{C_2 h}{2d}\right)}{8,44 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right) \cdot c \cdot \sqrt{d \cdot a}} \right) \times \left(\frac{\varepsilon_0}{2\mu} + \frac{\varepsilon_0}{2\mu H} \right) \cdot F_2 \cdot (H-1) + 2\mu H \cdot F_3. \quad (5)$$

$$H = \sqrt{1 + 10 \frac{h}{a}}, \quad (6) \quad C_2 = \left[\left(1 - 1,41 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cdot r_A - 1 \right] \cdot \left[\left(1 - 1,41 \sqrt{\frac{d}{h}} \right) \cdot r_B - 1 \right], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_3}{2} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_3}{2H}, \quad (8)$$

$$F_2 = 2\rho_{\text{в}} \varepsilon_{\text{в}} + 2\rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}} \varepsilon_{\text{ж}} - \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{в}} - 2\rho_{\text{ж}}, \quad (9)$$

$$F_3 = 100\rho_{\text{в}} \varepsilon_{\text{в}} + 200\rho_{\text{ж}}, \quad (10)$$

де f – частота інформативної хвилі; μ – відносна магнітна проникність середовища; l – довжина центрального провідника смугового несиметричного сенсора; R – поверхневий опір матеріалу смугового хвилеводу; $\varepsilon_{\text{в}}, \varepsilon_{\text{ж}}$ – відповідно, відносна діелектрична проникність води та жиру; $\rho_{\text{в}}, \rho_{\text{ж}}$ – відповідно, густина води та молочного жиру; h – відстань між струмонесучим (центральною) провідником та заземленою пластиною; a – ширина центрального провідника; r_A, r_B – корені трансцендентного рівняння; d – товщина струмонесучого (центрального) провідника; c – швидкість поширення світла у вакуумі.

Для оцінювання впливу неврахованих у моделі (1) впливних величин на інформативний параметр амплітуди вихідної інформативної хвилі, доцільно провести оцінювання складових методичної похибки, серед яких в першу чергу варто розглянути залежність модуля відносної діелектричної проникності зразка від температури та частоти інформаційної хвилі.

Залежними від температури величинами, що входять до математичної моделі смугового несиметричного сенсора вологості (1) є: відносна діелектрична проникність діелектрику підложки та об'єкта контролю, довжина і ширина центрального провідника, товщина діелектрика підложки.

Зміна значення відносної діелектричної проникності при зміні температури гітенаксу, що використовувався у якості матеріалу підложки смугового несиметричного сенсора у роботі [1], в інтервалі зміни температури $20 \pm 15^\circ \text{C}$ описується фактично лінійним законом, а температурний коефіцієнт діелектричної проникності даного матеріалу наближено дорівнює $180 \text{ град/}^\circ \text{C}$ [3, 4]. Коефіцієнт теплового розширення міді становить $16,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$ [3, 4]. Оскільки гітенакс являється шаруватим пресованим матеріалом, що має паперову основу, просоченою епоксидною або фенольною смолами [3, 4], тобто має пористу природу, то його розширенням при нагріванні в вказаних межах можна знехтувати.

Залежними від частоти інформативної хвилі є діелектрична проникність діелектрику об'єкта контролю, а також даний параметр безпосередньо входить до коефіцієнтів рівняння (1). Залежність коефіцієнта діелектричної проникності гітенаксу від частоти в околі точки 300 МГц , яку, як показано у [1] доцільно використовувати у якості частоти інформативної хвилі, має фактично лінійний характер, а частотний коефіцієнт діелектричної проникності приблизно дорівнює $200 \text{ кГц/}^\circ \text{C}$ [3, 4].

3. Виклад основного матеріалу

Виходячи з наведених вище суджень, математична модель залежності вихідної амплітуди від вологості об'єкта контролю з урахуванням неінформативних параметрів матиме вигляд:



$$U_{\text{вих}}(W, \Delta T, \Delta f) = \frac{B_1(\Delta T, \Delta f) - B_2(\Delta T, \Delta f) \cdot W}{B_3(\Delta T, \Delta f) - B_4(\Delta T, \Delta f) \cdot W}, \quad (11)$$

де $B_1(\Delta T, \Delta f) - B_4(\Delta T, \Delta f)$ – залежні від зміни температури та частоти інформативної хвилі коефіцієнти, що розраховуються наступним чином:

$$B_1(\Delta T, \Delta f) = U_{\text{вх}} \cdot F_3(\Delta T, \Delta f) \cdot 2\mu \cdot H(\Delta T), \quad (12)$$

$$B_2(\Delta T, \Delta f) = U_{\text{вх}} \cdot F_2(\Delta T, \Delta f) \cdot 2\mu \cdot H(\Delta T), \quad (13)$$

$$B_3(\Delta T, \Delta f) = F_3(\Delta T, \Delta f) \cdot 2\mu \cdot H(\Delta T), \quad (14)$$

$$B_4(\Delta T, \Delta f) = \left[\frac{2,23 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{(l + l\alpha_m \Delta T)^5 \cdot \rho_{\text{міо}} \cdot \pi \cdot (f + \Delta f)^3} \times \ln \left(\frac{C_2 h}{2(d + d\alpha_m \Delta T)} \right)}{8,44 \cdot h \cdot \ln \left(\frac{r_B}{r_A} \right) \cdot c \times \sqrt{(d + d\alpha_m \Delta T) \cdot (a + a\alpha_m \Delta T)}} \right] \times \left(\frac{\varepsilon_0 + k_{T0} \Delta T - k_{f0} \Delta f}{2\mu} + \frac{\varepsilon_0 + k_{T0} \Delta T - k_{f0} \Delta f}{2\mu H(\Delta T)} \right) \cdot F_1(\Delta T, \Delta f) \cdot (H(\Delta T) - 1) + 2\mu H(\Delta T) \cdot F_3(\Delta T, \Delta f). \quad (15)$$

Виходячи з залежності впливу неінформативних параметрів на значення вихідної амплітуди інформативної хвилі, встановленого залежністю (11), було оцінено вплив неінформативного параметру зміни температури на вихідну амплітуду інформативної хвилі та досліджено зміну температурної систематичної похибки.

$$\frac{\partial(U_{\text{вих}})}{\partial(\Delta T)} = \frac{\partial \left(\frac{B_1(\Delta T, \Delta f) - B_2(\Delta T, \Delta f) \cdot W}{B_3(\Delta T, \Delta f) - B_4(\Delta T, \Delta f) \cdot W} \right)}{\partial(\Delta T)}, \quad (16)$$

$$\Delta U_{\text{вих} \pm T}(W, \Delta T) = U_{\text{вих} \pm T}(W, \Delta T) - U_{\text{вих} \pm T}(W, 0), \quad (17)$$

де $U_{\text{вих} \pm T}(W, \Delta T)$, $U_{\text{вих} \pm T}(W, 0)$ – вихідна амплітуда інформативної хвилі після і до зміни температури.

Результати моделювання залежності частинної похідної вихідної амплітуди інформативної хвилі за зміною температури (16) і абсолютної температурної похибки вихідної амплітуди інформативної хвилі (17) представлено на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

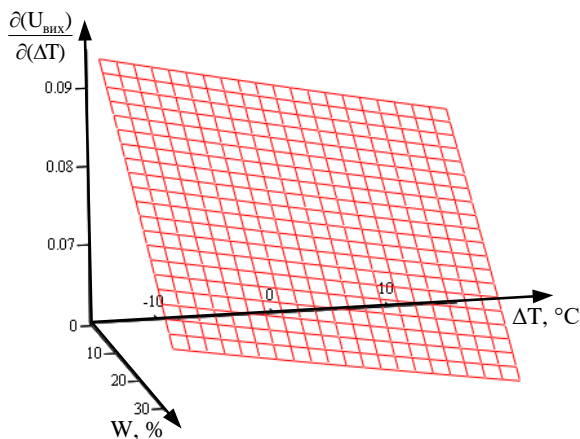


Рис. 2. Залежність часткової похідної вихідної амплітуди від зміни температури

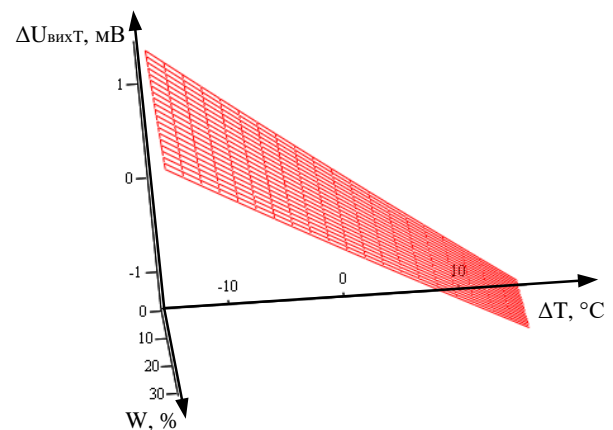


Рис. 3. Залежність відхилення вихідної амплітуди від зміни температури

Значення першої похідної (Рис. 2) не має точок екстремуму на усьому діапазоні зміни температури, що свідчить про монотонний характер залежності температурної систематичної похибки. Перша похідна функції при постійних значеннях вологості лінійно залежить від зміни температури, що свідчить про залежність математичної моделі (11) від зміни температури по функції, що є близькою до кривої другого порядку [5].

Залежність абсолютної похибки (рис. 3) від температури має характер, що збігається з висновками, отриманими з рис. 2. Крутизна нахилу залежності зменшується по мірі збільшення вологості, що обумовлено меншим температурним коефіцієнтом діелектричної проникності води у



порівнянні з температурним коефіцієнтом діелектричної проникності жиру та повною мірою підтверджує теоретичні висновки, зроблені раніше.

Відповідно до цього оцінено відносну похибку зміни вихідної амплітуди для зазначених неінформативних збурень [6]:

$$\sigma_{\Delta U}(W, \Delta T) = \frac{|U_{вихзT}(W, \Delta T) - U_{вихзT}(W, 0)|}{U_{вихзT}(W, 0)} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Результати моделювання математичної залежності (18) представлено на рис. 4.

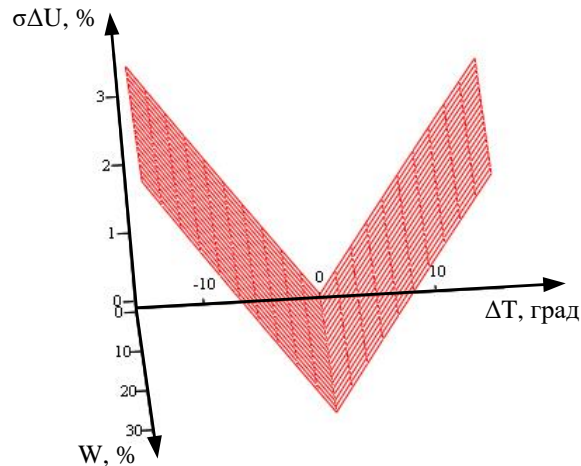


Рис. 4. Відносна похибка відхилення вихідної амплітуди від зміни температури

Відносна похибка (рис. 3) математичної моделі при зміні температури в зазначених межах не перевищує 3,5 % та практично не залежить від вологості зразка, що обумовлюється відносно невеликою зміною амплітуди вихідної напруги при зміні вологості об'єкта контролю.

В результаті виконання ряду перетворень, отримано математичну модель затухання амплітуди інформативної хвилі з урахуванням температурної корекції:

$$U_{вих} = \frac{B_1(\Delta T) - B_2(\Delta T) \cdot W}{B_3(\Delta T) - B_4(\Delta T) \cdot W}, \quad (19)$$

Також оцінено і методичну похибку від нестабільності частоти генератора інформативної хвилі:

$$\frac{\partial(U_{вих})}{\partial(\Delta T)} = \frac{\partial\left(\frac{B_1(\Delta T, \Delta f) - B_2(\Delta T, \Delta f) \cdot W}{B_3(\Delta T, \Delta f) - B_4(\Delta T, \Delta f) \cdot W}\right)}{\partial(\Delta T)}, \quad (20)$$

$$\Delta U_{вихf}(W, \Delta f) = U_{вихf}(W, \Delta f) - U_{вихf}(W, 0), \quad (21)$$

де $U_{вихf}(W, \Delta f), U_{вихf}(W, 0)$ – вихідна амплітуда інформативної хвилі після і до зміни частоти інформативної хвилі.

Результати моделювання математичних залежностей (20) та (21) представлено на рис. 5 та рис. 6 відповідно. Значення першої похідної (рис. 5) не має точок екстремуму на усьому діапазоні зміни частоти інформативної хвилі, що свідчить про монотонний характер залежності частотної систематичної похибки. Перша похідна функції при постійних значеннях вологості лінійно залежить від зміни температури, що вказує на не лінійність залежності математичної моделі (11) від зміни частоти інформативної хвилі [5].

Характер залежності абсолютної похибки (рис. 6) від зміни частоти підтверджує висновки, зроблені під час аналізу рис. 5. Крутизна нахилу лінійної залежності зменшується по мірі збільшення вологості, що обумовлено меншим частотним коефіцієнтом діелектричної проникності води у порівнянні з частотним коефіцієнтом діелектричної проникності жиру.

Для абсолютного відхилення вихідної амплітуди інформативної хвилі оцінено відносну систематичну похибку від зміни частоти колювання інформативного сигналу [6]:

$$\sigma_{\Delta U}(W, \Delta f) = \frac{|U_{вихf}(W, \Delta f) - U_{вихf}(W, 0)|}{U_{вихf}(W, 0)} \cdot 100\%. \quad (22)$$

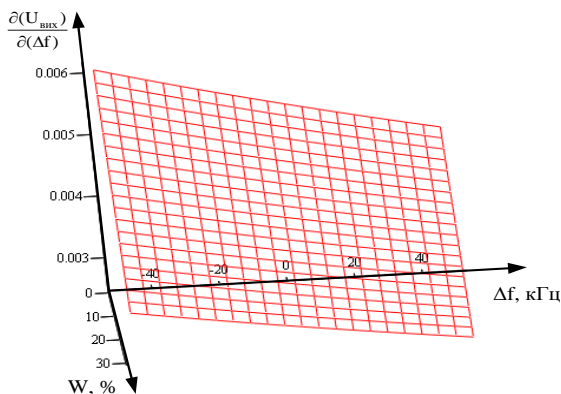
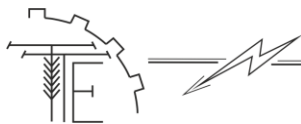


Рис. 5. Залежність часткової похідної вихідної амплітуди від зміни частоти

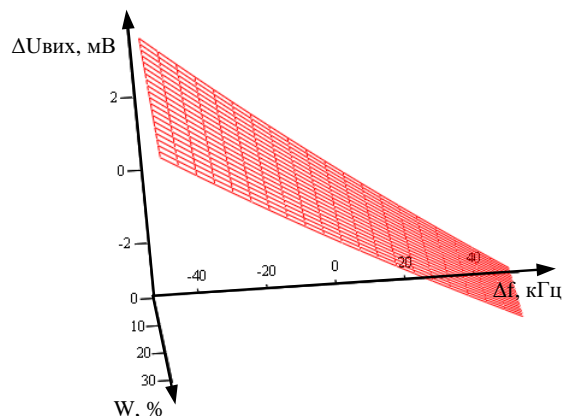


Рис. 6. Залежність відхилення вихідної амплітуди від зміни частоти

Для встановлення характеру зміни відносної похибки вихідної амплітуди від зміни частоти інформативної хвилі було побудовано її графічну залежність. Результати моделювання виразу (22) представлено на рис. 7.

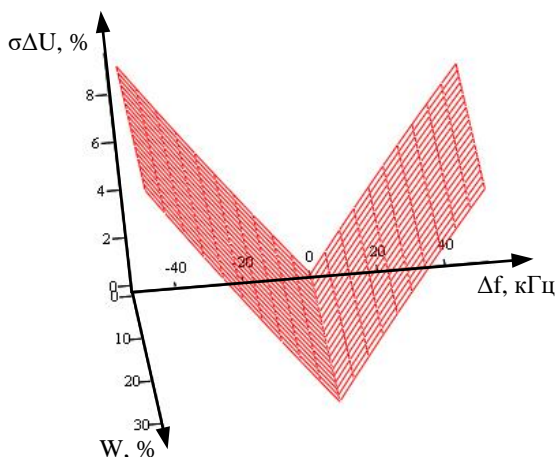


Рис. 7. Відносна похибка відхилення вихідної амплітуди від зміни частоти

Відносна систематична частотна похибка (рис. 7) при зміні частоти інформативної хвилі в зазначених межах не перевищує 9 % та фактично не залежить від вологості зразка, що обумовлено відносно невеликою зміною амплітуди вихідної напруги при зміні вологості об'єкта контролю. При чому, для забезпечення відносної похибки моделі на рівні 0,05 % у заданому діапазоні абсолютна похибка встановлення частоти не повинна перевищувати ± 300 Гц, що забезпечується сучасними високочастотними генераторами [7].

5. Висновки

1. Оцінено функції впливу неінформативних параметрів на вихідну амплітуду інформативної хвилі. Показано, що в процесі вимірювального перетворення вологості в смуговому несиметричному сенсорі має місце методична складова похибки, пов'язана з зміною температури та нестабільністю частоти інформативної хвилі. Для забезпечення частотної похибки на рівні, що не перевищує 0,5 %, похибка нестабільності частоти інформаційної хвилі при перетворення вологості у вихідну амплітуду інформативної хвилі не повинна перевищувати ± 3 кГц, що забезпечується існуючими ВЧ генераторами. Температурну складову похибки доцільно вилучити застосувавши метод поправок.

2. Удосконалено математичну модель смугового несиметричного вимірювального перетворення вологості гетерогенних дисперсних діелектриків в високочастотній області, яка відрізняється тим, що враховує параметри температури навколишнього середовища та дозволяє вилучити з результатів вимірювання температурну складову похибки.

Список використаних джерел

1. Kuharchuk V., Graniak V. Phase-amplitude method for measuring humidity content of heterogenetic disperse dielectric. *Метрологія та прилади*. 2013. №4 С. 3 – 8.



2. Граняк В. Ф., Кухарчук В. В. Високочастотні методи та засоби вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків. Монографія. Вінниця: ВНТУ. Вінниця, 2015. 184 с.
3. Бовсуновський А. П. Електротехнічні матеріали. Короткий довідник. Київ: НУХТ, 2012. 36 с.
4. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Температурный коэффициент-диэлектрическая проницаемость. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id115428p1.html>
5. Сенчук Ю. Ф. Математический анализ для инженеров. Часть 2. Учебное пособие. Харьков: НТУ ХПИ, 2006. 376 с.
6. Клименко Л. П., Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Євдокимов В. Д. Метрологія, стандартизація та управління якістю. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. 243 с.
7. Яненко О. П., Перегудов С. М., Шевченко К. Л. Радиометричні НВЧ методи та засоби вимірювання фізичних величин. Навчальний посібник. Київ : КП ім. Ігоря Сікорського, 2021. 352 с.

References

- [1] Kuharchuk, V. Graniak, V. (2013). Phase-amplitude method for measuring humidity content of heterogenetic disperse dielectric. *Metrology and devices*. 4. 3–8. [in English].
- [2] Granyak, V.F., Kukharchuk, V.V. (2015). *High-frequency methods and means of measuring humidity control of heterogeneous dispersed dielectrics*. Monograph. Vinnytsia: VNTU. Vinnytsia. [in Ukrainian].
- [3] Bovsunovsky, A.P. (2012). *Electrical materials*. Short reference book. Kyiv: NUHT. [in Ukrainian].
- [4] The Great Encyclopedia of Gaza Oil. Temperature coefficient - dielectric constant. Electronic resource. Access mode: <http://www.ngpedia.ru/id115428p1.html>
- [5] Senchuk, Y.F. (2006). *Mathematical analysis for engineers*. Part 2. Textbook. Kharkiv: NTU KhPI, 376 p.
- [6] Klimenko, L.P., Pizintsali, L.V., Alexandrovskaya, N.I., Evdokimov, V.D. (2011). *Metrology, standardization and quality management*. Mykolaiv: BSTU Publishing House named after Petra Mogili. [in Ukrainian].
- [7] Yanenko, O.P., Peregudov, S.M., Shevchenko, K.L. (2021). *Radiometric microwave methods and means of measuring physical quantities*. Tutorial. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky. [in Ukrainian].

EVALUATION OF SYSTEMATIC ERRORS OF STRIP ASYMMETRIC HUMIDITY SENSOR

The methodical estimation of the methodical component of the error arising at measurement of humidity of heterogeneous dispersed dielectrics by the band asymmetric sensor is carried out.

In the process of evaluation it was shown that the most significant component of methodological error occurs due to changes in temperature and frequency of the information wave. Temperature-dependent values included in the mathematical model of the band asymmetric humidity sensor are: relative dielectric constant of the substrate dielectric and the object of control, length and width of the central conductor, substrate dielectric thickness. The dielectric constant of the dielectric of the object of control depends on the frequency of the information wave, and this parameter is directly included in the coefficients of the sensor conversion equation.

The results of the research showed that in the process of measuring the conversion of humidity in the band asymmetric sensor there is a methodological component of the error associated with changes in temperature and instability of the frequency of the information wave. To ensure a frequency error at a level not exceeding 0.5%, the error of instability of the frequency of the information wave when converting humidity into the output amplitude of the information wave should not exceed ± 3 kHz, provided by existing RF generators. It is advisable to remove the temperature component of the error using the method of correction.

The mathematical model of band asymmetric measurement of moisture conversion of heterogeneous dispersed dielectrics in the high-frequency region was also improved.

Key words: band asymmetric sensor, humidity, temperature error, methodological error, frequency error, attenuation.

F. 22. Fig. 7. Ref. 7.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Граняк Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Кожушко Олександр Вікторович – студент 3 курсу групи ЕІ-19-1 (Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: kozuskoaleksandr7@gmail.com)

Valerii Hraniak – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University. (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-6604-6157>).

Oleksandr Kozhushko – 3rd year student of EI-19-1 group (Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics) of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: kozuskoaleksandr7@gmail.com)