

В. В. Кухарчук¹
В. В. Богачук¹
В. Ф. Граняк¹

ОЦІНЮВАННЯ ПОХИБОК ПЕРЕТВОРЕННЯ ВОЛОГОСТІ У ФАЗОВЕ ЗМІЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОЇ ХВИЛІ

¹Вінницький національний технічний університет

Проведено оцінювання та запропоновані шляхи зменшення похибок математичної моделі залежності фазового зміщення інформативної хвилі смугового несиметричного сенсора від вологості, зумовлених впливом неінформативних параметрів.

Ключові слова: смуговий несиметричний сенсор, вологість, температурна похибка, частотна похибка, зміщення фази.

Вступ

У роботі [1] показано, що перспективним для використання в системах контролю та автоматичного керування технологічними процесами є фазовий метод вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків, реалізований на базі смугового несиметричного сенсора вологості. Його суть полягає у пропусканні через смуговий несиметричний хвилевід, на поверхні якого розміщений досліджуваний зразок, високочастотного інформативного сигналу з подальшим вимірюванням зміни його початкової фази на виході сенсора.

До класу гетерогенних дисперсних діелектриків відноситься низка видів продукції переробної галузі АПК (вершкове масло, маргарин, та інші), до яких, відповідно до закону України «Про безпечність та якість харчових продуктів», висуваються підвищені вимоги щодо якості. Не менш важливим завданням, що має бути розв'язано на етапі проектування систем контролю, є оцінювання та пошук шляхів зменшення методичної складової похибки сенсора, від якої значною мірою залежать параметри усєї системи [2].

Постановка задачі

Математична модель зміщення фази інформативної хвилі від вологості зразка має вигляд [1]

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{A_1}{A_4 - WA_5} + \frac{WA_2}{A_4 - WA_5}} - A_3, \quad (1)$$

де W — вологість зразка; A_1 – A_5 — постійні для конкретного сенсора коефіцієнти, що визначаються зі співвідношень

$$A_1 = \left(\frac{360}{2\pi}\right)^2 \cdot 4\pi^2 f^2 l^2 \left\{ \left[H(\varepsilon_d + \varepsilon_j) + (\varepsilon_d - \varepsilon_j) \right] F_3 \right\}; \quad (2)$$

$$A_2 = \left(\frac{360}{2\pi}\right)^2 \cdot -4\pi^2 f^2 l^2 \left\{ \left[H(\varepsilon_d + \varepsilon_j) + (\varepsilon_d - \varepsilon_j) \right] F_2 \right\} - HF_1 + \rho_v \varepsilon_j (\varepsilon_v + 1 - \varepsilon_j H); \quad (3)$$

$$A_3 = \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{2\pi fl}{c} \sqrt{\frac{(\varepsilon_d + 1)}{2} + \frac{(\varepsilon_d - 1)}{2H}}; \quad (4)$$

$$A_4 = 2c^2 H \cdot F_3; \quad (5)$$

$$A_5 = 2c^2 H \cdot F_2; \quad (6)$$

$$H = \sqrt{1 + 10 \frac{h}{a}}; \quad (7)$$

$$F_1 = \rho_B \varepsilon_B \varepsilon_{ж} + 2\rho_B \varepsilon_B - \rho_B \varepsilon_{ж}^2 - 2\rho_B \varepsilon_{ж}; \quad (8)$$

$$F_2 = 2\rho_B \varepsilon_B + 2\rho_B - \rho_{ж} \varepsilon_B - \rho_B \varepsilon_{ж} - 2\rho_{ж}; \quad (9)$$

$$F_3 = 100\rho_B \varepsilon_B + 200\rho_B, \quad (10)$$

де f — частота інформативної хвилі; l — довжина центрального провідника смугового несиметричного сенсора; ε_B , $\varepsilon_{ж}$ — відповідно, відносна діелектрична проникність води та жиру; ρ_B , $\rho_{ж}$ — відповідно, густина води та молочного жиру; h — товщина діелектрика підкладки; a — ширина центрального провідника; c — швидкість поширення світла у вакуумі.

Для оцінювання впливу неврахованих у моделі (1) величин на інформативний параметр зміщення початкової фази 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 діелектрика підкладки та об'єкта контролю, довжина і ширина центрального провідника, товщина діелектрика підкладки.

Зміна значення відносної діелектричної проникності зі зміною температури гетинаксу, що використовувався як матеріал підкладки смугового несиметричного сенсора у роботі [1] в інтервалі зміни температури 20 ± 15 °С описується законом близьким до лінійного, а температурний коефіцієнт діелектричної проникності цього матеріалу наближено дорівнює 180 град/1 [3, 4]. Коефіцієнт теплового розширення міді становить $16,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град [3, 4]. Оскільки гетинакс є шаруватим пресованим матеріалом, що має паперову основу, просочену епоксидною або фенольною смолами [3, 4], тобто має пористу природу, то його розширенням під час нагрівання у вказаних межах можна знехтувати.

Залежними від частоти інформативної хвилі є діелектрична проникність діелектрика об'єкта контролю. Частота інформативної хвилі також безпосередньо входить до коефіцієнтів рівняння (1). Залежність коефіцієнта діелектричної проникності гетинаксу від частоти в околі точки 300 МГц, яку, як показано у [1] доцільно використовувати як частоту інформативної хвилі, має фактично лінійний характер, а частотний коефіцієнт діелектричної проникності приблизно дорівнює 200 кГц/1 [3, 4].

Таким чином для забезпечення достовірності контролю необхідно вилучити з результатів вимірювання похибки, зумовлені впливом неінформативних параметрів (частотою інформативної хвилі та зміненням температури об'єкта контролю).

Розв'язання задачі

З урахуванням виділених неінформативних параметрів, математична модель залежності різниці фаз між опорним та інформативним каналами від вологості об'єкта контролю матиме вигляд

$$\Delta\phi(W, \Delta T, \Delta f) = \sqrt{\frac{A_1(\Delta T, \Delta f)}{A_4(\Delta T, \Delta f) - WA_5(\Delta T, \Delta f)} + \frac{WA_2(\Delta T, \Delta f)}{A_4(\Delta T, \Delta f) - WA_5(\Delta T, \Delta f)}} - A_3(\Delta T, \Delta f), \quad (11)$$

де $A_1(\Delta T, \Delta f) \dots A_5(\Delta T, \Delta f)$ — залежні від зміни температури та частоти інформативної хвилі коефіцієнти, що розраховуються за формулою

$$A_1(\Delta T, \Delta f) = 129600(f + \Delta f)^2 (l + l\alpha_m \Delta T)^2 \times \left\{ \left[H(\Delta T) \left(\varepsilon_d + \frac{\Delta T}{k_{Td}} - \frac{\Delta f}{k_{fd}} + \varepsilon_{ж} + \frac{\Delta T}{k_{Tж}} - \frac{\Delta f}{k_{fж}} \right) + \left(\varepsilon_d + \frac{\Delta T}{k_{Td}} - \frac{\Delta f}{k_{fd}} - \varepsilon_{ж} - \frac{\Delta T}{k_{Tж}} + \frac{\Delta f}{k_{fж}} \right) \right] F_3(\Delta T, \Delta f) \right\}, \quad (12)$$

де k_{Td} — температурний коефіцієнти зміни діелектричної проникності діелектрика підкладки;

k_{fd} — частотний коефіцієнт зміни діелектричної проникності діелектрика підкладки; α_m — коефіцієнт теплового розширення центрального провідника.

$$H(\Delta T) = \sqrt{1 + 10 \frac{h}{a + a\alpha_m \Delta T}}; \quad (13)$$

$$A_2(\Delta T, \Delta f) = -129600(f + \Delta f)^2 (l + l\alpha_m \Delta T)^2 \times \\ \times \left\{ \left[H(\Delta T) \left(\varepsilon_d + \frac{\Delta T}{k_{Td}} - \frac{\Delta f}{k_{fd}} + \varepsilon_{ж} + \frac{\Delta T}{k_{Tж}} - \frac{\Delta f}{k_{fж}} \right) + \left(\varepsilon_d + \frac{\Delta T}{k_{Td}} - \frac{\Delta f}{k_{fd}} - \varepsilon_{ж} - \frac{\Delta T}{k_{Tж}} + \frac{\Delta f}{k_{fж}} \right) \right] F_2(\Delta T, \Delta f) \right\} - \quad (14)$$

$$- H(\Delta T) F_1(\Delta T, \Delta f) + \rho_B \left(\varepsilon_{ж} + \frac{\Delta T}{k_{Tж}} - \frac{\Delta f}{k_{fж}} \right) \left(\left(\varepsilon_B + \frac{\Delta T}{k_{TB}} - \frac{\Delta f}{k_{fB}} \right) + 1 - \left(\varepsilon_{ж} + \frac{\Delta T}{k_{Tж}} - \frac{\Delta f}{k_{fж}} \right) H(\Delta T) \right);$$

$$A_3(\Delta T, \Delta f) = \frac{360 fl}{c} \sqrt{\frac{\left(\varepsilon_d + \frac{\Delta T}{k_{Td}} - \frac{\Delta f}{k_{fd}} + 1 \right)}{2} + \frac{\left(\varepsilon_d + \frac{\Delta T}{k_{Td}} - \frac{\Delta f}{k_{fd}} - 1 \right)}{2H(\Delta T)}}; \quad (15)$$

$$A_4(\Delta T, \Delta f) = 2c^2 H(\Delta T) \cdot F_3(\Delta T, \Delta f); \quad (16)$$

$$A_5(\Delta T, \Delta f) = 2c^2 H(\Delta T) \cdot F_2(\Delta T, \Delta f). \quad (17)$$

Виходячи з впливу неінформативних параметрів на значення фазового зсуву інформативної хвилі, встановлено залежністю (11), оцінено вплив неінформативного параметру зміни температури на зміщення початкової фази інформативної хвилі та досліджено зміну температурної систематичної похибки на прикладі смугового несиметричного сенсора з гетинаксовою підкладкою, довжиною центрального провідника 864 мм, товщиною підкладки 2 мм та шириною центрального провідника 2,5 мм.

$$\frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial(\Delta T)} = \frac{\partial \left(\frac{WF_1(\Delta T, \Delta f)}{F_3(\Delta T, \Delta f) - WF_2(\Delta T, \Delta f)} \right)}{\partial(\Delta T)}; \quad (18)$$

$$\Delta\phi_T(W, \Delta T) = \Delta\phi_{3T}(W, \Delta T) - \Delta\phi_{3T}(W, 0), \quad (19)$$

де $\Delta\phi_{3T}(W, \Delta T)$, $\Delta\phi_{3T}(W, 0)$ — зміщення фази інформаційної хвилі після і до зміни температури.

Графічне подання залежності частинної похідної функції (18) та абсолютної похибки, що виникає внаслідок зміни температури (19), на рис. 1 та рис. 2, відповідно.

Як видно з рис. 1, значення першої похідної має точки екстремуму на усьому діапазоні зміни температури, що свідчить про немонотонний характер залежності температурної систематичної похибки. Значення першої похідної змінюються від додатних до від'ємних, що свідчить про наявність локального максимуму функції за зміною температури. Перша похідна функції при постійних значеннях вологості лінійно залежить від зміни температури, що говорить про нелінійність залежності зміщення початкової фази інформативної хвилі (11) від зміни температури.

Залежність абсолютної похибки (рис. 2) від вологості є параболічною, що узгоджується з висновками, зробленими під час аналізу результатів, наведених на рис. 1. Характер параболічної залежності посилюється зі збільшенням температурного відхилення, що є наслідком прямої пропорційності зміни діелектричної проникності жиру, води та гетинаксу абсолютному відхиленню температури.

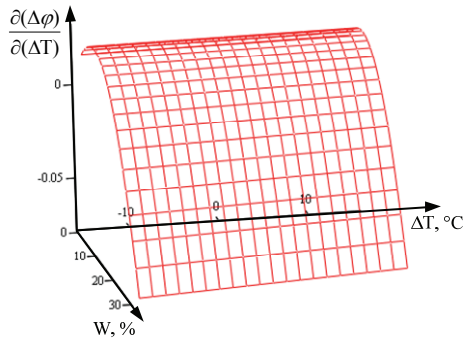


Рис. 1. Залежність частинної похідної різниці фаз по різниці температур від вологості зразка за зміни температури

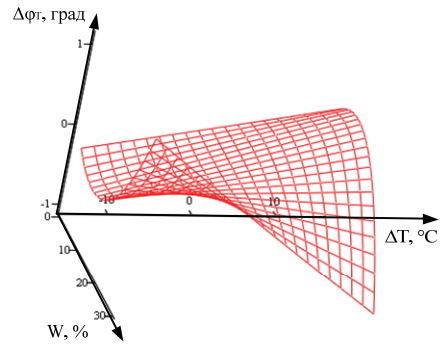


Рис. 2. Залежність відхилення кута зміщення інформаційної хвилі від вологості зразка за зміни температури навколишнього середовища

На основі встановленої залежності відхилення кута зміщення інформаційної хвилі від температури оцінено відносну похибку запропонованої математичної моделі за дії зазначеного вище неінформативного параметра

$$\sigma_{\Delta\phi}(W, \Delta T) = \frac{|\Delta\phi_{3T}(W, \Delta T) - \Delta\phi_{3T}(W, 0)|}{\Delta\phi_{3T}(W, 0)} \cdot 100\%. \quad (20)$$

Результати моделювання математичної залежності (20) показано на рис. 3.

Відносна похибка (рис. 3) математичної моделі за зміни температури в зазначених межах не перевищує 6% та зменшується зі зростанням вологості зразка, що зумовлено значним зростанням кута фазового зсуву інформаційної хвилі зі збільшенням вологості об'єкта контролю.

Для компенсації систематичної методичної похибки моделі сенсора, що спричинена зміною температури використано метод поправок.

З урахуванням (1) та (19) температурна похибка може бути визначеною, як:

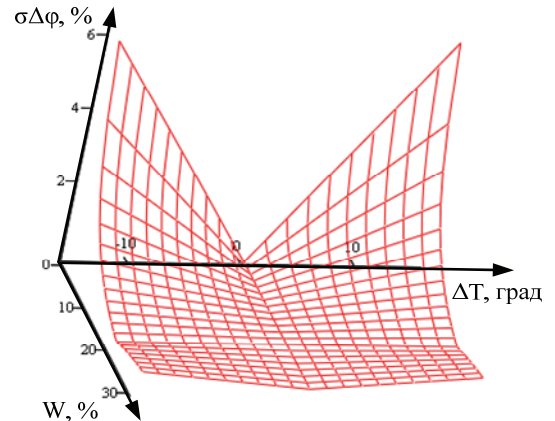


Рис. 3. Відносна температурна похибка залежності фазового зміщення інформаційної хвилі від вологості зразка за зміни температури

$$\Delta\phi_T(W, \Delta T) = \sqrt{\frac{A_1}{A_4 - W \cdot A_5} + \frac{WA_2}{A_4 - W \cdot A_5}} + A_3 - \sqrt{\frac{A_1(\Delta T)}{A_4(\Delta T) - WA_5(\Delta T)} + \frac{WA_2(\Delta T)}{A_4(\Delta T) - WA_5(\Delta T)}} - A_3(\Delta T). \quad (21)$$

Відповідно, записавши різницю фаз інформаційної і опорної хвилі, як суму значення різниці фаз при 20 °C та температурної поправки, а також здійснивши певні математичні перетворення, отримаємо:

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{A_1(\Delta T)}{A_4(\Delta T) - WA_5(\Delta T)} + \frac{WA_2(\Delta T)}{A_4(\Delta T) - WA_5(\Delta T)}} + A_3(\Delta T). \quad (22)$$

Як уже зазначалося, частота інформативної хвилі є параметром, що безпосередньо входить до рівняння перетворення моделей залежності кута зміщення фази інформаційної хвилі. Відносна діелектрична проникність матеріалу також функціонально пов'язана з частотою вхідного сигналу [1, 5—6]. Виходячи з цього, похибку моделі, що пов'язує вологість та кут фазового зсуву за зміни частоти інформаційної хвилі для вищеописаного сенсора оцінено з використанням співвідношень

$$\frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial(\Delta f)} = \frac{\partial\left(\frac{WF_1(\Delta T, \Delta f)}{F_3(\Delta T, \Delta f) - WF_2(\Delta T, \Delta f)}\right)}{\partial(\Delta f)}, \quad (23)$$

$$\Delta\phi_f(W, \Delta f) = \Delta\phi_{3f}(W, \Delta f) - \Delta\phi_{3f}(W, 0), \quad (24)$$

де $\Delta\phi_{3f}(W, \Delta f)$, $\Delta\phi_{3f}(W, 0)$ — зміщення фази інформативної хвилі після і до зміни частоти інформативної хвилі.

Результати моделювання залежності частинної похідної різниці фаз інформативної та опорної хвиль від зміни частоти інформативної хвилі (23) і абсолютної частотної похибки різниці фаз інформативної та опорної хвиль (24) подано на рис. 4 та рис. 5, відповідно.

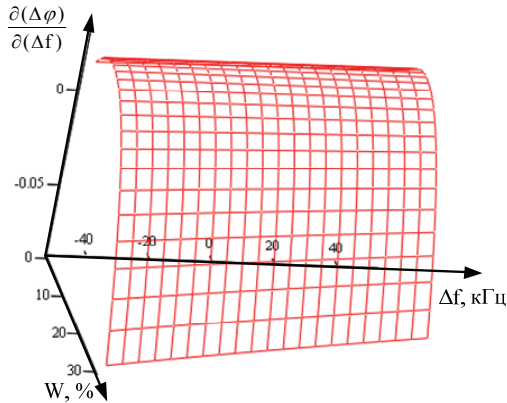


Рис. 4. Залежність часткової похідної різниці фаз інформативної та опорної хвилі по різниці частоти інформаційної хвилі від вологості зразка за зміни частоти інформативної хвилі

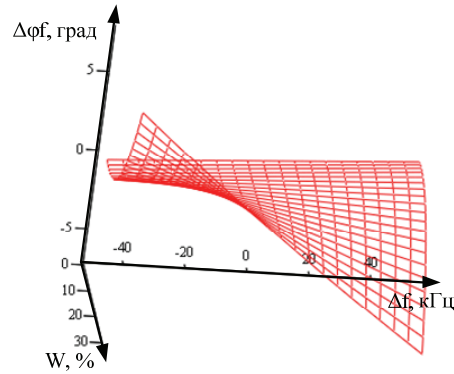


Рис. 5. Залежність відхилення кута різниці фаз інформативної та опорної хвилі від вологості зразка за зміни частоти інформативної хвилі

Як випливає з рис. 4, значення першої похідної має точки екстремуму на усьому діапазоні зміни частоти інформативної хвилі, що вказує на немонотонний характер залежності частотної систематичної похибки. Значення першої похідної змінюються від додатних до від'ємних, що свідчить про наявність локального максимуму функції від зміни частоти інформативної хвилі. Перша похідна функції за постійних значень вологості лінійно залежить від зміни інформативної хвилі, що показує на нелінійність залежності математичної моделі (11) від зміни частоти інформативної хвилі.

На рис. 5 показана залежність абсолютної похибки від вологості має характер, що збігається з висновками, зробленими на основі аналізу рис. 4. Посилення нелінійності зі збільшенням відхилення частоти є наслідком прямої пропорційності зміни діелектричної проникності жиру, води та гетинаксу абсолютному відхиленню частоти інформаційної хвилі.

Для оцінки відносної методичної частотної похибки сенсора для зазначеного діапазону коливання частоти сигналу оцінено відносну похибку математичної моделі залежності кута зміщення фази від вологості за зміни частоти інформаційної хвилі

$$\sigma_{\Delta\phi}(W, \Delta f) = \frac{|\Delta\phi_{3f}(W, \Delta f) - \Delta\phi_{3f}(W, 0)|}{\Delta\phi_{3f}(W, 0)} \cdot 100\%. \quad (25)$$

Результати моделювання математичної залежності (25) показано на рис. 6.

Відносна похибка (рис. 6) математичної моделі при зміні частоти інформаційної хвилі в зазначених межах не перевищує 12 % та у разі зміни вологості у діапазоні від 0 % до 10 % монотонно зменшується та при вологості 10 % досягає нуля, тоді як з подальшим зростанням вологості у межах від 10 % до 30 % незначно зростає. Причому, для забезпечення відносної похибки моделі на рівні 0,5 % у діапазоні зміни вологості від 0 % до 30 % абсолютна похибка встановлення частоти не має перевищувати $\pm 2,5$ кГц.

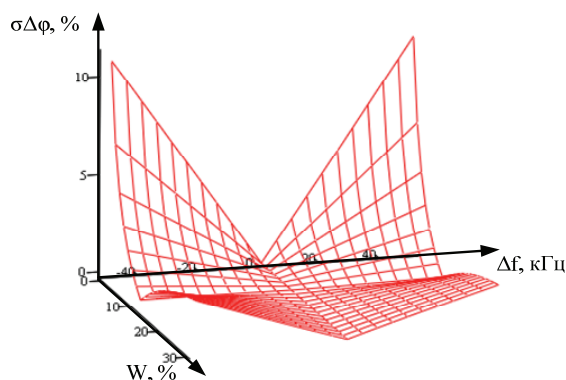


Рис. 6. Відносна частотна похибка залежності кута фазового зміщення від вологості зразка за зміни частоти інформаційної хвилі

Висновки

1. Оцінено функції впливу неінформативних параметрів на зміщення фази інформативної хвилі. Показано, що в процесі вимірювального перетворення вологості в смуговому несиметричному сенсорі має місце методична складова похибки, пов'язана зі зміною температури та нестабільністю частоти інформативної хвилі. Для забезпечення частотної похибки на рівні, що не перевищує 0,5 %, похибка нестабільності частоти інформаційної хвилі при перетворенні вологості у фазове зміщення інформативної хвилі не повинна перевищувати $\pm 2,5$ 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 у високочастотній області, яка відрізняється тим, що враховує вплив температури навколишнього середовища та дозволяє вилучити з результатів вимірювання температурну складову похибки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kuharchuk V. Phase-amplitude method for measuring humidity content of heterogenetic disperse dielectric / V. Kuharchuk, V. Graniak // Метрологія та прилади. — 2013. — № 4. — С. 3—8.
2. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю порошкоподібних матеріалів : моногр. / В. В. Богачук, Б. І. Мокін. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 141 с.
3. Бовсуновський А. П. Електротехнічні матеріали. Короткий довідник / А. П. Бовсуновський. — Київ : НУХТ, 2012. — 36 с.
4. Большая энциклопедия нефти и газа. Температурный коэффициент — диэлектрическая проницаемость. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id115428p1.html>.
5. Никулин Н. В. Радиоматериалы и радиокомпоненты / Н. В. Никулин, А. С. Назаров. — М. : Высшая школа, 1986. — 208 с.
6. Лаборатория метеотехнологий. Диэлектрические свойства воды и льда. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.meteolab.ru/projects/dielectric/>.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.05.2014

Кухарчук Василь Васильович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань;

Богачук Володимир Васильович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

Граняк Валерій Федорович — аспірант кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, e-mail: titanxp2000@ukr.net.

V. V. Kukharchuk¹
V. V. Bogachuk¹
V. F. Graniak¹

Evaluation of errors of transformation of humidity in phase displacement of informing wave

¹Vinnytsia National Technical University

The evaluation and offered ways of reduction of errors of mathematical model of dependence of phase displacement of informing wave of stripe asymmetrical touch-control on humidity, determined by influence of non-informative factors are conducted in the paper.

Keywords: stripe asymmetrical touch-control, humidity, temperature error, frequency error, displacement of phase.

Kukharchuk Vasyl V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measuring;

Bogachuk Volodymyr. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Renewable Energy and Transport Electric Systems and Complexes;

Graniak Valerii F. — Post-Graduate Student of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electric Measuring, e-mail: titanxp2000@ukr.net.

V. V. Кухарчук¹
V. V. Богачук¹
В. Ф. Граняк¹

Оценка погрешностей преобразования влажности в фазовое смещение информативной волны

¹Винницкий национальный технический университет

Проведено оцeнка и предложены пути уменьшения погрешностей математической модели зависимости фазового смещения информативной волны полосового несимметричного сенсора от влажности, обусловленных влиянием неинформативных факторов.

Ключевые слова: полосовой несимметричный сенсор, влажность, температурная погрешность, частотная погрешность, смещение фазы.

Кухарчук Василий Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электрических измерений;

Богачук Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов;

Граняк Валерий Федорович — аспирант кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, e-mail: titanxp2000@ukr.net