

УДК 621.311.25

В.В. Кухарчук, В.Ф. Граняк

Вінницький національний технічний університет

МЕТОД ТА ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ НА ОСНОВІ ВИСОКОЧАСТОТНОГО СЕНСОРА

Розроблено метод виміру вологості гетерогенних дисперсних діелектриків. Получено математичну модель полоскового сенсора вологості і запропонована структурна схема приладу виміру вологості

Вступ. Одним з основних факторів, що обмежує конкурентоспроможність вітчизняних підприємств є не достатньо висока якість готової продукції. Особливо гостро ця проблема стоїть при виробництві продуктів харчування, в тому числі і тих, що відносяться до класу гетерогенних дисперсних діелектриків.

Найбільш поширеним представником даного класу речовин, що виробляються вітчизняними підприємствами переробної галузі АПК, є вершкове масло. При чому, якість цього продукту значною мірою визначається його вологістю [1]. А так як підвищення стабільності вмісту вологи у даному продукті значною мірою ускладнюється відсутністю засобів вимірювання вологості, здатних забезпечити високу точність та швидкодію [2], то очевидною є необхідність покращення їх метрологічних характеристик. Тож розробка нових методів вимірювального контролю, що характеризувалися б високою точністю та швидкодією, є актуальною науковою задачею, вирішення якої має важливе прикладне значення.

Постановка задачі. Як показано у [2], перспективним, з точки зору покращення точності

вимірювання вологості, є використання сенсорів, що побудовані на основі несиметричних смугових хвильоводів. Основними перевагою даного сенсора являється те, що він є інваріантним до неінформативних впливів навколишнього середовища, має високу швидкість та відносно просте конструктивне виконання [2] (рис. 1).

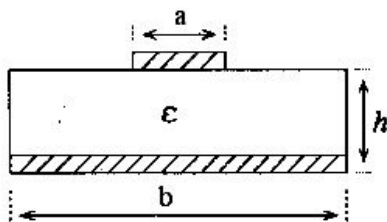


Рис. 1. Поперечний переріз смугового несиметричного хвильоводу.

Про те, їх широке використання унеможливується відсутністю адекватної математичної моделі, що давала б змогу з доволі високою точністю пов'язати параметри вихідної електромагнітної хвилі з вологістю досліджуваного зразка. Виходячи з сказаного, є очевидною необхідність розробки такої моделі, що дало б можливість отримати функцію перетворення несиметричного смугового сенсора вологості.

Аналіз шляхів розв'язання задачі. Особливістю несиметричного смугового хвильоводу є те, що структура електромагнітного поля лінії має досить складний характер. Хоча у певному спрощенні електромагнітну хвилю, що поширюється у такому хвильоводі, можна представити у вигляді TEM-хвилі. При чому, на відносно низьких частотах (ВЧ діапазону) прийняте спрощення не вносить суттєвої похибки у розрахунки [3]. Тож, ввівши обмеження на частоту інформативної хвилі, в подальшому у виведенні даної математичної моделі будемо вважати, що інформаційна хвиля є хвилею TEM-типу.

Як доведено в [4], силові лінії магнітного поля концентруються в при крайовій зоні центрального провідника. Тому, враховуючи належність молочного жиру, води та діелектрику, що розміщений між центральним провідником та заземленням, до одного класу речовин з відносною магнітною проникністю, значення якої близьке до одиниці, магнітні параметри такої хвилі можна вважати постійними. Тому у подальших розрахунках доцільно враховувати лише зміну діелектричних параметрів системи.

При чому, як показано у [3, 4], еквівалентна (ефективна) діелектрична проникність системи може бути визначена наступним виразом:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} + \frac{\epsilon_a - \epsilon_c}{2\sqrt{1+10\frac{h}{a}}}, \quad (1)$$

де h – товщина нижнього діелектрика; a – ширина центрального провідника; ϵ_a – відносна діелектрична проникність нижнього діелектрика; ϵ_c – відносна діелектрична проникність зразка.

Відповідно, за умови відсутності зразка на поверхні хвилеводу (наявності на його місці повітря з діелектричною проникністю 1), що відповідає фазі опорного каналу, ефективна діелектрична проникність може бути знайдена:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_a + 1}{2} + \frac{\epsilon_a - 1}{2\sqrt{1+10\frac{h}{a}}}, \quad (2)$$

Тоді, врахувавши зв'язок діелектричної проникності з фазовою швидкістю електромагнітної хвилі для обох випадків можна записати співвідношення [3]:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (3)$$

$$V_{\text{ir}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}, \quad (4)$$

де c – швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі.

Оперуючи значеннями фазової швидкості, різницю фаз між опорним на інформаційним каналом можна розрахувати за наступним виразом:

$$\Delta\varphi = 2\pi f \cdot \left(\frac{L}{V} - \frac{L}{V_{\text{ir}}} \right), \quad (5)$$

де f – частота електромагнітної хвилі; L – довжина хвилеводу.

Підставивши (3) та (4) у (5) отримаємо:

$$\Delta\varphi = 2\pi f L \cdot \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}{c} - \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}{c} \right), \quad (6)$$

Тоді, врахувавши співвідношення (1) та (2) вираз (6) можна записати у вигляді:

$$\Delta\varphi = 2\pi f L \cdot \left(\frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} + \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{2\sqrt{1+10\frac{h}{a}}}}}{c} - \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_a + 1}{2} + \frac{\varepsilon_a - 1}{2\sqrt{1+10\frac{h}{a}}}}}{c} \right). \quad (7)$$

Як впливає з (7), оскільки решта параметрів для конкретного хвилеводу є постійними, різниця фази інформативної і опорної хвилі функціонально залежить лише від відносної діелектричної проникності зразка. При чому, враховуючи відсутність будь-яких хімічних зв'язків між молочним жиром та розподіленою у вершковому маслі вологою [5], вершкове масло можна розглядати як особливий вид в'язкої емульсії. В такому випадку вкраплення вологи, по суті, являють нерозчинну дисперсну

фазу. А, отже, приріст відносної діелектричної проникності відносно абсолютно сухого молочного жиру за умови відносно невеликої об'ємної частки вологи, можна розрахувати за виразом [6]:

$$\Delta \varepsilon = \frac{v \cdot (\varepsilon_{\dot{a}} - \varepsilon_{\text{ж}}) \cdot (\varepsilon_{\text{ж}} + 2)}{\varepsilon_{\dot{a}} + 2 - v \cdot (\varepsilon_{\dot{a}} - \varepsilon_{\text{ж}})}, \quad (8)$$

де $\varepsilon_{\dot{a}}$ – відносна діелектрична проникність води; $\varepsilon_{\text{ж}}$ – відносна діелектрична проникність молочного жиру; V – об'ємна частка вологи у зразку.

Об'ємна частка води знаходиться з відомого співвідношення:

$$v = \frac{V_{\dot{a}}}{V_{\dot{a}} + V_{\text{ж}}}, \quad (9)$$

де $V_{\dot{a}}, V_{\text{ж}}$ – об'єм, що займає вода та молочний жир відповідно;

Оскільки, вміст вологи у зразку визначається відомим співвідношенням мас вологи та молочного жиру, які у свою чергу можна виразити через густину та об'єм відповідних фракцій, вологість об'єкту контролю можна обчислити з наступної функціональної залежності:

$$W = \frac{V_{\dot{a}} \cdot \rho_{\dot{a}}}{V_{\dot{a}} \cdot \rho_{\dot{a}} + V_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}}} \cdot 100 \%, \quad (10)$$

де $\rho_{\dot{a}}, \rho_{\text{ж}}$ – відповідно, густина води та молочного жиру.

Звідси, підставивши (10) у (9) отримуємо функціональну залежність, що однозначно пов'язує об'ємну частку води з вологістю зразка:

$$v = \frac{\rho_{\dot{a}} \cdot W}{100 \cdot \rho_{\dot{a}} - W \cdot (\rho_{\dot{a}} - \rho_{\text{ж}})}. \quad (11)$$

Відповідно, підставивши (11) у (8) та здійснивши певні математичні перетворення, отримаємо:

$$\Delta \varepsilon = \frac{W \cdot (\rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} + 2 \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} - \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}}^2 - 2 \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}})}{100 \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} + 200 \rho_{\text{ж}} - W \cdot (2 \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} + 2 \rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} - \rho_{\text{ж}} \varepsilon_{\text{ж}} - 2 \rho_{\text{ж}})}. \quad (12)$$

Тоді, записавши відносну діелектричну проникність зразка, як суму відносної діелектричної проникності молочного жиру та розрахованого за (12) приросту відносної діелектричної проникності, обумовленої наявністю у зразку вологи, отримаємо:

$$\varepsilon_{\zeta} = \varepsilon_{\kappa} + \Delta\varepsilon. \quad (13)$$

Підставивши (12) і (13) у (7) та ввівши заміни (14) – (18), отримаємо (19):

$$\begin{aligned} A_1 = & 4\pi^2 f^2 L^2 \cdot (100\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + 200\rho_{\sigma}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + \\ & + 100\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + 200\rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + 100\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\delta} + , \\ & + 200\rho_{\sigma}\varepsilon_{\delta} - 100\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa} - 200\rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} A_2 = & -4\pi^2 f^2 L^2 \cdot (2\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + 2\rho_{\sigma}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} - \\ & - \rho_{\varkappa}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} - \rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} - 2\rho_{\varkappa}\varepsilon_{\delta}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + \\ & + \rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + 4\rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} - \end{aligned} \quad , (15)$$

$$\begin{aligned} & - \rho_{\varkappa}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} - 2\rho_{\varkappa}\varepsilon_{\varkappa}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} - 2\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\sqrt{1+10\frac{h}{a}} + \\ & + 2\rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\delta} + 2\rho_{\sigma}\varepsilon_{\delta} - \rho_{\varkappa}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\delta} - \rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}\varepsilon_{\delta} - 2\rho_{\varkappa}\varepsilon_{\delta} - \\ & \rho_{\sigma}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa} - \rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa} + \rho_{\varkappa}\varepsilon_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa} + \rho_{\sigma}\varepsilon_{\varkappa}^2 + 2\rho_{\varkappa}\varepsilon_{\varkappa}) \end{aligned}$$

$$A_3 = 2\pi fL \cdot \left(\frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{a}} + 1}{2} + \frac{\varepsilon_{\text{a}} - 1}{2\sqrt{1+10\frac{h}{a}}}}}{c} \right), \quad (16)$$

$$A_4 = 2c^2 \sqrt{1 + 10 \frac{h}{a}} \cdot (100\rho_{\hat{a}}\varepsilon_{\hat{a}} + 200\rho_{\hat{a}}), \quad (17)$$

$$A_5 = 2c^2 \sqrt{1 + 10 \frac{h}{a}} \cdot (2\rho_{\hat{a}}\varepsilon_{\hat{a}} + 2\rho_{\hat{a}} - \rho_{\varepsilon}\varepsilon_{\hat{a}} - \rho_{\hat{a}}\varepsilon_{\varepsilon} - 2\rho_{\varepsilon}). \quad (18)$$

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{A_1}{A_4 - W \cdot A_5} + \frac{WA_2}{A_4 - W \cdot A_5}} - A_3. \quad (19)$$

Вираз (19), забезпечуючи однозначний зв'язок між вологістю зразка та різницею фаз опорної та інформативної хвиль, по суті, є рівнянням перетворення смугового сенсора вологості.

Запишемо співвідношення величини кута у радіанах та електричних градусах:

$$\Delta\varphi_{\text{ад}} = \frac{360 \cdot \Delta\varphi}{2\pi}. \quad (20)$$

Тоді, ввівши додаткові заміни:

$$\hat{A}_1 = \left(\frac{360}{2\pi}\right)^2 \cdot A_1, \quad (21)$$

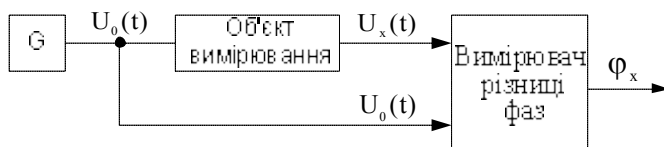
$$\hat{A}_2 = \left(\frac{360}{2\pi}\right)^2 \cdot A_2, \quad (22)$$

$$\hat{A}_3 = \frac{360}{2\pi} \cdot A_3. \quad (23)$$

Відповідно, рівняння перетворення сенсора, при відображенні різниці фаз у електричних градусах матиме вигляд:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{B_1}{A_4 - W \cdot A_5} + \frac{WB_2}{A_4 - W \cdot A_5}} - B_3. \quad (24)$$

Для підтвердження адекватності даної математичної моделі було проведено ряд експериментальних досліджень, з використанням несиметричного смугового хвилеводу з гітенаксовою основою, довжиною 860 мм товщиною підлоги 2 мм та шириною центрального провідника 2,5 мм. При дослідженні зсуву фази були використанні:



вимірювач різниці фаз «ФК2 – 12» та генератор сигналів високочастотний «Г4 – 107». Структурну схему установки, що була використана у експериментальному дослідженні, приведено на рис. 2.

Рис. 2. Структурна схема лабораторної установки

При моделюванні функціональної залежності (24), з одночасним накладанням експериментальних даних, були отримані такі результати:

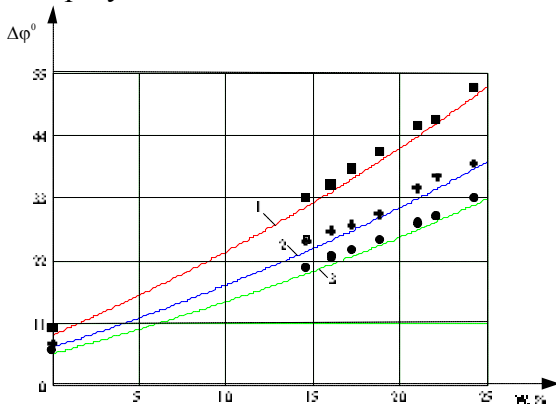


Рис. 3. Теоретичні та експериментальна статичні характеристики несиметричного смугового сенсора вологості, для різних значень частоти інформаційних хвиль: 1 – інформаційна хвиля частотою 400 МГц; 2 – інформаційна хвиля частотою 300 МГц; 3 – інформаційна хвиля частотою 250 МГц.

Як видно з порівняння експериментальних та теоретичних значень, за умови накладених вище обмежень, абсолютна похибка даної моделі не перевищує 2^0 , а

чутливість сенсора монотонно зростає при зростанні частоти інформаційної хвилі (рис. 3).

Представлений метод, хоча і забезпечують ряд переваг, про те має і ряд суттєвих недоліків, пов'язаних з не лінійністю статичної характеристики каналу вологості. Для його усунення було розроблено метод перетворення різниці фаз у напругу нульової гармоніки електричного сигналу, пропорційну функції синуса різниці фаз, що відображений у (25) [7].

$$\begin{aligned} & A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \cdot A_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = \\ & = \frac{1}{2} A_1 A_2 [\sin(\varphi_1 - \varphi_0) + \\ & + \sin(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_0)], \end{aligned} \quad (25)$$

де A_1 та A_0 – відповідно, амплітуди інформативного та опорного гармонічних сигналів; φ_1, φ_0 – відповідно, початкові фази опорного та інформативного гармонічних сигналів.

В такому випадку, структурну схему пристрою, що реалізує описаний вище метод вимірювання вологості можна представити наступним чином (рис.4):

Пристрій працює так: З високочастотного генератора 1 на вхід первинного вимірювального перетворювача 2, та блоку аналогового множення 3 подається високочастотний сигнал. Проходячи через первинний вимірювальний перетворювач 2, інформативний параметр залежно від вологості, зсувається за фазою відносно опорного сигналу на різницю фаз.

З виходу первинного вимірювального перетворювача 2 сигнал подається на вхід блоку аналогового множення 3. В результаті перемноження опорного та інформативного сигналу у блоці аналогового множення 3 на його виході отримуємо сигнал, нульова гармоніка якого пропорційна вологості зразка.

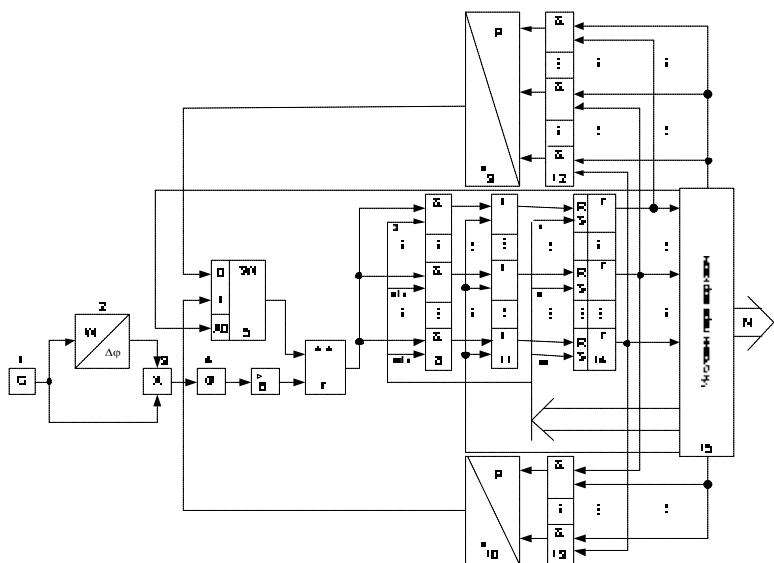


Рис. 4. Структурна схема пристрою для вимірювання вологості

З виходу блоку аналогового множення 3 даний сигнал надходить на фільтр верхніх частот 4, де відбувається відфільтровування змінних у часі сигналів, як вищих гармонік, що були отримані у наслідок перемноження, так і змінного в часі випадкового шуму. В результаті цієї операції на виході фільтру верхніх частот 4 отримується сигнал, що лінійно пов'язує рівень вихідної напруги з вологістю досліджуваного зразка.

Відфільтрована постійна складова напруги з виходу фільтра верхніх частот 4 надходить на вхід нормуючого перетворювача 6, де відбувається його підсилення до рівня, придатного для надійної роботи компаратора 7. З виходу нормуючого перетворювача 6 підсилений сигнал поступає на другий вхід компаратора 7, де порівнюється із сигналом

з виходу аналогового мультиплексора 5, який поступає на перший вхід компаратора 7. На виході компаратора 7 з'являється сигнал логічної одиниці у випадку, якщо рівень напруги на першому вході є вищим за рівень напруги на другому вході. В такому випадку, якщо сигнал на виході аналогового мультиплексора 5 має вищий рівень, ніж сигнал на виході фільтра верхніх частот 6, на виході першого компаратора 5 встановлюється сигнал логічної одиниці, а на виході другого компаратора 6 – сигнал логічного нуля. Якщо на виході компаратора 7 встановлено сигнал логічної одиниці, то відбувається відкривання відповідного логічного елементу I першого каскаду логічних елементів I 8, та при подачі сигналу на наступний паралельний канал першого виходу числового перетворювача 15, через відповідний логічний елемент АБО каскаду логічних елементів АБО 11 обнуляється відповідний RS – тригер каскаду RS – тригерів 14, що був встановлений при подачі сигналу на поточний паралельний канал першого виходу числового перетворювача 15. Якщо ж на виході компаратора 7 встановлюється сигнал логічної одиниці, то обнуління відповідного RS – тригеру каскаду RS – тригерів 14 не відбувається. При закінченні вимірювального перетворення, після подачі сигналу на останній паралельний канал першого виходу числового перетворювача 15 з виходів каскаду RS – тригерів 14 відбувається зчитування числового коду, що пропорційний поточному значенню вологості зразка, числовим перетворювачем 15 через перший вхід та занулення каскаду RS – тригерів 14 шляхом подачі сигналу логічної одиниці на другий вихід числового перетворювача 15. В залежності від необхідної точності вимірювання (величини кроку квантування) в процесі вимірювання сигналом з третього або четвертого виходу числового перетворювача 15 відбувається, відповідно, відкривання другого або

третього каскаду логічних елементів І, в наслідок чого поточний двійковий код з виходу каскаду RS – тригерів 14, через другий 12 та третій 13 каскад логічних елементів І, що використовуються як цифровий ключ, подається, відповідно, на вхід першого 9 або другого 10 цифро-аналогового перетворювача, де відбувається перетворення поточного двійкового коду в величину аналогової напруги з кроком квантування, що відповідає відповідному цифро-аналоговому перетворювачу. З виходу першого 9 або другого 10 цифро-аналогового перетворювача сигнал поступає на відповідний вхід аналогового мультиплексора 5. Відповідно до значення сигналу на п'ятому виході числового перетворювача 15, сигнал з виходу відповідного цифро-аналогового перетворювача (9 або 10), через аналоговий мультиплексор 5 поступає на перший вхід компаратора 7, де порівнюється з сигналом з виходу нормуючого перетворювача 6. Сигнал, що поступає з шостого виходу числового перетворювача 15 є пропорційним поточній вологості зразка, та являється виходом адаптивного пристрою контролю вологості.

Висновки:

1. Установлено аналітичну залежність між вологістю і різницею фаз в несиметричному смуговому сенсорі, який на відмінно від відомих характеризується вищою швидкодією та інваріантністю до неінформативних параметрів навколишнього середовища, що дозволяє значно підвищити якісні показники автоматичної системи стабілізації вологості вихідного продукту.

2. За умови накладання обмежень по вмісту вологості та частоті інформативної хвилі, експериментально доведено адекватність математичної моделі сенсора вологості. Абсолютна похибка моделі не перевищує 2^0 .

3. Встановлено зв'язок між частотою інформаційної хвилі та чутливість сенсора, що дало можливість

корегувати робочий діапазон сенсора, не вносячи зміни в його конструктивне виконання.

4. Розроблено макетний зразок засобу контролю вологості.

Література:

1. Бажанов В.А. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости сливочного масла от степени дисперсности водяной фазы /В.А. Бажанов, Б.В.Корнелюк. – Ярославль, 1970. – 10с.

2. Кухарчук В.В. Дослідження параметрів затухання та зміщення фази електромагнітних хвиль від вологості середовища їх поширення / В.В. Кухарчук, В.В.Богачук, Ю.О.Дмітрієв, В.Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2011. – №4. – С.103 – 106.

3. Зайцев В.В. Электростатическое моделирование полосковых линий / В.В. Зайцев, В.И. Занин, В.М. Трещов – Самара: Универс-груп, 2005 – 52 с.

4. Капуро П.А. Направляющие системы телекоммуникаций / П.А. Капуро, В.Н. Мищенко – Минск, 2007 – 172 с.

5. Берлинер М.А. Электрические методы и приборы для измерения и регулирования влажности. /М. А. Берлинер – М.: Энергия, 1960. – 68 с.

6. Вивчення особливостей електричних властивостей магнітних рідин. Електронний ресурс. – Режим доступу:

7. Воронов А. С. Измерение разности фаз сигналов. / А. С. Воронов // Горизонты образования – 2007. - №9 – С. 1 – 2.