

## ЗАСТОСУВАННЯ АМПЛІТУДНО-ФАЗОВОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ РЕЧОВИН

<sup>1</sup> Національний університет водного господарства та природокористування

### *Анотація*

*В роботі доведено, що повну вологість досліджуваної речовини можна оцінити за вмістом в ній вільної вологи. Запропоновано вдосконалений високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання вологості речовин, в якому можна виключити вплив на результат вимірювання неінформативних складових повного опору давача – опору діелектричних втрат та еквівалентної ємності пусого давача. Розроблено структурну схему вологоміру, в якому реалізується запропонований високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання.*

**Ключові слова:** вільна волога, зв'язана волога, високочастотний метод вимірювання, ємнісний давач, вологомір, структурна схема.

### *Abstract*

*The article shows, that the full dampness of research substance may be estimate from the maintenance of free moisture. Improved high-frequency amplitude-phase method of the measuring of substances dampness, which allows except impact from result of the measuring non-information components of full resistance of the sensing element – dielectric losses resistance and equivalent capacity of the full sensing element has been proposed. Structural diagram of the moisturemeter, in which realize this high-frequency amplitude-phase method of the measuring, has been elaborated.*

**Keywords:** free moisture, bound moisture, high-frequency measurement method, capacitive sensor, a moisturemeter, a structural diagram.

### **Вступ**

Сучасний етап економічного розвитку характеризується підвищенням уваги до питань якості продукції. Тому виникає потреба в забезпеченні новими, більш сучасними та якісними засобами вимірювання. Особливого значення ця задача набуває в питаннях контролю та вимірювання технологічних параметрів у сільському господарстві та харчовій промисловості.

Більшість технологічних процесів у цих галузях потребують оперативного контролю вологості. В наш час на виробничих підприємствах одним з найбільш поширених є метод термогравіметрії. Однак цей метод має суттєві недоліки, такі як трудомісткість та неоперативність контролю.

Одним з шляхів подолання цих недоліків є застосування діелькометричного методу вимірювання. Однак при вимірюванні вологості капілярно-шпаристих матеріалів (речовин) виникають значні похибки, обумовлені непостійністю діелектричних втрат та шпаристості. При цьому намагання виміряти діелектричну проникність на одній частоті можуть призвести до неоднозначних результатів. Вимірювання відносної діелектричної проникності на двох частотах дозволяють значно зменшити похибку від непостійності шпаристості (або густини упаковки матеріалу в давачі). Однак при цьому не виключається похибка від непостійності діелектричних втрат. Тому найбільш поширені серед діелькометричних методів високочастотні резонансні методи вимірювання володіють суттєвим недоліком – значним збільшенням похибки вимірювання при збільшенні діелектричних втрат в досліджуваній речовині. Одним з шляхів подолання відзначеного недоліку є застосування методу визначення складових повного опору досліджуваної речовини.

Складнощі побудови високочастотних ємнісних вологомірів, що реалізують діелькометричний метод вимірювання, полягають в тому, що волога в капілярно-шпаристих матеріалах знаходиться як у вільному, так і у зв'язаному стані, а електричні властивості вільної та зв'язаної вологи різко відрізняються. На практиці більше уваги приділяють вимірюванню вільної вологи, адже саме вона визначає більшість якісних параметрів як готової продукції, так і напівфабрикатів та сировини. Доведемо, що вимірявши кількість вільної вологи в досліджуваній речовині, можна оцінити повну кількість вологи в

цій речовині.

Існує точка зору [1], що дієлькометричні (смісні) вологоміри не можна використовувати для аналізу вологості деяких речовин (наприклад, хлібу), тому що вони реагують на вільну вологу, а в хлібі значна кількість води знаходиться у зв'язаному стані.

Повну кількість води, що міститься у деякій масі такої речовини, визначають співвідношенням

$$B = B_B + B_3, \quad (1)$$

де  $B_B$  – маса вільної води;  $B_3$  – маса зв'язаної води.

Вологість такої речовини у відносних одиницях

$$W = \frac{B}{M}, \quad (2)$$

де  $M$  – маса досліджуваної речовини.

Користуючись співвідношеннями (1) та (2), можна записати

$$W = \frac{B_B}{M} + \frac{B_3}{M} = W_B + W_3, \quad (3)$$

де  $W_B$  – часткова вологість за вмістом вільної води;  $W_3$  – часткова вологість за вмістом зв'язаної води.

Відомо [2, 3], що співвідношення вільної та зв'язаної води в хлібі та деяких інших речовинах для визначених інтервалів часу є величиною сталою, тобто

$$k = \frac{B_B}{B_3} = \frac{MW_B}{MW_3} = \frac{W_B}{W_3}. \quad (4)$$

Таким чином, часткова вологість за вмістом зв'язаної води визначається співвідношенням

$$W_3 = \frac{W_B}{k}. \quad (5)$$

Підставивши співвідношення (5) у співвідношення (3), отримаємо

$$W = W_B + \frac{W_B}{k} = W_B \left( 1 + \frac{1}{k} \right) = W_B \frac{k+1}{k}. \quad (6)$$

Таким чином, вимірявши за допомогою смісного вологоміра часткову вологість за вмістом вільної води  $W_B$ , можна оцінити повну вологість хлібу або іншої речовини, волога в якій знаходиться у двох станах – вільному та зв'язаному.

Чутливим елементом вологоміра є конденсатор, початкова ємність якого

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}, \quad (7)$$

де  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність вакууму (повітря);  $S$  – площа електродних пластин;  $d$  – відстань між електродними пластинами.

При введенні в міжелектродний простір досліджуваної речовини ємність чутливого елемента збільшується, тобто

$$C_1 = \varepsilon \cdot C, \quad (8)$$

де  $C_1$  – ємність чутливого елемента з досліджуваним матеріалом;  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність речовини, що знаходиться в міжелектродному просторі чутливого елемента.

Як видно з співвідношення (8), відносна діелектрична проникність  $\varepsilon$  характеризує ступінь збільшення ємності чутливого елемента при введенні в нього досліджуваної речовини.

Ємність чутливого елемента з досліджуваною речовиною, як вже було відзначено, сильно залежить від діелектричних втрат і в загальному випадку може бути представлена комплексною величиною

$$\dot{C}_1 = C'_1 - jC''_1 = \frac{S}{d} (\varepsilon' - j\varepsilon''), \quad (9)$$

де  $C'_1$  – ємність, що визначає значення заряду на електродних пластинах та пропорційна вологості матеріалу;  $C''_1$  – ємність, що обумовлена струмом втрат в досліджуваному матеріалі;  $\varepsilon'$  – дійсна складова комплексної діелектричної проникності, що пропорційна струмам зміщення;  $\varepsilon''$  – уявна складова комплексної діелектричної проникності, що характеризує втрати енергії в досліджуваній речовині.

Ємність  $C_1$ , на яку реагує вологомір, є модулем комплексної ємності  $\dot{C}_1$  та суттєво залежить від діелектричних втрат, тобто

$$C_1 = \sqrt{(C_1')^2 + (C_1'')^2} = \frac{S}{d} \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} = \frac{S \varepsilon'}{d} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} = \frac{S \varepsilon'}{d \cos \delta}, \quad (10)$$

де  $\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$  – тангенс кута діелектричних втрат.

Таким чином, при вимірюванні вологості капілярно-шпаристих матеріалів зі значними та нестабільними втратами резонансні методи заміщення [4] непридатні, тому що при заповненні чутливого елемента досліджуваною речовиною добротність резонансного контуру буде дуже малою. В цьому випадку визначення моменту резонансу пов'язано зі значними неточностями, що призводить до великих похибок при визначенні вологості.

Метою роботи є вдосконалення високочастотного амплітудно-фазового методу вимірювання вологості речовин.

### Результати дослідження

Теоретичні основи високочастотного амплітудно-фазового методу вимірювання вологості були розглянуті в роботах [5, 6]. Однак суттєвим недоліком цих робіт є те, що в них визначалися складові повного опору досліджуваної речовини в давачі, а не складові повного опору саме досліджуваної речовини (без врахування впливу давача). Тому в цій роботі розглядається вдосконалений високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання вологості досліджуваної речовини, при якому виключається вплив на результат вимірювання неінформативних складових повного опору давача.

Узагальнена еквівалентна схема пустого вимірювального перетворювача, яка складається зі зразкового елемента  $Z_0$  та ємнісного чутливого елемента (паралельно з'єднаних опору діелектричних втрат  $R_0$  та еквівалентної ємності  $C_0$  пустого давача), наведена на рис. 1, а.

Як зразковий елемент можуть використовуватися резистор з опором  $R_0$ , конденсатор ємністю  $C_0$  та котушка з індуктивністю  $L_0$ . Розглянемо використання як зразкового елемента конденсатора.

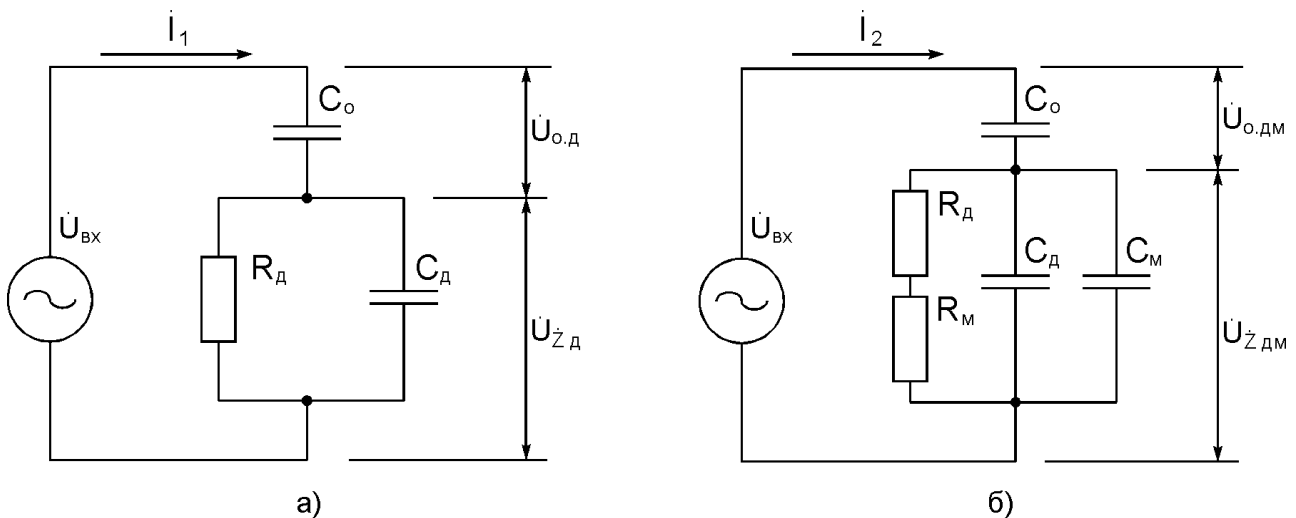


Рис. 1. Узагальнені еквівалентні схеми пустого вимірювального перетворювача (а) та вимірювального перетворювача з досліджуванним матеріалом (б)

Вхідна напруга  $\dot{U}_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} e^{j\varphi_{\text{вх}}}$  викликає в зразковому елементі струм

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{-jX_0 + \dot{Z}_0}, \quad (11)$$

де  $\dot{Z}_0 = \frac{-jX_{C_0} R_0}{R_0 - jX_{C_0}}$  – комплексний опір пустого ємнісного чутливого елемента (давача);  $X_0 = \frac{1}{\omega C_0}$

та  $X_{C_0} = \frac{1}{\omega C_0}$  – опори зразкового елемента (конденсатора) та еквівалентної ємності пустого давача.

Використовуючи співвідношення (11), можна визначити напруги на зразковому ємнісному елементі та пустому ємнісному давачі, які відповідно дорівнюють:

$$\dot{U}_{0,d} = -jX_0 \dot{I}_1 = \frac{jX_0 \dot{U}_{ex}}{jX_0 + \frac{jX_{C_0} R_d}{R_d - jX_{C_0}}} = \frac{U_{ex} X_0 \sqrt{R_d^2 + X_{C_0}^2} \times e^{j\left\{\varphi_{ex} - \arctg \frac{X_{C_0}}{R_d} + \arctg \frac{X_0 X_{C_0}}{R_d(X_0 + X_{C_0})}\right\}}}{\sqrt{R_d^2 (X_0 + X_{C_0})^2 + X_0^2 X_{C_0}^2}}; \quad (12)$$

$$\dot{U}_{Z_0} = \dot{Z}_0 \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{ex} \cdot \frac{-jX_{C_0} R_d}{R_d - jX_{C_0}}}{-jX_0 + \frac{-jX_{C_0} R_d}{R_d - jX_{C_0}}} = \frac{U_{ex} X_{C_0} R_d \times e^{j\left\{\varphi_{ex} + \arctg \frac{X_0 X_{C_0}}{R_d(X_0 + X_{C_0})}\right\}}}{\sqrt{R_d^2 (X_0 + X_{C_0})^2 + X_0^2 X_{C_0}^2}}. \quad (13)$$

Відношення цих напруг та фазовий зсув між ними:

$$A_1 = \frac{|\dot{U}_{Z_0}|}{|\dot{U}_{0,d}|} = \frac{X_{C_0} R_d}{X_0 \sqrt{R_d^2 + X_{C_0}^2}} = \frac{R_d}{X_0 \sqrt{1 + \frac{R_d^2}{X_{C_0}^2}}} = \frac{X_{C_0}}{X_0 \sqrt{1 + \frac{X_{C_0}^2}{R_d^2}}}; \quad (14)$$

$$\varphi_1 = \arg\{\dot{U}_{Z_0}\} - \arg\{\dot{U}_{0,d}\} = \arctg \frac{X_{C_0}}{R_d}. \quad (15)$$

Аналогічно розглянемо узагальнену еквівалентну схему вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом, яка складається зі зразкового ємнісного елемента  $C_0$  та ємнісного чутливого елемента, до складу якого додатково введені опір діелектричних втрат досліджуваного матеріалу  $R_m$  та еквівалентна ємність  $C_m$  досліджуваного матеріалу (див. рис. 1, б).

При цьому вхідна напруга  $\dot{U}_{ex}$  буде викликати в зразковому елементі струм

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{ex}}{-jX_0 + \dot{Z}_{0m}}, \quad (16)$$

де  $\dot{Z}_{0m} = \frac{R_d + R_m}{1 + j \frac{(R_d + R_m)(X_{C_0} + X_{C_m})}{X_{C_0} X_{C_m}}}$  – комплексний опір ємнісного давача з досліджуваним матеріалом (речовиною).

Використовуючи співвідношення (16), можна визначити напруги на зразковому ємнісному елементі та ємнісному давачі з досліджуваним матеріалом, які відповідно дорівнюють:

$$\dot{U}_{0,dm} = -jX_0 \dot{I}_2 = \frac{U_{ex} X_0 \sqrt{(X_{C_0} + X_{C_m})^2 (R_d + R_m)^2 + X_{C_0}^2 X_{C_m}^2}}{\sqrt{(R_d + R_m)^2 (X_0 X_{C_0} + X_0 X_{C_m} + X_{C_0} X_{C_m})^2 + X_0^2 X_{C_0}^2 X_{C_m}^2}} \times e^{j\left\{\varphi_{ex} - \arctg \frac{X_{C_0} X_{C_m}}{(X_{C_0} + X_{C_m})(R_d + R_m)} + \arctg \frac{X_0 X_{C_0} X_{C_m}}{(R_d + R_m)(X_0 X_{C_0} + X_0 X_{C_m} + X_{C_0} X_{C_m})}\right\}}; \quad (17)$$

$$\dot{U}_{Z_{0m}} = \dot{Z}_{0m} \dot{I}_2 = \frac{U_{ex} X_{C_0} X_{C_m} (R_d + R_m) \times e^{j\left\{\varphi_{ex} + \arctg \frac{X_0 X_{C_0} X_{C_m}}{(R_d + R_m)(X_0 X_{C_0} + X_0 X_{C_m} + X_{C_0} X_{C_m})}\right\}}}{\sqrt{(R_d + R_m)^2 (X_0 X_{C_0} + X_0 X_{C_m} + X_{C_0} X_{C_m})^2 + X_0^2 X_{C_0}^2 X_{C_m}^2}}. \quad (18)$$

Відношення напруг, що визначаються формулами (17) та (18), а також фазовий зсув між ними:

$$A_2 = \frac{|\dot{U}_{\dot{z}_{dm}}|}{|\dot{U}_{0,dm}|} = \frac{X_{C_\partial} X_{C_m} (R_\partial + R_m)}{X_0 \sqrt{(X_{C_\partial} + X_{C_m})^2 (R_\partial + R_m)^2 + X_{C_\partial}^2 X_{C_m}^2}}; \quad (19)$$

$$\varphi_2 = \arg\{\dot{U}_{\dot{z}_{dm}}\} - \arg\{\dot{U}_{0,dm}\} = \arctg \frac{X_{C_\partial} X_{C_m}}{(X_{C_\partial} + X_{C_m})(R_\partial + R_m)}. \quad (20)$$

Розглянувши сумісно два останніх співвідношення, можна записати:

$$A_2 = \frac{X_{C_\partial} X_{C_m}}{X_0 (X_{C_\partial} + X_{C_m}) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2}} = \frac{X_{C_\partial} X_{C_m} \cos \varphi_2}{X_0 (X_{C_\partial} + X_{C_m})}. \quad (21)$$

Враховуючи, що з співвідношень (14) та (15)  $X_{C_\partial} = \frac{A_1 X_0}{\sin \varphi_1}$ , розв'яжемо співвідношення (21) відносно  $X_{C_m}$ , в результаті чого отримаємо:

$$X_{C_m} = \frac{A_1 A_2 X_0}{A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1}. \quad (22)$$

Для того, щоб визначити опір діелектричних втрат досліджуваного матеріалу  $R_m$ , перепишемо співвідношення (19) таким чином:

$$A_2 = \frac{R_\partial + R_m}{X_0 \sqrt{1 + \left( \frac{(X_{C_\partial} + X_{C_m})(R_\partial + R_m)}{X_{C_\partial} X_{C_m}} \right)^2}} = \frac{R_\partial + R_m}{X_0 \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \varphi_2}} = \frac{(R_\partial + R_m) \sin \varphi_2}{X_0}. \quad (23)$$

Враховуючи, що з співвідношень (14) та (15)  $R_\partial = \frac{A_1 X_0}{\cos \varphi_1}$ , розв'яжемо співвідношення (23) відносно  $R_m$ , в результаті чого отримаємо:

$$R_m = X_0 \left( \frac{A_2}{\sin \varphi_2} - \frac{A_1}{\cos \varphi_1} \right) = \frac{X_0 (A_2 \cos \varphi_1 - A_1 \sin \varphi_2)}{\sin \varphi_2 \cos \varphi_1}. \quad (24)$$

Таким чином, вимірявши відношення напруг на пустому чутливому елементі та зразковій ємності  $A_1$ , фазовий зсув між цими напругами  $\varphi_1$ , а також відношення напруг на повному чутливому елементі (з досліджуваним матеріалом) та аналогічній зразковій ємності  $A_2$  і фазовий зсув між цими напругами  $\varphi_2$ , можна за допомогою співвідношень (22) та (24) визначити вологість досліджуваного матеріалу:

$$W = K \sqrt{R_m^2 + X_{C_m}^2} = K X_0 \sqrt{\left( \frac{A_2}{\sin \varphi_2} - \frac{A_1}{\cos \varphi_1} \right)^2 + \left( \frac{A_1 A_2}{A_1 \cos \varphi_2 - A_2 \sin \varphi_1} \right)^2}. \quad (25)$$

Структурна схема вологоміру, в якому реалізується запропонований високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання, наведена на рис. 2.

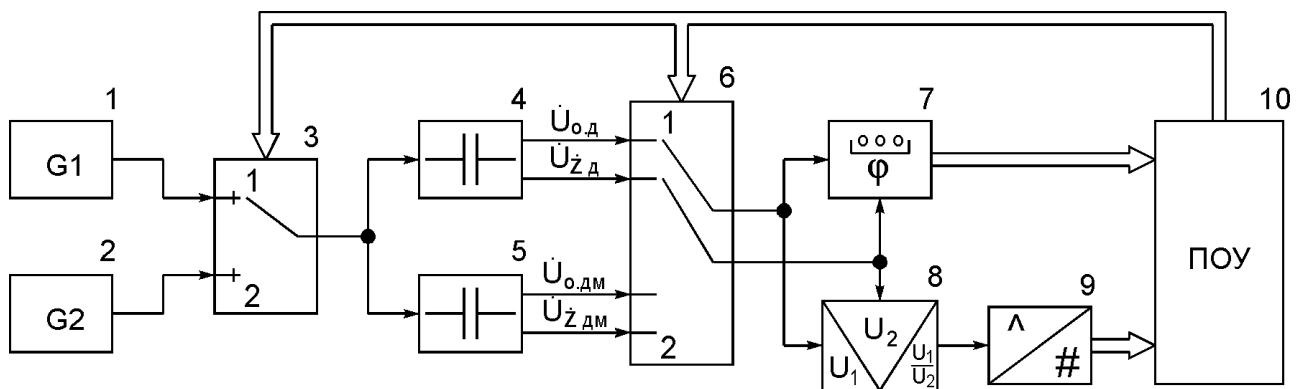


Рис. 2. Структурна схема вологоміру, що реалізує амплітудно-фазовий метод вимірювання

Вологомір складається з генераторів 1 та 2, електронних комутаторів 3 та 6, пустого вимірювального перетворювача 4 та вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом 5, цифрового фазометра 7, вимірювача відношення амплітуд 8, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 9 та пристрою обчислення та управління (ПОУ) 10 [7].

Працює вимірювач таким чином. Генератори 1 та 2 виробляють гармонічні сигнали з частотою відповідно  $f_1$  та  $f_2$ , один з яких (наприклад, з частотою  $f_1$ ) за допомогою електронного комутатора 3 потрапляє на входи пустого вимірювального перетворювача 4 (поєднаних послідовно зразкового конденсатора та пустого давача) та вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом 5 (поєднаних послідовно зразкового конденсатора та давача з досліджуваним матеріалом). Виходи вимірювальних перетворювачів підключені до входів електронного комутатора 6. В перший півперіод комутації на вихід електронного комутатора 6 (на входи цифрового фазометра 7 та вимірювача відношення амплітуд 8) потрапляють напруги з виходу пустого вимірювального перетворювача 4  $\dot{U}_{0,d}$  та  $\dot{U}_{\dot{z}_d}$ , між якими вимірюється фазовий зсув  $\varphi_1$  та відношення їх амплітуд  $A_1$ . Результат вимірювання відношення амплітуд за допомогою АЦП 9 перетворюється в цифровий код та разом з результатом вимірювання фазового зсуву потрапляє на ПОУ 10, де запам'ятовується. В другий півперіод комутації на вихід електронного комутатора 6 потрапляють напруги з виходу вимірювального перетворювача з досліджуваним матеріалом 5  $\dot{U}_{0,dm}$  та  $\dot{U}_{\dot{z}_{dm}}$ , між якими вимірюється фазовий зсув  $\varphi_2$  та відношення їх амплітуд  $A_2$ . Результат вимірювання відношення амплітуд за допомогою АЦП 9 перетворюється в цифровий код та разом з результатом вимірювання фазового зсуву потрапляє на ПОУ 10, де за співвідношенням (25) відбувається обчислення результату вимірювання вологості досліджуваного матеріалу на частоті  $f_1$ . Для зменшення похибки від непостійності шпаристості (або густини упаковки матеріалу в давачі) вимірювання проводять на двох частотах, для чого на входи вимірювальних перетворювачів за допомогою електронного комутатора 3 подається гармонічний сигнал з частотою  $f_2$  і всі вимірювання повторюються на цій частоті.

### Висновки

Доведено, що повну вологість досліджуваної речовини можна оцінити за вмістом в ній вільної води. Запропоновано вдосконалений високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання вологості речовин, в якому можна виключити вплив на результат вимірювання неінформативних складових повного опору давача – опору діелектричних втрат та еквівалентної ємності пустого давача. Розроблено структурну схему вологоміра, в якому реалізується запропонований високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Теплотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. / А. Ф. Курилов, В. М. Козін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 189 с.
2. Дробот В.І. Технологія хлібопекарського виробництва. – К.: Логос, 2002. – С. 365.
3. Мерко І.Т., Моргун В.О. Наукові основи технологія переробки зерна. - Одеса: Друк, 2001-348 с.
4. Технологія хлеба на основе целого зерна пшеницы/ Г.Ф. Пшенишнюк, О.В. Макарова, А.С. Иванова// Харчова наука і технологія. – 2009. – № 1. – С. 75-79
5. Rudyk A., Semenov A., Kryvinska N., Semenova O. Study of phase and amplitude-phase methods for measuring a reactive element quality factor. *Measurement*, Vol. 187, 2022, 110271, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110271>.
6. Рудик А.В., Возняк О.М., Анфілов Р.А. Високочастотний амплітудно-фазовий метод вимірювання вологості речовин//Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – №4. Частина 1. Том 1. С. 163÷169.
7. Рудик А.В., Рудик В.А. Застосування амплітудно-фазового методу для вимірювання вологості речовин//Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання. Матеріали 4-ої науково-практичної конференції студентів і молодих учених. – Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2013. – С. 157÷158.

**Рудик Андрій Вікторович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, e-mail: [a.v.rudyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.v.rudyk@nuwm.edu.ua)

**Ярош Дмитро Русланович** – студент групи АКІТ-52м, кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, e-mail: [yarosh.d\\_ak23@nuwm.edu.ua](mailto:yarosh.d_ak23@nuwm.edu.ua)

**Лісовець Назарій Ігорович** – студент групи АКІТ-52м, кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, e-mail: [lisovets\\_ak23@nuwm.edu.ua](mailto:lisovets_ak23@nuwm.edu.ua)

**Rudyk Andrii Viktorovych** – Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Automation, Electrical Engineering and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, e-mail: [a.v.rudyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.v.rudyk@nuwm.edu.ua)

**Yarosh Dmytro Ruslanovych** – student of group ACIT-52m, Department of Automation, Electrical Engineering and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, e-mail: [yarosh.d\\_ak23@nuwm.edu.ua](mailto:yarosh.d_ak23@nuwm.edu.ua)

**Lisovets Nazariy Ihorovych** – student of group ACIT-52m, Department of Automation, Electrical Engineering and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, e-mail: [lisovets\\_ak23@nuwm.edu.ua](mailto:lisovets_ak23@nuwm.edu.ua)