

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Половинка Дмитро Васильович**

УДК 621.317.39:543.712

**ДВОЧАСТОТНИЙ ПРИЛАД КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ СИПКИХ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР**

Спеціальність 05.11.13 - прилади і методи контролю та  
визначення складу речовин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України, м. Луганськ

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент  
Невзлін Борис Ісакович,  
Східноукраїнський національний університет імені  
Володимира Даля,  
доцент кафедри електромеханіки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
Овчаренко Олександр Іванович,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
професор кафедри вимірювально-інформаційної техніки;

кандидат технічних наук, доцент  
Мельник Сергій Іванович,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
доцент кафедри фізики.

Провідна установа:

Вінницький Національний технічний університет,  
кафедра метрології та промислової автоматики,  
Міністерство освіти і науки України, м. Вінниця

Захист відбудеться: « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми** обумовлена необхідністю підвищення точності контролю вологості сипких сільськогосподарських культур, що дозволяє зменшити час на їх приймання, поліпшити якість продукції і знизити втрати, зв'язані з переробкою сировини. Розроблені до теперішнього часу високочастотні вологоміри сипких матеріалів (СМ) контролювали вологість всього обсягу досліджуваного матеріалу, без врахування параметрів самої частки СМ. На точність контролю вологості сипких матеріалів впливають такі фактори як контактна електропровідність між частками, хімічний склад, електрофізичні і частотні властивості, неоднорідність структури й об'ємна маса матеріалу.

Використання моделі частки СМ, яка найбільш точніше відображає властивості матеріалу у високочастотному електричному полі, і методу розрахунку моделі частки СМ здатні істотно знизити похибку контролю за рахунок виключення впливу на показання приладу контактної електропровідності між частками, розмірів часток, щільності матеріалу. Крім цього, необхідні розробка і використання нового методу поділу активної і реактивної складових провідності матеріалу на різних частотах за допомогою діодно-ємнісних мостів, що дозволить виділити контрольований параметр, який матиме кращу кореляцію з вологістю, ніж у повної провідності всього обсягу матеріалу. Використання такого вологоміра сипких матеріалів у промисловості і сільському господарстві України дозволить поліпшити якість продукції, підвищити оперативність контролю, знизити витрати на випуск продукції (наприклад сушіння) і відповідно зменшити собівартість продукції.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до тем держбюджетних НДР Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля ГН-110-95 "Розвиток теорії розрахунку електромагнітних полів і контролю сипких матеріалів і технологічних потоків", (ДР № 0196U021034), де здобувач був виконавцем 2-х розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення методу і реалізуючого його електричного двочастотного перетворювача з поліпшеними метрологічними характеристиками з метою підвищення точності контролю вологості сипких сільськогосподарських культур. У дисертаційній роботі відповідно до мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити переваги і недоліки сучасних методів контролю і вологомірів, вибрати метод найбільш придатний для контролю вологості сипких сільськогосподарських культур;
- обґрунтувати вибір математичної моделі частки сипкого матеріалу, розробити алгоритм контролю вологості СМ для цієї моделі;
- зробити аналіз існуючих методів виділення активної і реактивної провідності СМ;
- дослідити вихідні характеристики діод-ємнісних мостів (ДЕМ) і визначити вид залежності вихідної характеристики від їхніх параметрів;

- визначити аналітичні залежності вихідної напруги моста від параметрів перетворювача з матеріалом при поділі активної і реактивної складових провідності;
- одержати зворотні апроксимовані функції для залежностей вихідної напруги ДЕМ від провідностей перетворювача, розробити методика зниження похибки контролю провідностей;
- визначити тривалість контролю параметрів перетворювача із сипким матеріалом;
- розробити функціональну схему й алгоритм роботи вологоміра СМ;
- зробити аналіз сучасних мікропроцесорних систем і розробити обчислювальну систему для вологоміра СМ;
- розробити методика одержання градуювальник характеристик вологоміра СМ.

**Об'єкт дослідження:** процес проникнення електричного поля усередину частки СМ, що створює проблемну ситуацію визначення реакції цього матеріалу і знаходження цієї реакції електричним методом.

**Предмет дослідження:** двочастотний ємнісний електричний перетворювач і пристрій роздільного контролю електричних параметрів цього перетворювача зі СМ.

**Методи досліджень:** дослідження в дисертаційній роботі базуються на основних положеннях теорії діелектриків, теорії комутації ланцюгів перемінного струму, теорії електричних ланцюгів, теорії інтегральних і диференціальних числень, теорії комплексної змінної, теорії похибки й апарату спеціальних функцій. Вірогідність аналітичних залежностей, отриманих у дисертаційній роботі, підтверджуються даними експериментів на реальних зразках.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- Створено метод виділення активної і реактивної складових вихідного сигналу ДЕМ. Отримано аналітичні залежності вихідної напруги від параметрів перетворювача.
- Вирішено зворотню задачу по визначенню залежності активної і реактивної провідності від величини вихідної напруги за допомогою апроксимації експериментальних даних, що дозволяють знизити похибку контролю параметрів перетворювача з матеріалом.
- Розроблено схему заміщення діодно-ємнісних мостів і отримані аналітичні залежності для визначення тривалості контролю параметрів перетворювача зі СМ.
- Створено методика одержання градуювальних характеристик вологоміра для різних сільськогосподарських культур.
- На основі методу поділу активної і реактивний складових розроблений алгоритм процесу контролю і розрахунку вологості. Розроблено і випробувано сам вологомір сипких сільськогосподарських культур.
- Визначено аналітичні залежності впливу пристроїв комутації на точність контролю і способи зниження похибки контролю.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- Використання розробленого методу виділення активної і реактивної складової дозволило знизити відносну похибку, приведену до діапазону контролю вологості до 0,3...0,64 % для сільськогосподарських культур.

- Розроблено алгоритм процесу контролю вологості і реалізовано у виді програми для мікроконтролера, застосовуваного у вологомірі, що дозволяє підвищити точність контролю в порівнянні з існуючими вологомірами сільськогосподарських культур.

- Розроблений вологомір при використанні його у виробничо-технічних лабораторіях дозволяє збільшити оперативність контролю вологості СМ при збереженні досить високої точності.

- Створені методики одержання градууювальник характеристик для різних сільськогосподарських культур дозволяють підвищити точність контролю, тому що при цьому враховуються такі фактори, як вид культури і регіон її зростання.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати дисертації одержані здобувачем особисто, серед них: вибір математичної моделі частки; визначення залежностей локальних параметрів СМ від інтегральних параметрів перетворювача з матеріалом; класифікація факторів, що впливають на показання приладу, по ознаках обліку; послідовність і алгоритм контролю вологості; аналітичні залежності і зворотні апроксимовані функції вихідної напруги ДСМ від параметрів перетворювача зі СМ при поділі активної і реактивної складових провідності; методика зниження похибки контролю провідностей; аналітичні залежності тривалості контролю параметрів перетворювача із сипким матеріалом; функціональна схема й алгоритм роботи вологоміра сипких сільськогосподарських культур; аналіз сучасних мікропроцесорних систем і обчислювальна система для вологоміра СМ.

**Апробація результатів дисертації.** Ключові положення дисертації й окремих розділів доповідалися, обговорювалися й одержали схвалення фахівців на: XV Symposium Electromagnetic Phenomena In Nonlinear Circuits. (Liege, Belgium, 1998р.); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці», (Львів, 1999 р.); XVI Symposium Electromagnetic Phenomena In Nonlinear Circuits. (Krakow, Poland, 2000р.); Международной научно-технической конференции «Информационная техника и электромеханика на пороге XXI столетия», (Луганск, 2001 г.); 2-ой Международной научно-технической конференции «Информационная техника и электромеханика», (Луганск, 2003 г.).

**Публікації:** результати дисертації опубліковані в 9 друкованих працях, включаючи 6 статей у виданнях, внесених ВАК у перелік фахових видань, 3 тези доповідей на науково-технічних конференціях і семінарах.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Повний обсяг дисертації 207 стор., 103 ілюстрації з них 4 по тексту і 99 окремо на 38 сторінках, 23 таблиці з них 19 по тексту і 4 окремо на 3 сторінках, 4 додатка на 29 сторінках і список використаних літературних джерел з 109 на 9 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано складність питання контролю вологості сипких сільськогосподарських культур, та обґрунтована актуальність теми дисертації. Сформульована мета та основні задачі роботи, наукова новизна та практична значимість результатів роботи. Зазначено зв'язок цієї роботи з держбюджетними темами, особистий внесок здобувача дисертації та відомості про публікації.

В першому розділі розглянуто три основні електричні методи вимірювання вологості сипких матеріалів: кондуктометричний, височастотний та СВЧ – методи. Вказано на їх переваги та недоліки відносно термогравиметричного методу та одного відносно від другого. Також розглянуто природу вологості у сипкому матеріалі та її поведінку у різних електричних полях. Крім цього розглянуто різні види вологомірів, як однопараметрових, так і багатопараметрових. Вказано їх переваги і недоліки, надані їх технічні характеристики для порівняльного аналізу. На основі порівняльного аналізу встановлені деякі переваги багатопараметрових вологомірів над однопараметровими. Крім цього встановлено, що у існуючих вологомірах не використовується модель частки сипкого матеріалу, та функції, які б зв'язували електрофізичні параметри частки сипкого матеріалу і параметрів усього матеріалу.

Другий розділ присвячено визначенню моделі частки сипкого матеріалу, вимог до приладу контролю вологості СМ та алгоритму контролю вологості СМ. При складанні моделі обсягу часток СМ робиться допущення, що частки мають однакові розміри і форму сфери, протікання струму по ланцюгах часток незалежне (рис. 1).

Рис. 1. Схема заміщення частки СМ по зонах.

Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення діелектрика:

$C_4$  - ємність, що відповідає геометричній ємності й електронній поляризації;  
 $g_3, C_3$  - активна провідність і ємність від дипольно – релаксаційній поляризації;  
 $g_4$  - наскрізна провідність.

Величину  $C_3$  можна знайти з рішення рівняння, що отримане Невзліним Б.І.:

$$g_{01} - g_{02} = C_3 \cdot D \cdot \left( \frac{1}{1 + (D/\omega_2)^2} - \frac{1}{1 + (D/\omega_1)^2} \right), \quad (1)$$

де

Рівняння (1) вирішено за допомогою пакета програм Mathcad 2001:

$$g_3 = C_3 A, \quad (2)$$

$$C_4 = C_{01} - \frac{C_3 g_3^2}{g_3^2 + \omega_1^2 C_3^2} \quad (3)$$

$$g_4 = g_{01} - \frac{g_3 \omega_1^2 C_3^2}{\omega_1^2 C_3^2 + g_3^2} \quad (4)$$

Для одержання активної провідності зони контакту  $g_2$  аналітично вирішуємо рівняння, що отримане Невзліним Б.І.:

$$g_3 + g_4 = \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{g_2 - g_4}{\Pi g_2^2} C_4} \right)^2 g_2 + \left( -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{g_2 - g_4}{\Pi g_2^2} C_4} \right)^2 \frac{g_2 \cdot g_4}{g_2 - g_4} \quad (5)$$

Здобувачем запропонована методика, яка дозволила вирішити рівняння (6):

$$g_2 = \frac{1}{2 \cdot g_3 \cdot \Pi^2} \left( B \pm [C_4 - \Pi(g_3 - g_4)] \cdot \sqrt{B} \right) \quad (6)$$

де  $B = \Pi^2 (g_3 + g_4)^2 + C_4 [C_4 - 2\Pi(g_3 - g_4)]$

$$g_1 = \frac{g_2 \cdot g_4}{g_2 - g_4} \quad (7)$$

(8)

$$C_1 = -\Pi(g_1 + g_2) - C_2 \quad (9)$$

**Третій розділ** роботи присвячено дослідженню методів і пристроїв окремого вимірювання активної та реактивної провідності матеріалів і дослідженню властивостей ДЄМ. Також в цьому розділі розроблено метод і пристрій окремого вимірювання активної і реактивної провідності на високих частотах. Розглянуті методи окремого вимірювання провідності не дозволяють створити пристрій с похибкою вимірювання менш ніж 1% або взагалі не придатні для вимірювання на високих частотах, або дуже складні для створення приладу з автоматичним керуванням при вимірюванні.

В процесі дослідження властивостей ДЄМ було встановлено, що при підвищенні активної провідності у плечах мосту чутливість до реактивної складової знижується і навпаки. Цей ефект використано при створенні ДЄМ, що можуть окремо вимірювати у зазначеному діапазоні відповідні провідності. (рис. 4, 5)

*Рис. 4. ДСМ з виділенням активної складової вихідної напруги.*

*Рис. 5. ДСМ з виділенням реактивної складової вихідної напруги.*

Принцип роботи цих мостів можна зрозуміти за допомогою векторних діаграм на рис. 6. Два ДСМ мають активний опір плеч відповідно 50 Ом та 100 Ом. (рис. 6 а, б).

При внесенні у вимірювальне плече перетворювача з матеріалом, параметри якого  $G_{ИП} = 0,01 \text{ См}$ ;  $Q_{ИП} = 0,01 \text{ См}$ . Результатом такого внесення буде загальна провідність плеча  $Y_c$ . На виході мосту формується простійна напруга, величина якої пропорційна різності між  $Y_c$  та  $G_2$ , а саме  $\Delta Y_{ИП}$ .

Треба зауважити, що різність не векторна, а алгебраїчна – це пов'язано з особливістю роботи ДСМ. При однакових параметрах перетворювача у першому випадку  $\Delta Y_{ИП}$  значно менше ніж у другому.

Аналогічний розгляд можна зробити при виділенні реактивної провідності.

*а*

*б*

*Рис. 6. Векторна діаграма провідності ДСМ при  $G_{ИП} = 0,01 \text{ См}$ ;  $Q_{ИП} = 0,01 \text{ См}$*

*а)  $R_1 = R_2 = 50 \text{ Ом}$ , и б)  $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$*

На рис. 7. показані залежності вихідної напруги від параметрів перетворювача з СМ у діапазоні контролю вологості. З діаграм видно, що вихідна напруга має майже лінійну залежність від параметру, який вимірюється і майже не залежність від параметру, що не вимірюється.



а

б

Рис. 7. Залежність вихідної напруги ДСМ від ємнісної провідності(а) при активній провідності перетворювача рівної: 1 –  $R_{нп} = \infty \text{ Ом}$ , 2 -  $R_{нп} = 100 \text{ Ом}$ ; від активної провідності(б) при ємності перетворювача рівної: 1 –  $C_{нп} = 0 \text{ нФ}$ ; 2 –  $C_{нп} = 80 \text{ нФ}$ .

Винайдена аналітична залежність вихідної напруги ДСМ від параметрів перетворювача з сипким матеріалом при виділенні активної провідності:

(11)

Винайдена аналітична залежність вихідної напруги ДСМ від параметрів перетворювача з сипким матеріалом при виділенні реактивної провідності:

(12)

Формула 11 отримана при складанні схем заміщення (рис. 8) для позитивної та негативного напівперіоду синусоїди, визначення токів в плечах ДСМ. Формула 12 отримана аналогічним шляхом з схеми на рис. 5.

а

б

Рис. 8. Схема заміщення ДСМ з фільтром для позитивного (а) та негативного (б) напівперіоду ВЧ напруги при виділенні активної складової.

На рис 9. показані аналітичні залежності вихідної напруги від параметра, що вимірюється, та експериментальні залежності, які майже повторюють аналітичні. Тому можна вважати, що аналітичні залежності відповідають дійсності.

а

б

Рис. 9. Вихідні характеристики ДСМ при виділенні активної (а) та ємнісної (б) складової: 1 - експериментальна; 2 – аналітична

Вирішена зворотна задача в якій знайдено шляхом апроксимації залежності провідності від напруги ДСМ. Знайдено вид апроксимованих функцій для виділення ємнісної та активної провідності при частоті 5 МГц:

$$U_{\text{вых}} = K1 \cdot G_{\text{ИП}} + K2 \quad (13)$$

$$U_{\text{вых}} = K3 \cdot C_{\text{ИП}} + K4 \quad (14)$$

Знайдено функції, що відображають залежність коефіцієнтів  $K1, K2, K3, K4$  від параметра, що придушується:

$$K1 = 183,99 - 0,0789 \cdot C_{\text{ИП}} + 0,0264 \cdot C_{\text{ИП}}^2 - 0,00537 \cdot C_{\text{ИП}}^{2,5} + 2,77 \cdot 10^{-4} \cdot C_{\text{ИП}}^3 \quad (15)$$

$$K2 = 0,398 + 5,6 \cdot 10^{-4} \cdot C_{\text{ИП}} - 2,17 \cdot 10^{-4} \cdot C_{\text{ИП}}^2 + 4,42 \cdot 10^{-5} \cdot C_{\text{ИП}}^{2,5} - 2,24 \cdot 10^{-6} \cdot C_{\text{ИП}}^3 \quad (16)$$

$$K3 = 0,0141 - 0,2101 \cdot G_{\text{ИП}}^{1,5} + 6,101 \cdot G_{\text{ИП}}^{2,5} - 0,00912 \cdot e^{-G_{\text{ИП}}} \quad (17)$$

$$K4 = 0,0348 + 19,50 \cdot G_{\text{ИП}}^2 + 0,0454 \cdot G_{\text{ИП}}^{0,5} \quad (18)$$

Використання цих функцій дозволяє знизити похибку вимірювань провідності з 3% без урахування параметра, що не вимірюється, до 0,6% з урахуванням за допомогою функцій (15-18). Результати експериментальних досліджень з урахуванням параметра, що не вимірюється, надані в таблиці 1 для частоти 5 МГц. Для другої частоти – 2 МГц залежності і результати аналогічні.

Таблиця 1

Результати визначення ємності й активної провідності по величині вихідного сигналу вимірювального моста для частоти 5 МГц.

Параметри ВП	$C_{\text{ИП}}, \text{нФ}$	0	40	10	20	40	80
	$G_{\text{ИП}}, \text{См}$	$1 \cdot 10^{-2}$	0	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Результати вимірювань	$U_{\text{выхС}}, \text{В}$	0,042	0,232	0,088	0,139	0,236	0,440
	$U_{\text{выхG}}, \text{В}$	2,215	0,357	0,440	0,576	1,029	2,237
Розраховані параметри ВП	$C_{\text{ИП}}, \text{нФ}$	0,151	39,81	10,44	20,27	39,59	80,43
	$G_{\text{ИП}}, \text{См}$	$9,95 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-5}$	$2,49 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$3,07 \cdot 10^{-3}$	$9,95 \cdot 10^{-3}$
Приведена	$\Delta C_{\text{ИП}}$	0,151	0,29	0,44	0,27	0,41	0,43

похибка	$\varepsilon$ , %	0,25	0,24	0,56	0,35	0,48	0,54
	$\Delta G_{ип}$	0,19	$5,03 \cdot 10^{-5}$	0,54	$0,03 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$
	$\varepsilon$ , %	0,2	0,5	0,57	0,34	0,43	0,5

**Четвертий розділ** присвячено визначенню залежностей для розрахунку часу перехідних процесів у ДЄМ, розробці функціональної схеми та алгоритму роботи вологоміра СМ, розробці цифрової та аналогової частин вологоміру.

Для схем ДЄМ, що показані на рис. 4, 5 складені схеми заміщення адекватні по часу перехідних процесів (рис. 10).

а

б

Рис 10. Схема заміщення діодно - емнісного мосту при виділенні активної (а) і реактивної (б) складової провідності.

Для цих схем складена відповідна система диференціальних рівнянь, яка вирішується класичним методом:

Для схеми по рис. 10,а:

Для схеми по рис. 10,б:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 \\ \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + i_2 R_2 = E \\ -i_2 R_2 - \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_3} \int i_3 dt = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 - i_4 = 0 \\ \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + \frac{1}{C_2} \int i_3 dt = E \\ \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + i_2 R_2 = E \\ -i_2 R_2 + L \frac{di_4}{dt} + \frac{1}{C_3} \int i_4 dt = 0 \end{cases} \quad (20)$$

В результаті отримуємо характеристичні рівняння відповідно для ДЄМ з виділенням активної та реактивної складової:

$$\frac{R_2 C^2 p^3 L + 2 L p^2 C + 2 R_2 C p + 3}{C^2 p^2} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{R_2 C p^3 L (C + C_2) + L p^2 C + R_2 p (2C + C_2) + 1}{C^2 p^3 C_2} = 0 \quad (22)$$

Якщо в данні рівняння підставити параметри елементів схем ДЄМ, то отримаємо корені рішення цих рівнянь. Виключивши складові коренів, які визначають частоту коливань, складено рівняння для визначення часу перехідного процесу:

$$i_c = A \cdot e^{pt}, \quad (23)$$

Прийнявши відношення  $i_c/A=0,001$ , визначимо час відповідних перехідних процесів: для ДЄМ з виділенням активної провідності  $t_1=290\text{ мкс}$  та для ДЄМ з виділенням реактивної провідності  $t_1=149\text{ мкс}$ .

Контроль активної і реактивної провідності повинний відбуватися по черзі. Враховуючи складність процесу обробки інформації, виникає необхідність у заміні аналогового сигналу - цифровим і для подальшого обчислення за допомогою мікропроцесорного пристрою. Тому складена блок-схема вологоміра СМ із застосуванням мікропроцесорної системи (рис. 11) та принципова схема цифрової частини вологоміра СМ (рис. 12).

*Рис. 11. Блок - схема вологоміра СМ*

Проаналізувавши, сучасні мікроконтролери можна зробити висновок, що найбільш прийнятним варіантом є вибір мікроконтролера АТ мега 103, тому що для нього не потрібні додаткові пристрої, а розвинена архітектура дозволить швидко обробляти інформацію. Цифровий блок вологоміра СМ складається з мікроконтролера матричної клавіатури, РКІ (рідко – кристалічного індикатору).

На основі функціональної схеми складено алгоритм роботи вологоміра СМ, який складається з шести блоків: блок тестування; блок вимірювання; блок збереження даних; блок сполучення з комп'ютером; блок перегляду даних; блок введення градуовальних характеристик;

*Рис. 12. Принципова схема цифрової частини вологоміра СМ*

**П'ятий розділ** присвячено розробці методики градування приладу контролю вологості СМ по видам культур, а також врахування температурних залежностей провідності для різних сортів сільськогосподарських культур. Також в п'ятому розділі визначені похибки контролю вологості і надійність результатів експерименту.

Фактори, що не змінюються в процесі виробництва, компенсуємо за допомогою обчислювальних пристроїв. Для цього необхідно визначити залежність показання приладу - вологість від локальної ємності частки С1, що має кращу кореляцію з реальною вологістю в порівнянні з іншими локальними параметрами.

$$W=f(C1, a, b, c), \quad (24)$$

де  $a, b, c$  - коефіцієнти, що залежать від хімічного, гранулометричного складів.

Для отримання характеристик градування приладу необхідно провести не менш п'яти вимірювань в усьому діапазоні контролю. Крім цього матеріал повинен бути вже з відомою вологістю. Отримані при цьому показання приладу для С1 з відповідними значеннями вологості складуть данні для апроксимації з допомогою програми «Table Curve 2D».

*Рис. 13. Індикація ємності частки СМ на РКІ.*

Вибравши відповідний номер функції отримаємо коефіцієнти  $a, b, c$ , яку у загальному виді можна представити як суму функцій  $f1, f2$  і вільного члена  $a$ :

$$W = a + b \cdot f1(C1) + c \cdot f2(C1); \quad (25)$$

Потім номер функції, визначений за спеціальною таблицею, та коефіцієнти вводиться у пам'ять мікро контролера (рис.14).

*Рис. 14. Запрошення на введення номера формули і введений номер.*

Аналогічна методика отримання характеристик градування приладу від температури, але треба враховувати особливості пристрою для визначення температури (рис. 15, а). Температура перетворювача з СМ (рис. 15, б) при використанні температурного опірника дільника:

$$t = -30,858 - 0316 \cdot \frac{U_{\text{вых}} \cdot R2}{U_{\text{сс}} - U_{\text{вых}}} \cdot \ln\left(\frac{U_{\text{вых}} \cdot R2}{U_{\text{сс}} - U_{\text{вых}}}\right) + 208,38 / \left(\frac{U_{\text{вых}} \cdot R2}{U_{\text{сс}} - U_{\text{вых}}}\right)^{0,5} \quad (26)$$

а

б

*Рис. 15. Температурний опірний дільник (а) і вимірювальний перетворювач СМ (б).*

На рис. 16 показано загальний вигляд вологоміру сипких сільськогосподарських культур ІВСМ-1.

*Рис. 16. Вологомір сипких сільськогосподарських культур ІВСМ-1.*

Дачний прилад було випробувано на шести видах сипких сільськогосподарських культур, для яких були отримані характеристики градування приладу.

В таблиці 1 наведені результати випробування вологоміра *IVCM-1*. Абсолютна похибка вимірювань коливається від 0,135% у пшениці до 0,36% у кукурудзі (виключення жито 0,541%). Коефіцієнт надійності отриманих результатів при цьому складає 0,95, що відповідає вимогам держстандарту України.

Відповідно до технічної документації на мікроконтролер AT mega 103 помилка перетворення убудованого АЦП складає половину молодшого розряду (1/2 МіPSa). Це означає, що напруга на виході вимірювального моста буде мати похибку:

$$\varepsilon_{\delta} = \frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{0,0017}{3,5} \cdot 100\% = 0,049\% \quad (27)$$

Відносна похибка, викликана апроксимацією складає  $\varepsilon_a = 0,6\%$ . Тому сумарна відносна похибка визначена як:

$$\varepsilon_{\text{ин}} = \sqrt{\sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2} = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_a^2} = \sqrt{0,049^2 + 0,6^2} = 0,602\% \quad (28)$$

Таблиця 2.

Результати випробування вологоміра *IVCM-1*

№ п/п	Культура і сорт	Число вим-нь	$k_{\alpha}$	$D(W)$	$\sigma = \sqrt{D}$	$\Delta W$	$\varepsilon, \%$
1.	Пшениця «Одеська-267»	17	2,11	0,00412	0,0642	$\pm 0,135$	1,227
2.	Гречка «Сумчанка»	15	2,13	0,0213	0,146	$\pm 0,311$	2,08
3.	Просо «Миронівське-51»	15	2,13	0,024	0,155	$\pm 0,330$	2,2
4.	Жито «Харківське-88»	16	2,12	0,065	0,255	$\pm 0,541$	3,61
5.	Кукурудза «Джубиле»	17	2,11	0,0253	0,153	$\pm 0,323$	2,15
6.	Кукурудза вітчизняної селекції (суміш сортів)	16	2,12	0,0287	0,170	$\pm 0,360$	2,4

Знаючи інструментальну й експериментальну похибки, визначено методичну:

$$\varepsilon_{\text{мет}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{експ}}^2 - \varepsilon_{\text{ин}}^2} = \sqrt{1,227^2 - 0,602^2} = 1,069\% \quad (30)$$

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-практична задача по підвищенню точності контролю вологості сипких сільськогосподарських культур.

Основні висновки і результати.

1. Враховуючи переваги та недоліки існуючі вологомірів сипких сільськогосподарських культур обрано високочастотний метод контролю. У вологомірах, що не враховують поділ на зону частки і міжчасткового простору похибка складає від  $\pm 0,5\%$  до  $\pm 1,0\%$  вологості.

2. Обґрунтовано вибір математичної моделі частки, поведження якої у високочастотному полі адекватно реальному. На підставі обраної моделі частки СМ визначені послідовність і розроблено алгоритм контролю вологості. Визначено залежності локальних параметрів СМ від інтегральних параметрів усього перетворювача з матеріалом.

3. На основі аналізу методів виділення активної і реактивної електропровідності СМ, можна затверджувати, що пристрої, які реалізують ці методи, не можуть формувати вихідний сигнал, пропорційний провідностям і мають похибку більш 1%.

4. При дослідженні вихідних характеристик ДЕМ встановлено, що при збільшенні активної провідності в плечах ДЕМ знижується чутливість до ємнісної складовий, а при збільшенні реактивної знижується до активній складовий.

5. Визначено аналітичні залежності вихідної напруги ДЕМ від параметрів перетворювача зі СМ при поділі активної і реактивної складових провідності.

6. Одержано зворотні апроксимовані функції для залежностей вихідної напруги ДЕМ від провідностей перетворювача і розроблена методика зниження похибки контролю провідностей, що дозволяє контролювати з приведеною похибкою 0,6%.

7. Визначено аналітичні залежності тривалості контролю параметрів перетворювача із сипким матеріалом. При використанні розроблених схем ДЕМ час, коли процес встановиться складає не більш 300 мкс.

8. На підставі вимог до сучасних приладів контролю, розроблені функціональна схема й алгоритм роботи вологоміра сипких сільськогосподарських культур.

9. Проаналізовано сучасні мікропроцесорні системи і розроблена обчислювальна система для вологоміра СМ, що дозволяє перетворювати аналогову напругу з виходу ДЕМ у цифрову, робити обчислення локальних і інтегральних провідностей, тривалий час без напруги зберігати результати, і до 100 характеристик градування приладу для різних матеріалів, а так само переглядати результати, робити самотестування і пересилання результатів на комп'ютер.

10. Створено методику одержання характеристик градування вологоміра СМ, що дозволяє одержати для різних матеріалів характеристики приладу з коефіцієнтом змішаної кореляції не менш 0,998. Це дозволяє значно знизити похибку контролю з 0,5 % при визначенні вологості за інтегральними параметрами до 0,36 % вологості при контролі за локальними параметрами (за винятком жита - 0,541 %).

11. Створений прилад контролю вологості запроваджено у виробництво на сільськогосподарських підприємствах Луганської області. Розроблена технічна документація на прилад.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. В.І. Nevzlin, Т.Я. Gorazdovskiy, Yu.Yu. Dyachenko, D.V. Polovinka. The method of error decrease in measurement of conductance by the diode-capacitance bridge // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: СУДУ. – 1999. – №6. – С. 105-109.

Здобувачем визначена методична похибка при внесенні в плечі діодно-ємнісного моста додаткових ємностей.

2. Б.И. Невзлин, Д.В. Половинка, Ю.Ю. Дьяченко. Разработка и исследование устройства для измерения емкости и активной проводимости двухполосника // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Далія. – 2002. – №1. – С. 42-51.



Здобувачем розроблено ДЕМ для контролю реактивної провідності перетворювача зі СР і визначені залежностей вихідної напруги від параметрів перетворювача.

3. Б.И. Невзлин, В.П. Себко, М. В. Загирняк, Ю.Ю. Дьяченко, Д.В. Половинка. Нелинейные диодные мосты с импульсным выходом // Интегровані технології та енергозбереження – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – №4. – С. 112-116.

Здобувачем визначено коефіцієнт стабілізації вихідного сигналу ДЕМ з обліком максимальних можливих похибок контролю амплітудної і вихідної напруг.

4. Д.В. Половинка, Б.И. Невзлин, В.В. Дядичев. Разработка цифровой части влагомера сыпучих материалов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля. – 2002. – №8. – С. 88-94.

Здобувачем розроблено функціональну схему вологоміра СР, проаналізовано існуючі мікропроцесорні системи та складено алгоритму роботи вологоміра.

5. Б.И. Невзлин, В.П. Себко, Д.В. Половинка, Ю.Ю. Дьяченко. Диодно-емкостные мосты с последовательным и параллельным включением плеч // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ» – 2002. – №9. – С. 81-86.

Здобувачем знайдено аналітичні залежності часу від параметрів діодно-емнісного моста для моментів відкриття і закриття діодів двочастотних ДЕМ.

6. Б.И. Невзлин, Д.В. Половинка. Длительность контроля RC параметров высокочастотными мостами // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля. – 2003. – №4. – С. 101-105.

Здобувачем винайдено схема заміщення і метод розрахунку часу проходження перехідних процесів для ДЕМ з виділенням активної провідності.

7. B.I. Nevzlin, Yu.Yu. Dyachenko D.V. Polovinka. Calculation characteristic of nonlinear diode bridge of the direct-alternating current // XV Symposium electromagnetic phenomena in nonlinear circuits. – Liege (Belgium). – 1998. – P. 230-232.

Здобувачем визначено коефіцієнт стабілізації вихідного сигналу діодно-емнісного мосту з урахуванням максимальних похибок контролю вихідної напруги.

8. Невзлин Б.И., Дьяченко Ю.Ю., Половинка Д.В. Математическое моделирование электрофизических свойств зернистого материала с использованием электромагнитного инварианта. // Тези доповідей 3-ої Міжнародної науково - технічної конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці». – Львів: ДУ «Львівська політехніка». – 1999. – С. 191-192.

Здобувачем на основі експериментальних даних винайдено апроксимовані залежності абсолютної вологості і густини СР від електричних величин, що корелюють з ними.

9. B.I. Nevzlin, M.V. Zagirnyak, Yu.Yu. Dyachenko, D.V. Polovinka. One – and multi-frequency diode-capacitor bridges invariant with respect to amplitude of a supply voltage current // XVI Symposium electromagnetic phenomena in nonlinear circuits. – Krakow (Poland). – 2000. – P. 183-185.

Здобувачем розрахована методична похибка при внесенні до двополюсника активної провідності та ємності.

## АНОТАЦІЇ

Половинка Дмитро Васильович. Двочастотний прилад контролю вологості сипких сільськогосподарських культур. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю і визначення складу речовин. – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ 2004.

Дисертація присвячена дослідженню і розробці двочастотних багатопараметричних електричних методів і приладів контролю вологості сипких сільськогосподарських культур.

В роботі розроблено метод окремого виміру активної і реактивної провідності вимірювального перетворювача із сипким матеріалом, який дозволяє значно підвищити точність контролю вологості сипких сільськогосподарських культур. Розроблена методика одержання характеристик градування приладу за допомогою самого приладу та комп'ютерної програми. Отримано аналітичні залежності вихідної напруги діодно-ємнісного мосту від параметрів перетворювача з сипким матеріалом, та знайдені зворотні залежності параметрів перетворювача від вихідної напруги мосту, що дозволяє порівняно з резонансним методом та методом вимірювання амплітуди і фази знизити відносну похибку контролю провідності з 2% до 0,6%. Підвищення точності контролю вологості дозволить знизити витрати часу на приймання сировини і відпустка продукції, підвищити якість продукції.

На підставі проведених досліджень розроблено алгоритм контролю вологості сипких сільськогосподарських культур з використанням розроблених метода окремого вимірювання та методики отримання характеристик градування приладу. Розроблена функціональна схема вологоміра, а також принципова схема приладу контролю вологості, які реалізують розроблений алгоритм контролю і вибрали в себе найсучасніші технології приладобудування. Випробування вологоміру на реальних зразках показало високу точність контролю, надійність та оперативність, що підтверджується отриманими результатами.

**Ключові слова:** прилад контролю вологості, об'єкт контролю, чутливість приладу, перетворювач, швидкодія приладу.

Половинка Дмитрий Васильевич. Двухчастотный прибор контроля влажности сыпучих сельскохозяйственных культур. – Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск 2004.

Диссертация посвящена исследованию и разработке двухчастотных многопараметрических электрических методов и приборов контроля влажности сыпучих сельскохозяйственных культур.

Повышение точности приборов и методов контроля, в том числе и влагомеров, является одной из основных задач неразрушающего контроля.

В диссертации показан выбор модели сыпучего материала, а также преимущества и недостатки данной модели. Кроме этого представлена методика расчета усредненных электрофизических параметров частицы по электрическим параметрам всего преобразователя с сыпучим материалом. Использование такой модели для расчета позволит снизить погрешность контроля за счет снижения влияния на показания прибора контактной проводимости.

В работе представлена разработка метода отдельного измерения активной и реактивной проводимости преобразователя с сыпучим материалом, который позволяет значительно повысить точность контроля влажности сыпучих сельскохозяйственных культур. Данный метод позволяет снизить погрешность контроля за счет подавления влияния активного или реактивного параметра на показания прибора, а также уточнение контролируемого параметра по величине подавляемого.

Получены аналитические зависимости выходного напряжения диодно-емкостного моста от параметров преобразователя с сыпучим материалом, и найдены обратные зависимости параметров преобразователя от выходного напряжения моста, который позволяет по сравнению с резонансным методом и методом измерения амплитуды и фазы снизить относительную погрешность контроля проводимости с 2 % до 0,6 %

Разработана методика получения характеристик градуировки прибора с помощью самого прибора и компьютерной программы. Это позволяет использовать один и тот же прибор для контроля различных видов сельскохозяйственных культур. Так как в зависимости от области произрастания, сорта культуры, почвы и других факторов значительно изменяется химический состав, необходимо учитывать эти факторы. Наиболее приемлемым способом учета является использование градуировочных характеристик прибора, которые получены экспериментальным путем. Разработанная методика позволяет значительно сократить время на проведение исследований по определению характеристик градуировки прибора, а также упростить процесс внесения их в память микроконтроллера. Следует заметить, что коэффициент корреляции характеристик градуировки прибора составил для различных культур не менее 0,998, при этом в кривых отсутствовали экстремумы и разрывы.

Повышение точности контроля влажности разрешит снизить затраты времени на прием сырья и отпуск продукции, повысить качество продукции и снизить затраты времени и расход энергии на сушку.

На основании проведенных исследований разработан алгоритм контроля влажности сыпучих сельскохозяйственных культур с использованием разработанных метода отдельного измерения проводимости и методики получения характеристик градуировки прибора. При составлении алгоритма была учтена возможность исключения влияния случайной погрешности на показания прибора. Алгоритм реализует работу прибора в диалоговом режиме (как ПК), а также учитывает все возможности микроконтроллера: сопряжение с ПК, самотестирование и исключение выдачи результата контроля при наличии неисправности или при выходе за допустимые пределы тестируемых параметров, например, напряжение генератора.

Разработана функциональная схема влагомера, а также принципиальная схема прибора контроля влажности, которые реализуют разработанный алгоритм контроля и вобрала в себя наиболее современные технологии приборостроения. Испытание влагомера на реальных образцах показало высокую точность контроля, надежность и оперативность, которая подтверждается полученными результатами. В результате испытаний на реальных образцах было установлено, что в диапазоне от 12 % до 35 % влажности абсолютная погрешность прибора составила от 0,1 % до 0,3 % влажности, что значительно меньше по сравнению с аналогичными приборами, которые имеют абсолютную погрешность от 0,5 % до 1,0 % влажности.

**Ключевые слова:** прибор контроля влажности, объект контроля, чувствительность прибора, преобразователь, быстрдействие прибора.

Polovinka D.V. Two-frequency device of the control of moisture of loose agricultural cultures. - Manuscript.

The dissertation on reception of a scientific degree of the candidate of engineering science behind a speciality 05.11.13 - devices both methods of the control and definition of structure of substances. – East-Ukrainian national university of a name V. Dal, Lugansk 2004.

The dissertation is devoted to research and development two-frequency of multiparametrical electrical methods and devices of the control of moisture of loose agricultural cultures.

In work the method of separate measurement of active and reactive conductivity of the measuring converter with a loose material is developed which allows considerably increase accuracy of the control of moisture of loose agricultural cultures. The technique of reception of the characteristics of graduation of the device with the help of the device and computer program is developed. The analytical dependences of an initial voltage of the diode-capacitor bridge on parameters of the converter with a loose material are received, and the return dependences of parameters of the converter on a target voltage of the bridge are found which allows in comparison with a resonant method both method of measurement of amplitude and phase to lower a relative error of the control of conductivity from 2 % to 0,6 %.

The increase of accuracy of the control of moisture will permit to lower expenses of time for reception of raw material and holiday of production, to increase quality of production and to lower expenses of time and charge of energy on drying.

On the basis of the carried spent researches the algorithm of the control of moisture of loose agricultural cultures with use developed of a method of separate measurement and technique of reception of the characteristics of graduation of the device is developed. The function chart device of the control of moisture is developed, and also basic circuit of the device of the control of moisture, which realize the developed algorithm of the control and have incorporated the most modern technologies of instrument making. The test device of the control of moisture on real samples has shown high accuracy of the control, reliability and efficiency, which proves to be true by the received results.

**Key words:** device of the control of moisture, object of the control, sensitivity of the device, converter and response of the device.