цилиндров // Автометрия. – 1995.– №6. – С.69–74. 3. Non-contact dimensional gage for turned parts // International Class: G01J 003/45 / Патент США № 4880991 від 14.11.1989 р. 4. Method and system for measuring characteristics of curved features // International Class: G06K 009/36 / Патент США № 6724947 від 20.04.2004 р. 5. Робототехника. / К.Фу, Р.Гонсалес, К.Ли.–М.,1989.– С.336–339.

УДК 621.317

Р.М. Івах
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ЄМНІСНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОМІРА СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Описано актуальність вимірювання вологості сипких матеріалів, проаналізовано конструкції ємнісних первинних перетворювачів, подана їх коротка класифікація. Автор рекомендує для зменшення впливу висоти засипки та для кращого ущільнення досліджуваного сипкого матеріалу і відповідно постійного та рівномірного контакту матеріалу з електродами використовувати ємнісний перетворювач циліндричного типу, де як внутрішній електрод взято конус.

The urgency of measurement of humidity of bulk materials is described, the designs of capacitive primary converters, their introduced brief classification are parsed. The writer recommends for reduction influencing of an altitude of a filling and for the best seal of investigated bulk material and accordingly of constant and even contact of a stuff to welding rods to use the capacitive converter of a cylindrical type, where as an internal welding rod the tumulus is taken.

Вступ

Електровимірювальна техніка нині володіє усталеним комплексом методів та засобів вимірювання всіх електричних величин. Точність та надійність електричних вимірювальних приладів невпинно зростає. Навпаки, вимірювання та контроль неелектричних величин, які займають значну частку в процесах автоматизації, перебувають в найбурхливішому періоді свого розвитку: нові принципи вимірювання з'являються та зникають дуже швидко, і лише після їх ретельного аналізу можуть бути визначені оцінки для окремих методів. Однак і у цій галузі вже помітне прагнення до уніфікації для підвищення продуктивності праці проектувальників, котрі б при використанні уніфікованих елементів могли б більше уваги приділяти якості проектування нових та підвищенню надійності відомих засобів вимірювання.

Серед розмаїття неелектричних величин [1], які вимагають постійного контролю, значне місце займає вологовміст сипких матеріалів, адже вимірювання вологості сипких сільськогосподарських культур та проектування експрес-вологомірів є актуальною задачею для України, оскільки стратегічним напрямком розвитку економіки є виробництво зерна та продуктів його переробки. Точний контроль вмісту вологи, зокрема в зерні, сприяє зниженню витрат, пов'язаних із його сушінням і збереженням. Можливість точного визначення вологості зерна в потрібний момент, а особливо під час збирання врожаю – є тим чинником, що відокремлює прибуток від збитків. Експрес-вологоміри застосовують при прийманні зерна від хлібоздавальників, при взаємних розрахунках, для контролю при зберіганні та переробці зерна.

Серед розмаїття непрямих методів вимірювання вологості сипких матеріалів найперспективнішим є діелькометричний метод вимірювання [2], оскільки цей метод має ряд переваг, серед яких:

- обладнання, яке використовується при діелькометричному методі, просте в експлуатації та має малу масу і габарити;

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

• вимірювання можна автоматизувати;

• цей метод є універсальним: він придатний для визначення вологовмісту різних властивостей сипких матеріалів;

• при вимірюванні досліджуваний матеріал не руйнується.

Цей метод можна реалізувати за допомогою ємнісних первинних перетворювачів. Адже ні в кого не виникне сумніву те, що незважаючи на досягнутий прогрес в технології та проектуванні, значення похибок ємнісних сенсорів, та й взагалі первинних перетворювачів, становлять десяті частки відсотка і лише в окремих випадках – соті частки відсотка. Кращих характеристик первинних перетворювачів можна досягти, здійснюючи індивідуальну підгонку, калібрування тощо. Однак для масового застосування ці операції не завжди придатні і вони дорогі.

Отже, нині від точності, чутливості, швидкодії, стійкості до зовнішніх впливів, стабільності первинних перетворювачів практично повністю залежить повнота та достовірність отримуваної вимірювальної інформації про стан досліджуваних об’єктів і процесів.

Класифікація ємнісних первинних перетворювачів діелькометричних вологомірів сипких матеріалів

Основною вимогою, яка ставиться до первинних перетворювачів вологомірів сипких матеріалів, є вимога відтворюваності чинників, які впливають на результати вимірювання. У зв’язку з цим у деяких первинних перетворювачах передбачаються додаткові пристрої, призначені для створення однакових умов підготовки або введення проби досліджуваного сипкого матеріалу в міжелектродний простір. Крім того, до конструкції первинного перетворювача ставлять й інші вимоги, наприклад: невелика вага (особливо в переносних вологомірах), високий опір ізоляції, який повинен бути в кілька разів вищим від максимального опору матеріалу між електродами. Остання вимога вимагає необхідності ретельного очищення і спостереження за станом ізоляції під час експлуатації, особливо при можливості забруднення або зволоження ізоляції досліджуваним матеріалом.

Первинні перетворювачі діелькометричних вологомірів за принципом дії можна поділити на дві групи:

1) первинні перетворювачі без ущільнення матеріалу;

2) первинні перетворювачі з примусовим ущільненням матеріалу в міжелектродному просторі.

Основним недоліком первинних перетворювачів першої групи є різний ступінь ущільнення матеріалу між електродами, що сильно впливає на визначення необхідних електричних характеристик досліджуваного матеріалу. Швидкість і висота падіння матеріалу при його введенні в первинний перетворювач, випадкові струсання і удари по первинному перетворювачі змінюють ущільнення. Для отримання відтворюваних умов вимірювання необхідні спеціальні пристосування і дотримання визначених методик введення проби досліджуваного матеріалу із забезпеченням постійності висоти і швидкості падіння матеріалу в таких первинних перетворювачах. Ще важливішою є та обставина, що при вимірюванні ємності (діелектричної проникності) сипких матеріалів результат вимірювання залежить від стану поверхні окремих зерен (наприклад, від її шорсткості, запиленості). Також сильно впливає на результати гранулометричний склад матеріалу. У таких перетворювачах важко підтримувати постійний опір контакту матеріалу з електродами.

Враховуючи вищевказані причини, первинні перетворювачі без ущільнення досліджуваного матеріалу варто застосовувати лише в автоматичних вологомірах, у яких постійність ущільнення матеріалу забезпечена самим вимірюваним об’єктом і у яких повністю використовують переваги цього типу первинних перетворювачів — простота конструкції і зручність встановлення на потоці сипких матеріалів.

У ємнісних первинних перетворювачах діелькометричних вологомірів найчастіше застосовують примусове ущільнення проби сипкого матеріалу.

Мета досліджень

Зважаючи на вищенаведені міркування, було встановлено мету наукових досліджень – моделювання, дослідження та порівняльний аналіз конструкцій ємнісних первинних перетворювачів діелькометричного вологоміра сипких матеріалів.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Математичне моделювання конструкцій ємнісних первинних перетворювачів

Автором змодельовано за допомогою програмного пакета MATLAB 6.5 та досліджено конструкції наступних ємнісних первинних перетворювачів (з ущільненням сипкого матеріалу), зображених на рис. 1.

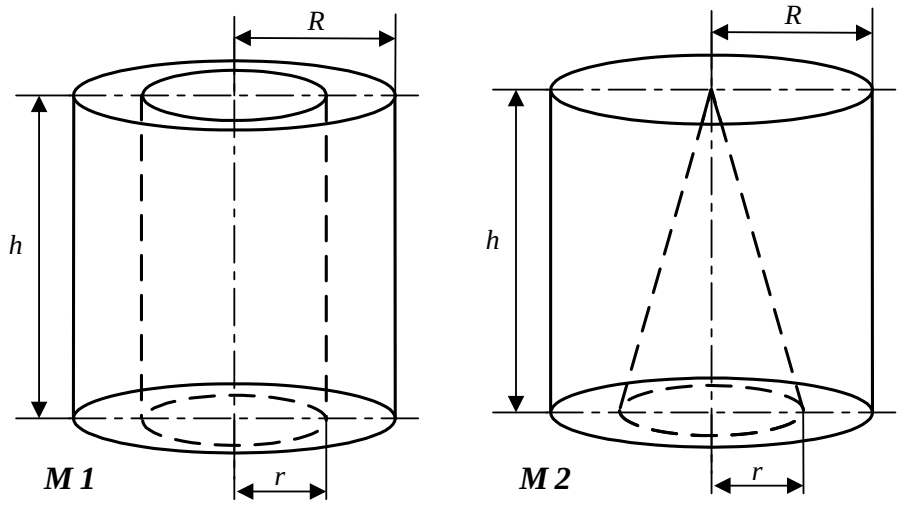


Рис. 1. Досліджувані конструкції ємнісних первинних перетворювачів

Автор пропонує використовувати ємнісний первинний перетворювач конструкції *M2*, оскільки вважає, що ця конструкція дасть змогу зменшити вплив висоти засипання та для кращого ущільнення досліджуваного сипкого матеріалу і відповідно постійного та рівномірного контакту матеріалу з електродами.

Методика розрахунку ємності ємнісного первинного перетворювача нестандартної конструкції

Для конструкції *M1* (рис. 1, а) відома формула розрахунку ємності:

$$C = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{h}{\ln\frac{R}{r}}, \tag{1}$$

де h – висота циліндра, R – радіус зовнішнього циліндра, r – радіус внутрішнього циліндра.

Саме цю залежність використано для виведення формули обчислення ємності для конструкції *M2* (рис. 1, б), попередньо розділивши внутрішній конус на циліндри нескінченно малої висоти dx (рис. 2), тоді ємність між зовнішнім циліндром радіуса R та циліндром нескінченно малої висоти dx радіуса z визначалася так, як зображено на рис. 2.

$$dC = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{dx}{\ln\frac{R}{z}}, \tag{2}$$

Ввівши необхідні позначення змінної (поточної) висоти x та змінного радіуса z відносно висоти h, отримаємо такі співвідношення:

$$tg\alpha = \frac{r}{h}; \quad z = r - tg\alpha \cdot x = r - \frac{r}{h} \cdot x; \tag{3}$$

З урахуванням (2) та (3) одержимо таку залежність для визначення ємності первинного перетворювача конструкції *M2*:

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

$$C = \int_0^h 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{dx}{\ln\left(\dfrac{R}{r - \dfrac{r}{h}\cdot x}\right)}, \tag{4}$$

де h – висота циліндра, яка дорівнює висоті конуса, R – радіус зовнішнього циліндра, r – радіус основи конуса.

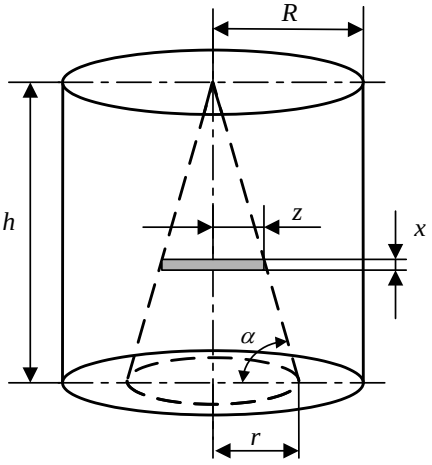


Рис. 2. До методики визначення ємності конструкції

Як ми бачимо, на результат визначення ємності первинного перетворювача істотно впливає висота засипання досліджуваного сипкого матеріалу. Оскільки діелектрична проникність ε_{CM} сипкого матеріалу відрізняється від діелектричної проникності повітря ε_n, то ємнісний перетворювач можна представити як два паралельно з'єднані конденсатори. Конденсатор C_1 утворений частиною електродів і діелектриком (сипким матеріалом), конденсатор C_2 – рештою електродів та діелектриком – повітрям. Ємність перетворювача $C = C_1 + C_2$.

У реальних конструкціях ємнісних перетворювачів для забезпечення механічної міцності та зменшення відносного переміщення електроди фіксуються за допомогою прокладок, шайб тощо. Наявність таких конструктивних елементів, а також виводів провідників для під'єднання перетворювача до вимірювальної схеми призводить до того, що перетворювач має так звану конструктивну складову ємності, яка не змінюється залежно від висоти засипання перетворювача сипким матеріалом. Тоді загальна ємність перетворювача дорівнює ємності трьох конденсаторів, з'єднаних паралельно, тобто:

$$C = C_0 + C_1 + C_2, \tag{5}$$

де C_0 – ємність конструктивних елементів перетворювача.

Як випливає з (5), ємність перетворювача для досліджуваних конструкцій буде подана так:

для конструкції М1:

$$C = C_0 + 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{CM}\frac{l}{\ln\dfrac{R}{r}} + 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_n\frac{h-l}{\ln\dfrac{R}{r}}, \tag{6}$$

для конструкції М2:

$$C = C_0 + 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{CM}\int_0^l \frac{dx}{\ln\left(\dfrac{R}{r - \dfrac{r}{h}\cdot x}\right)} + 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_n\int_l^h \frac{dx}{\ln\left(\dfrac{R}{r - \dfrac{r}{h}\cdot x}\right)} \tag{7}$$

де l – висота засипки.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Дослідивши математичні моделі цих конструкцій ємнісних первинних перетворювачів, отримали залежності ємності первинного перетворювача від діелектричної проникності сипкого матеріалу, яка істотно залежить від вологості матеріалу при однаковому об'ємі засипання досліджуваного матеріалу (рис. 3).

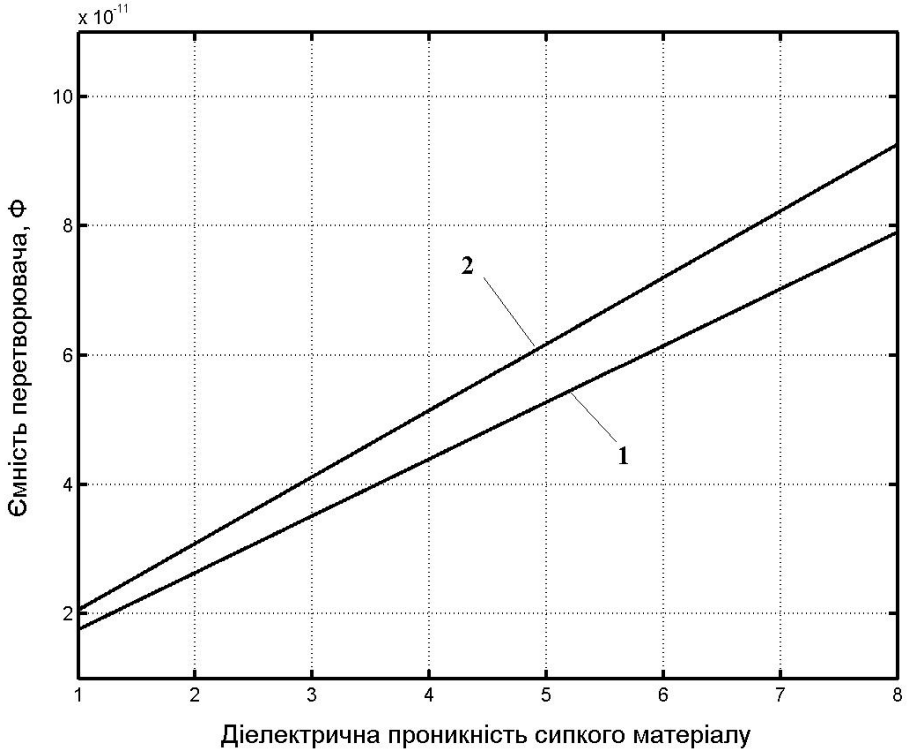


Рис. 3. Залежності ємності первинного перетворювача від діелектричної проникності сипкого матеріалу: 1 – для конструкції М1, 2 – для конструкції М2

Апроксимувавши отримані залежності лінійною апроксимацією і продиференціювавши їх, визначили чутливість для кожної конструкції первинного перетворювача:

для конструкції М1:

$$\frac{dC}{d\varepsilon} = 0.878214 \cdot 10^{-11},$$

для конструкції М2:

$$\frac{dC}{d\varepsilon} = 1.02876 \cdot 10^{-11}.$$

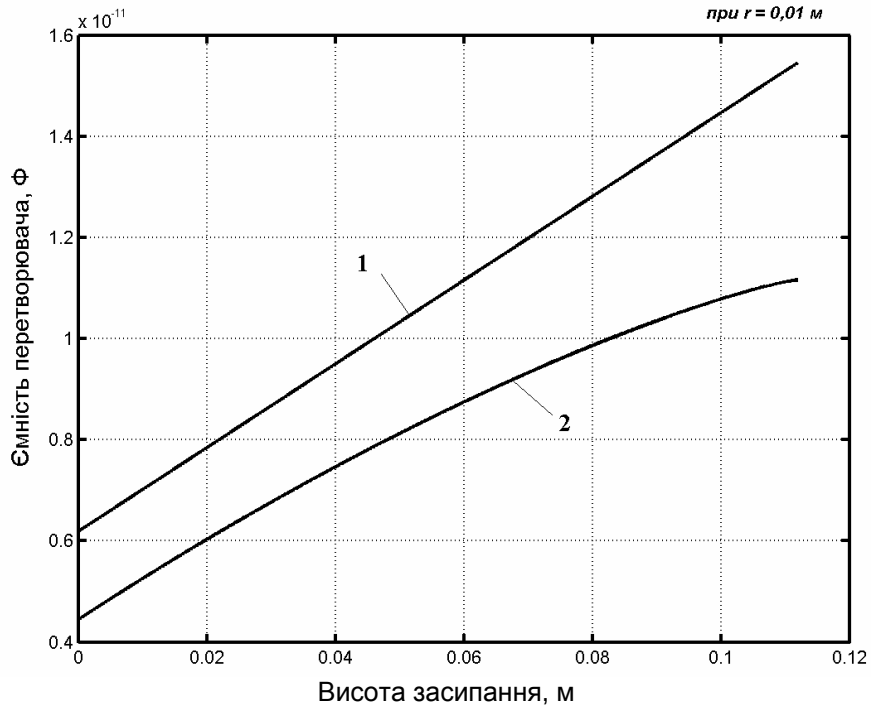
Отже, можна зробити висновок, що ємнісний перетворювач конструкції *М2* буде краще реагувати на зміну діелектричної проникності, а, отже, і вологості сипкого матеріалу, який буде міститися в міжелектродному просторі, ніж перетворювач конструкції *М1*.

На рис. 4 подано залежності ємності первинного перетворювача від висоти засипання при різних внутрішніх радіусах (циліндра – для конструкції М1, основи конуса – для конструкції М2), якщо H = 0,11 м, R = 0,075 м.

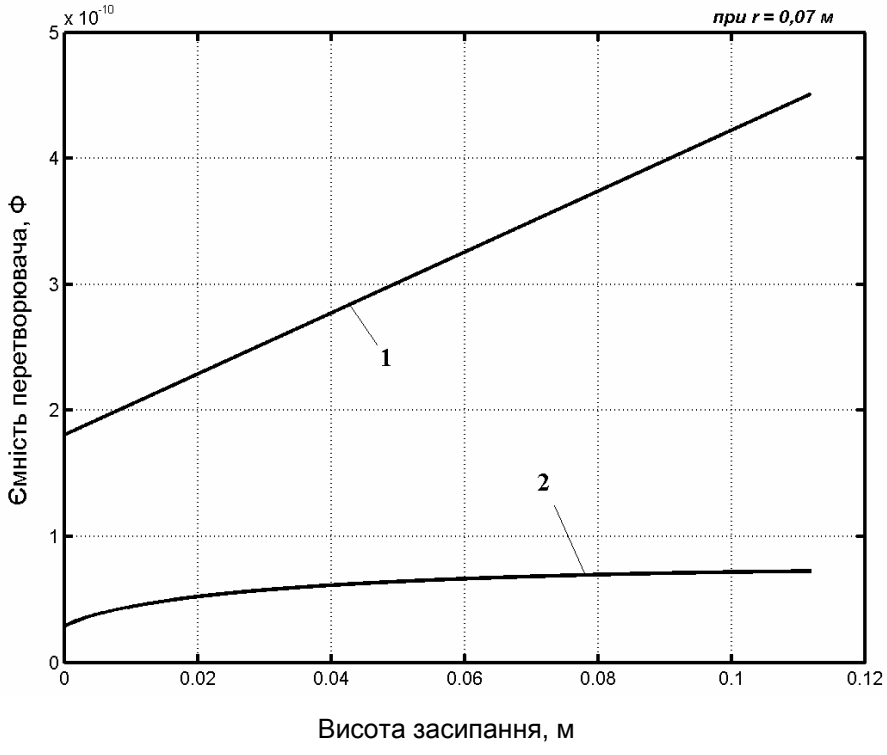
Залежності, показані на рис. 4, отримані для всіх r від 0,01 м до 0,07 м.

У таблиці наведені отримані результати досліджень чутливості ємності перетворювача від висоти засипання та відносні похибки зміни ємності при зміні висоти засипання на 1 %.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua



а



б

Рис. 4. Залежність ємності первинного перетворювача від висоти засипання при різних внутрішніх радіусах: 1 – для конструкції М1, 2 – для конструкції М2

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Порівняльна таблиця досліджуваних конструкцій залежно від висоти засипання досліджуваного матеріалу

r, *м*	Для конструкції *M1*		Для конструкції *M2*	
	$\frac{dC}{dl}\Big\|_{l=H}$, *Ф / м*	δC, %	$\frac{dC}{dl}\Big\|_{l=H}$, *Ф / м*	δC, %
0,01	$8{,}2745 \cdot 10^{-11}$	0,5721	$3{,}8933 \cdot 10^{-11}$	0,3612
0,02	$1{,}2614 \cdot 10^{-11}$	0,5721	$4{,}6496 \cdot 10^{-11}$	0,3137
0,03	$1{,}8195 \cdot 10^{-10}$	0,5721	$5{,}2511 \cdot 10^{-11}$	0,2739
0,04	$2{,}6522 \cdot 10^{-11}$	0,5721	$5{,}7755 \cdot 10^{-11}$	0,2358
0,05	$4{,}1119 \cdot 10^{-10}$	0,5721	$6.2437 \cdot 10^{-11}$	0.1964
0,06	$7{,}4715 \cdot 10^{-10}$	0,5721	$6.5704 \cdot 10^{-11}$	0,1510
0,07	$2{,}4164 \cdot 10^{-9}$	0,5721	$6{,}1228 \cdot 10^{-11}$	0,0854

$\frac{dC}{dl}\Big|_{l=H}$ – чутливість первинного перетворювача на верхній межі засипання;

δC, % – відносна зміна ємності при зміні висоти засипання на 1 мм (1 %).

Висновки

Сьогодні від точності, чутливості, швидкодії, стійкості до зовнішніх впливів, стабільності первинних перетворювачів практично повністю залежить повнота та достовірність отримуваної вимірювальної інформації про стан досліджуваних об’єктів і процесів. Діелектричний метод вимірювання вологості сипких матеріалів, який є найперспективнішим для використання при експрес-аналізі вологості матеріалу, можна реалізувати за допомогою ємнісних первинних перетворювачів певної визначеної конструкції.

Для більшої відтворюваності вологості та меншого впливу висоти засипання сипкого матеріалу рекомендуємо використовувати ємнісний первинний перетворювач циліндричної форми, як внутрішній електрод якого застосовують конус. Радіус основи конуса повинен наближатися до радіуса зовнішнього циліндра, але не повинен дорівнювати йому, тому що, по-перше, це буде розглядатися як один електрод, що спотворить результати вимірювання, по-друге, істотний вплив буде мати розмір зерна сипкого матеріалу.

Істотною перевагою запропонованої конструкції (*M2*) ємнісного первинного перетворювача є підвищення щільності укладення сипкого досліджуваного матеріалу в міжелектродному просторі порівняно з іншими конструкціями первинних перетворювачів, оскільки об'єм верхніх шарів досліджуваного матеріалу є більшим, ніж нижніх, тому верхні шари матеріалу тиснуть на нижні, що призводить до кращого ущільнення сипкого матеріалу і відповідно постійного та рівномірного контакту матеріалу з електродами.

1. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Технологические измерения и приборы: Учеб. для студ. вузов по спец. “Автоматизация технологических процессов и производств”. – М., 1989. 2. Івах Р., Дорожовець М., Питель І. Систематизація методів вимірювання вологості сипких матеріалів // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2003. – Вип. 62. С. 97–101. 3. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М., 1973. 4. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. – М., 1966.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua