

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Качанов Максим Петрович

УДК 621.317

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ ДВОХПАРАМЕТРОВОМУ  
КОНТРОЛІ ВОЛОГОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ В  
УМОВАХ НЕУСУВНОГО ФАКТОРНОГО ВПЛИВУ  
НАСИПНОЇ ЩІЛЬНОСТІ**

Спеціальність 05.13.03 – прилади та методи контролю та  
визначення складу речовин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі вимірювально-інформаційної техніки в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Щапов Павло Федорович,**  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри вимірювально-інформаційної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Бондаренко Володимир Омелянович,**  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри передачі електричної енергії  
**Кошовий Микола Дмитрович,**  
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри авіаційних приладів та вимірювань

Захист відбудеться "21" лютого 2008 р. о 14<sup>30</sup> 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 "17" січня 2008 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Глоба С.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми** обумовлена потребою експрес-контролю вологості сипких біологічних та хімічних речовин, що мають складну внутрішню структуру. Відносна вологість таких сипких матеріалів впливає не тільки на технологічні процеси виробництва, але й на якість продукції, що виробляється. Удосконалення електричних методів експрес-контролю вологості тільки за рахунок ускладнення технічних засобів отримання сигналів вимірювальної інформації неможливо, якщо не підвищувати складність математичних моделей, які описують інформаційні сигнали, що використовуються для контролю. Такі моделі повинні враховувати як функціональний зв'язок цих сигналів з контролюємою вологістю, так і невизначеність, що породжується впливом випадкових заважаючих факторів та відсутністю метрологічного забезпечення на етапі навчання інформаційної системи контролю.

Удосконалення методів вимірювального неруйнуючого двопараметрового контролю сипких речовин за рахунок ускладнення інформаційно-вимірювальних перетворень - це важлива наукова та практична задача технологічного контролю. Існуючі методи розробки та використання вимірювальної інформації про фізичні параметри (у тому числі вологість та щільність) сипких сировинних матеріалів зі складною структурою не дозволяють підвищити точність вимірювального контролю при його заданій вірогідності, що веде до технологічних порушень, ускладнює сертифікацію сировини та виробляємої на її основі продукції і, в кінці кінців, призведе до економічних витрат. Крім того, дослідження у цьому напрямку повинні дозволити розширити інформаційні можливості будь-яких багатопараметрових електричних перетворювачів неелектричних величин, що використовуються для контролю параметрів складних за фізичною структурою сипких матеріалів, для яких відсутні еталони та стандартні зразки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами** Дисертаційна робота виконана на кафедрі вимірювально-інформаційної техніки НТУ "ХП" відповідно до держбюджетної теми "Розробка методів прийняття рішень в умовах неповної інформації про об'єкт керування" (ДР № 0103U001511), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження** Мета дисертаційної роботи – розробка методів підвищенні точності контролю параметрів сипких матеріалів при використанні резонансних високочастотних перетворювачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- вибрати і проаналізувати параметричні та випадкові моделі факторного впливу на інформаційні властивості стандартного резонансного перетворювача, які дозволяють оцінювати похибки перетворювача по входу та по виходу з розкладом цих похибок на адитивну та мультиплікативну складові;

- визначити умови апріорного синтезу рівнянь вимірювання в тому випадку, коли градування перетворювача виконується за метрологічно нестандартними зразками вологості при неконтрольованому впливу сипкої щільності;

- оцінити мінімальну кількість нестандартних зразків та мінімальну чисельність рівнів вологості, які контролюються при заданій вірогідності процедур навчання системи вимірювального контролю;

- розробити алгоритмічні моделі параметричної класифікації рівнів вологості за корельованими вихідними сигналами резонансного перетворювача, що забезпечує максимальні точність та вірогідність вимірювального контролю;

- оцінити похибки вимірювання вологості при сумісному використанні алгоритмічної та функціональної моделей перетворення корельованих вихідних сигналів.

*Об'єкт дослідження* – процеси інформаційного перетворення вихідних сигналів резонансного двопараметрового високочастотного вимірювального перетворювача вологості сипких матеріалів в умовах неусувного факторного впливу насипної щільності і метрологічної невизначеності градувальної характеристики перетворювача.

*Предмет дослідження* – параметричні та випадкові моделі електричного вимірювального перетворення вологості при факторному впливі насипної щільності.

*Методи дослідження* - методи та плани багатофакторного дисперсійного аналізу використовувались для дослідження моделей випадкового впливу заважаючих факторів на точність вимірювання вологості; аналіз кількості вимірювальної інформації проводився згідно з методами інформаційної теорії вимірювань; оцінка точності вимірювальних перетворень проводилась згідно з методами теорії похибок засобів вимірювань; для оптимізації класифікаційної моделі вимірювань використовувались методи дискримінантного аналізу; для оцінки вірогідності процедур контролю вологості застосовувались методи та моделі параметричного вимірювального контролю.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається наступними основними результатами:

- дістали подальший розвиток статистичні процедури обробки результатів багатократних вимірювань і отримано, методом коваріаційного аналізу, аналітичні співвідношення для дисперсії вихідних сигналів вимірювального перетворювача, що дозволило зробити повний розклад похибок перетворювача за входом і за виходом та кількісно оцінити рівень впливу насипної щільності на точність вимірювального перетворення;

- вперше запропоновано інформаційні критерії вибору математичної моделі вимірювального перетворення, що дозволило мінімізувати похибки

вимірювального перетворення в умовах вибору кількості зразків і кількості рівнів вологості при заданій вірогідності контролю;

- удосконалено процедури вимірювального перетворення вологості на основі двовимірної кластеризації діапазону вимірювання, що дозволяє зменшити похибки оцінювання рівнів вологості в реальних умовах факторних випадкових впливів на вихідні сигнали перетворювача.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

- запропоновано методику градуювання системи вимірювального контролю вологості сипких матеріалів, що дозволила зменшити похибки двопараметрового резонансного вимірювального перетворювача;

- запропоновано спосіб вимірювання вологості і пристрій для його здійснення, що дозволяє суттєво знизити невизначеність результатів вимірювань;

- запропоновано методику опосередкованого вимірювання, яка забезпечує підвищений рівень вірогідності вимірювального контролю параметрів сипких матеріалів;

- виготовлено дослідно-промисловий макет двопараметрового перетворювача, що використовується в ТОВ Фармацевтична компанія “Здоров’я” (м. Харків) при контролі вологості хімічної речовини для виробництва ліків;

- впроваджено мікропроцесорний пристрій для вимірювального контролю відносної вологості при виробництві олії методом гарячого пресування сільськогосподарської сировини на промисловому обладнанні “Екструдер ЕК – 75/1200” в НПО “Екструдер” (м. Харків);

- результати роботи використовуються у навчальному процесі за спеціальністю 7.091302 “Метрологія та вимірювальна техніка” на кафедрі вимірювально-інформаційної техніки НТУ “ХП” в межах лекційного курсу “Контроль та випробування промислової продукції”.

**Особистий внесок здобувача** Всі основні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: класифікаційна модель функції перетворення на основі кластеризації діапазону вимірювання вологості; процедури вимірювального перетворення вологості в реальних умовах факторних впливів; інформаційні критерії вибору моделі вимірювального перетворення; методика градуювання систем вимірювального контролю сипких матеріалів.

**Апробація результатів дисертації** Основні результати дисертаційної роботи доповідались й одержали позитивну оцінку на таких конференціях: XI, XII, XIII Міжнародні науково-практичні конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 2003 р., 2004 р., 2005 р.); друга науково-технічна конференція “Приладобудування-2003: стан і перспективи” (Київ, 2003 р.); 10-я юбилейная международная конференция “Теория и техника передачи, приема и обработки информации” (Харьков-Туапсе, 2004 г.).

**Публікації** За результатами роботи опубліковано 12 робіт, в тому числі 7 статей – у фахових виданнях ВАК України, 1 патент на винахід.

**Структура та обсяг роботи** Дисертаційна робота містить вступ, 5 розділів, висновки, додатки, список використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації складає 176 сторінок; 10 ілюстрацій за текстом, 2 ілюстрації на 2 сторінках; 29 таблиць за текстом, 1 таблиця на 1 сторінці; 5 додатків на 22 сторінках, 81 найменування використаних літературних джерел на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та задачі дослідження, визначено наукову новизну, практичну цінність результатів досліджень, наведено відомості про апробацію та практичну реалізацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовані основні методи та засоби електричних вимірювань вологості сипких матеріалів зі складною хімічною та біологічною структурою. Проведений аналіз та дана оцінка стану метрологічного забезпечення вимірювань відносної вологості з врахуванням особливостей електрофізичних характеристик сипких матеріалів. Відокремлена наявність неусувних впливів фізичних властивостей таких матеріалів на електричні параметри, що несуть інформацію про вологість. Розглянуті конструктивні особливості існуючих давачів вологості, які націлені на зменшення факторних впливів, обумовлених механічними властивостями сипких матеріалів.

Зображена загальна модель вимірювальних перетворень вологості у разі апріорної невизначеності електричних параметрів сипких матеріалів та наведені умови, які сприяють зменшенню похибок вимірювань на базі структурної та інформаційної надлишковості багатовимірної моделі вимірювальних перетворень. Указані основні напрямки теоретичних та експериментальних досліджень та надано постановку задач дисертаційної роботи.

У **другому розділі** викладений теоретичний аналіз факторного впливу на інформаційні властивості резонансного перетворювача з двома вихідними сигналами та двома вхідними діями.

В основу методики теоретичних досліджень покладені математичні моделі багатфакторного дисперсійного аналізу, які розподілені на дві групи:

- моделі якісного аналізу (параметричні та компонент дисперсій), що дозволяють порівняти ефекти взаємодії впливових факторів за видами вихідних сигналів;

- моделі кількісного коваріаційного аналізу (однобічної класифікації при двовимірних спостереженнях), що дозволяють оцінити ефекти факторного впливу на функціональні вимірювальні перетворення вхідних діянь у вихідні сигнали перетворювача.

Для якісного аналізу використовувалась двохфакторна модель перехресних класифікацій з багатократними спостереженнями коли вихідний сигнал зображується рівнянням

$$y_{jir} = \bar{y} + \xi_j + \gamma_i + (\xi\gamma)_{ji} + Z_{jir}, \quad (1)$$

де  $\bar{y}$  - середнє значення вихідного сигналу;  $\xi_j, \gamma_i, (\xi\gamma)_{ji}$  - відхили вихідного сигналу обумовлені, відповідно, впливом  $W_j, \rho_i$  та їх взаємодією;  $Z_{jir}$  - випадковий залишок, обумовлений впливом неусувної множини факторів  $Z$ .

Для кількісного аналізу використовувалась параметрична регресійна модель

$$y_{jir} = \alpha + \Delta\alpha_i \bar{\rho} + \beta + \Delta\beta_i \bar{W}_j + Z_{jir}, \quad (2)$$

де  $\Delta\alpha_i, \Delta\beta_i$  - відхили параметрів  $\alpha$  та  $\beta$  моделі від середніх значень.

Дисперсійний аналіз моделі (1) дозволив оцінити робастність вихідних сигналів що до сумісного впливу вологості й щільності і визначити умови підвищення чутливості вимірювального перетворювача до змін рівнів фактору при наявності ефектів взаємодії цього фактору з заважаючим фактором.

Коваріаційний аналіз моделі (2) дозволив оцінити роздільний вплив по адитивній і мультиплікативній складовим невизначеності вихідних сигналів для основного ( $W$ ) й заважаючого ( $\rho$ ) факторів, що дозволяє розділити похибки перетворювача за входом та виходом на адитивну і мультиплікативну складові.

Інформаційний аналіз якісної та кількісної моделей вихідних сигналів дозволив отримати рівняння для розрахунку кількості очікуваної інформації в разі вимірювань рівнів заважаючого фактору. Розклад кількості очікуваної інформації при адитивному, мультиплікативному і повному впливу заважаючого фактору дає можливість апріорного синтезу формальної параметричної регресійної моделі для функції вимірювального перетворення.

В таблиці 1 наведені рівняння для розрахунку кількості очікуваної вимірювальної інформації для моделей (1) та (2) вихідного сигналу резонансного перетворювача.

Таблиця 1

Значення очікуваної вимірювальної інформації для моделей (1) та (2)

При виведенні рівнянь таблиці 1 відхили  $(\xi\gamma)_{ji}$  моделі (1) вважались випадковими тому що має місце апріорна невизначеність ефектів взаємодії між  $W$  і  $\rho$ . Дисперсія цих відхилів –  $\sigma_{\xi\gamma}^2$ ; число рівнів щільності –  $K_\rho$ ; число рівнів вологості –  $K$ ;  $n$  – кількість багатократних спостережень при фіксованих сполученнях  $W$  і  $\rho$ ;  $N$  – загальне число зразків  $W$  і  $\rho$ , які використовуються для оцінок параметрів моделей (1) і (2).

Параметри моделі (2) визначались дисперсійним розкладом суми  $S$  квадратів відхилів вихідного сигналу ( $f$  або  $Q$ ) від його середнього

Для моделі (1) кількість інформації зростає із збільшенням числа груп  $K_p$  і числа  $n$  багатократних спостережень вихідного сигналу. Для моделі (2) кількість очікуваної інформації про вологість зростає із збільшенням загального об'єму вибірових значень  $N = K^2$ , отож, із збільшенням числа  $K$  збільшується число розрізняємих рівнів як вологості, так і щільності, бо зменшується залишкова дисперсія  $S_e / K \ll 1$ .

**Третій розділ** присвячений дослідженню математичних моделей планування процедур градування двопараметрового резонансного вологоміру в умовах апріорної метрологічної невизначеності нестандартних зразків відносної вологості.

Для оцінки мінімальної кількості нестандартних зразків, що забезпечують задану вірогідність відтворення рівнів вологості, модель (1) розглядалась як модель компонент дисперсій по фактору  $W$ , що дозволило зобразити тестову  $F$ -статистику як лінійно перетворену випадкову величину з центральним  $F$ -розподіленням та  $K - 1, K - 1$  ступенями свободи

$$F = \left( 1 + n \frac{\sigma_w^2}{\sigma^2} + n \frac{\sigma_p^2}{\sigma^2} \right) F_{K-1, K(n-1)}, \quad (3)$$

Статистика (3) дозволяє визначити мінімальне число  $K$  зразків при  $n$  повторних вимірюваннях та наперед заданих величинах імовірностей похибок першого  $\alpha$  та другого  $\beta$  роду:

Дисперсійне відношення  $\sigma_w^2 / \sigma^2$  визначається точністю вимірювання вологості, яка використовується для калібрування зразка сипкого матеріалу, і не залежить від фізичних властивостей цього матеріалу. Фактично, це відношення залежить від рівня метрологічного забезпечення та технічної оснащеності лабораторії або іншої організаційної структури підприємства, яка виконує градування вологоміра або його калібрування. Дисперсійне відношення  $\sigma_p^2 / \sigma^2$  визначається сипкістю та іншими фізичними властивостями досліджуємого матеріалу, які впливають на його щільність. Від метрологічних властивостей вимірювача вологості це відношення не залежатиме.

Для оцінки мінімального числа рівнів відтворюваної вологості була досліджена модель множинної регресії вихідного сигналу  $Y$  перетворювача на множину  $X_j, j = \overline{1, k}$  вхідних впливів.

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j \cdot X_j. \quad (4)$$

На рис. 2 зображені залежності вірогідності  $\Psi$  вимірювальної інформації в функції  $k$  числа рівнів вхідних впливів при градуванні перетворювача



Рис. 2. Залежність вірогідності вимірювальної інформації від числа відтворюваних рівнів вхідних впливів

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню моделей функціонального та класифікаційного синтезу градуювальних характеристик резонансного перетворювача з врахуванням взаємного стохастичного зв'язку його вихідних сигналів.

В цьому випадку структурна схема (рис. 1) розглядається як модель перетворення вологості  $W$  у випадкові сигнали  $(f \text{ і } Q)$ , невизначеність яких обумовлена факторами  $\rho$  і  $Z$ .

Моделі вихідних сигналів мають вигляд

$$f = F_1(\rho, Z),$$

$$Q = F_2(\rho, Z).$$

Якщо різниця між первинною  $h_y$  та очікуваною  $h_{y/y_N}$  ентропією для вихідних сигналів  $y = f$  та  $y = Q$  неоднакова, то має сенс використати різницю у імовірнісних моделях цих вихідних сигналів для отримання додаткової інформації про значення рівнів вологості  $W$ .

Таку додаткову інформацію можливо отримати, якщо замінити функціональну модель рівняння посереднього вимірювання вологості

$$W = F(\rho, Q) \quad (5)$$

класифікаційною моделлю розпізнавання піддіапазонів (кластерів) діапазону вимірювання вологості, обчислюючи функції правдоподібності двовимірного вектору вихідних сигналів. Вибір рівня вологості буде визначатися максимумом його функції правдоподібності з врахуванням коваріаційної матриці вихідних сигналів перетворювача, при нормальній невиродженій щільності його розподілу ймовірностей.

На рис. 3 зображені залежності цільової функції оптимізації від числа кластерів  $m$  діапазону вимірювання при різних значеннях  $\rho_n$ .

Рис. 3. Залежність цільової функції від  $m$  при різних значеннях  $\rho_n$

Як видно із рис. 3 мінімум цільової функції  $M \Delta W^2$  дозволяє вибрати оптимальну кількість  $m_{opt}$  кластерів і ця кількість збільшується якщо зменшується нормований коефіцієнт парної кореляції між вихідними сигналами  $X_1$  і  $X_2$ .

Для синтезу загальної моделі вимірювання вологості, результат вимірювання  $X$  розглядався, як середнє арифметичне двох значень  $X_W$  - отримане за допомогою функціонального перетворення (5), коли градуювальна характеристика зображується множинною регресією;  $X_E$  - отримане за допомогою класифікаційної моделі прийняття рішень, коли за виміряне значення приймають центр піддіапазону (кластеру), номер якого вибирається за мінімумом цільової функції (6).

Відносно мала кореляція  $\rho_{WE} < 1$  між значеннями  $X_E$  та  $X_E$  для оптимальної кількості кластерів  $m_{opt}$  вказує на значну інформаційну незалежність цих значень, отже на можливості підвищення точності вимірювання вологості.

При цьому слід враховувати, що число кластерів повинно бути строго оптимальним, тобто відповідати мінімуму функції (6).

**П'ятий розділ** присвячений експериментальним дослідженням точності вимірювальних перетворень при двопараметровому контролі за допомогою резонансного перетворювача та використанню такого перетворювача для підвищення вірогідності двопараметрового контролю вологості хімічної сировини.

З метою уточнення висновків, отриманих під час теоретичних досліджень був проведений аналіз факторного впливу на метрологічні характеристики та інформаційні властивості резонансного перетворювача при фізичному моделюванні ефектів взаємодії вологості та щільності в умовах обмежень на величину діапазону змін вологості.

Як об'єкт дослідження було обрано зерно пшениці, тому що це капілярно-пориста колоїдна система зі значним складом живих білкових речовин, що робить такий сипкий матеріал метрологічне невизначеним з точки зору електричних методів вимірювання вологості. Для посилення ефектів факторного впливу контрольні зразки вологості формувались на підставі суміші зерна та гранульованих шариків з полістиролу, що дозволило варіювати в експерименті рівні як відносної вологості, так і насипної щільності.

В якості первинного перетворювача діелектричних витрат пшениці в діапазоні частот 6,0 – 6,4 МГц використовувалась котушка індуктивності ( $L = 20 \text{ мкГн}$ ) з рознесеними витками. Для дослідження інформаційних властивостей параметричної моделі резонансної кривої контуру використовувався метод багатократних незалежних вимірювань в смузі частот, яка відповідає відносній зміні  $\Delta f / f_0 = \pm 0,04$  від резонансної частоти  $f_0$ , величина якої визначалась фіксованими рівнями вологості й щільності використовуємих проб. Рівні фактору  $W$  (відносна вологість) варіювались від  $W_{min} = 16,9\%$  до  $W_{max} = 19,1\%$ , а рівні фактору  $\rho$  (щільність) задавалися вагою проби і варіювались від мінімальної ваги 580 г до максимальної – 644 г.

Результати теоретичного аналізу і фізичного моделювання дозволили використати резонансний високочастотний перетворювач для задач вимірювального контролю відносної вологості дрібнодисперсної (порошкоподібної) і гранульованої (зернистої) сипкої сировини, яка використовується для виробництва лікарняних препаратів в ТОВ Фармацевтична компанія “Здоров’я” (м. Харків).

Експеримент проводився на сировині з параметрами:

- дрібнодисперсна (порошкоподібна) сировина для виробництва анальгін у з розміром гранул до 600 мкм (вхідний контроль вологості – сировина Д);

- гранульована (зерниста) сировина з розміром гранул до 4-5 мм (технологічний контроль вологості – сировина Е).

В таблиці 2 зображені результати оцінювання кількості інформації  $I_0$  та відносної стандартної невизначеності вимірювання  $W$  і  $\rho$  хімічної сировини з розкладом цих невизначеностей на складові. При цьому модель вимірювання – функціональна (регресійна).

Таблиця 2

Кількість інформації та зведені похибки сировини

В таблиці 3 зображені середні  $\mu_i^j$ ;  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, m$  та стандартні невизначеності  $\sigma_i$  для вихідних сигналів перетворювача, коли кількість кластерів  $m = 3$  (класифікаційна модель перетворення).

Таблиця 3

Параметри алгоритмічної моделі та стандартні невизначеності вимірювання відносної вологості сировини ( $y$  (%) відносної вологості)

З таблиці видно, що для всіх видів контролюємої сировини  $\sigma_w > \sigma_x$ , що дає змогу підвищити вірогідність вимірювального контролю вологості в зонах допуску з центрами, що відповідають середнім значенням  $\bar{W}_1$ ,  $\bar{W}_2$  і  $\bar{W}_3$  внутрішньо-кластерної вологості.

При цьому вірогідність контролю для сировини Д зросла з рівня 0,95 до рівня 0,98, а для сировини Е - з рівня 0,81 до рівня 0,89.

Отримані результати дозволили одержати патент на спосіб вимірювання вологості і пристрій для його здійснення - мікропроцесорний двохчастотний вимірювач вологості сипких матеріалів з оригінальною конструкцією давача.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача по вдосконаленню методів контролю та визначення складу сипких матеріалів з використанням резонансних вимірювальних перетворювачів з корельованими вихідними сигналами.

До основних висновків дисертаційної роботи віднесено:

1. Визначені види впливаючих факторів на результати вимірювань відносної вологості та проаналізовані статистичні двовимірні моделі перехресних взаємозалежних вхідних впливів на вихідні сигнали резонансного перетворювача, які дозволяють оцінювати його чутливість за основним впливом при апріорі невідомій дійсній функції перетворення.

2. Розроблена двовимірна коваріаційна модель функції перетворення за входом та за виходом із розкладенням їх на адитивну і мультиплікативну складові при наявності впливу заважаючих факторів.

3. Визначені умови мінімізації, при градуюванні перетворювача, кількості нестандартних зразків та числа рівнів вологості, що забезпечують задану вірогідність відтворення градуювальних характеристик перетворювача, при неконтрольованому впливу сипкої щільності.

4. Розроблена класифікаційна модель функції перетворення на основі кластеризації діапазону вимірювання вологості, яка дозволяє підвищити вірогідність вимірювального параметричного контролю вологості сипких матеріалів, при використанні контрольованих вихідних сигналів резонансного перетворювача.

5. Підтверджена підвищена (більш ніж в 3 рази) чутливість резонансного перетворювача до змін рівнів щільності сипких матеріалів у порівнянні з чутливістю до змін відносної вологості.

6. Практично перевірена в ході фізичного моделювання (на зерні пшениці) ефективність оптимального синтезу регресійної моделі рівняння вимірювання вологості на основі двох корельованих вихідних параметрів резонансного перетворювача.

7. Результати робіт впроваджено в ТОВ Фармацевтична компанія “Здоров’я” (м. Харків) при контролі вологості хімічної речовини для виробництва ліків та в НПО “Екструдер” (м. Харків) впроваджено мікропроцесорний пристрій для вимірювального контролю відносної вологості при виробництві олії методом гарячого пресування сільсько-господарської сировини на промисловому обладнанні “Екструдер ЕК – 75/1200”.

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Щапов П.Ф., Качанов М.П. Классификационные задачи метрологического анализа при двухпараметровом измерении влажности// Український метрологічний журнал. – Харків: ДНВО “Метрологія”. – 2002. – Вип. 4. – С. 12 – 14.

Здобувачем проведено моделювання процедури параметричної класифікації для двопараметрового вимірювання відносної вологості хімічної сировини та розрахунок похибки вимірювань для чотирьох варіантів числа кластерів.

2. Качанов М.П. Оценка значимости информационных сигналов резонансного преобразователя при многопараметровом контроле влажности// Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2003. – № 26. – С. 86 – 90.

3. Щапов П.Ф., Качанов М.П. Информационные модели многопараметровых измерений при априорной неопределенности функции преобразования // Харківський військовий університет. Зб. наук. праць. Системи обробки інформації. – Харків: ХВУ. – 2004. – № 2. – С. 225 – 231.

Здобувачем виконаний регресійний аналіз моделей вимірювань для багатопараметрового вимірювального перетворювача.

4. Качанов М.П., Гайдаш А.М. Функциональная коррекция температурной погрешности цифрового измерителя влажности // Вісник національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 17. – С. 95 – 100.

Здобувачем синтезоване рівняння вихідного коду АЦП при лінійній моделі впливу температури.

5. Щапов П.Ф., Качанов М.П., Гайдаш А.М. Анализ факторного влияния влажности и плотности сыпучих материалов на информационные параметры резонансного преобразователя // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 7. – С. 167 – 172.

Здобувачем експериментально досліджені діелектричні властивості зерна пшениці. Проведено дисперсійний аналіз результатів двофакторного експерименту для двох резонансних частот.

6. Щапов П.Ф., Качанов М.П. Оценка нелинейности регрессионных моделей двумерных уравнений измерения // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 38. – С. 165 – 170.

Здобувач виконав регресійний аналіз чотирьох моделей рівнянь посереднього вимірювання відносної вологості.

7. Качанов М.П., Щапов П.Ф. Дисперсионный анализ многофакторных параметрических моделей информационного преобразования резонансного измерителя влажности // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ. – 2005. – № 3. – С. 53 – 56.

Здобувачем проведено дисперсійний аналіз статистичної моделі інформаційного сигналу, реалізованого в формі коефіцієнтів параболічної апроксимації для резонансної кривої.

8. Пат. 76326 Україна, МПК G01N 27/22, G01N 9/00. Спосіб вимірювання вологості і пристрій для його здійснення / А.М. Гайдаш, М.В. Гунбін, М.П. Качанов, О.І. Кордюмов, П.Ф. Щапов (Україна) /. – № 20040907865; Заявл. 27.09.2004; Надр. 17.07.2006, Бюл. № 7. – 14 с.

Здобувачем запропоновано для врахування щільності вимірювальної речовини генерування електромагнітного поля другої частоти, яка відрізняється від частоти, що є інформативною у відношенні до вологості речовини.

9. Качанов М.П., Щапов П.Ф. Микропроцессорный измеритель относительной влажности с адаптивной функцией преобразования // Труды Междунар. научн.–техн. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – С. 276.

Здобувачем запропонований первинний вимірювальний перетворювач резонансного типу для вимірювання вологості багатокomпонентних сипких матеріалів з дворівневою системою вторинного перетворення вимірювальної інформації.

10. Качанов М.П. Информационный анализ моделей факторного влияния при двухпараметровом контроле влажности химического сырья // Труды научн.-техн. конф. “Приборостроение 2003: состояние и перспективы”. – Киев: НТУУ “КПИ”, 2003. – С. 90 – 91.

11. Качанов М.П. Информационный анализ многопараметровых функций преобразования // Труды Междунар. научн.-техн. конф. “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – С. 340.

12. Щапов П.Ф., Качанов М.П. Дисперсионный анализ информационных сигналов резонансного преобразователя при измерениях влажности и плотности сыпучих материалов // Труды 10-й Междунар. конф. “Теория и техника передачи, приема и обработки информации”. – Харьков: ХНУРЕ, 2004. – С. 334 – 335.

Здобувачем виконаний дисперсійний аналіз інформаційних сигналів та отримані кількісні значення інформаційних параметрів, які є найбільш інформативними.

## АНОТАЦІЇ

**Качанов М.П.** Підвищення точності вимірювальних перетворювачів при двопараметровому контролі вологості сипких матеріалів в умовах неусувного факторного впливу насипної щільності. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2007.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі удосконалення методів підвищення вірогідності вимірювального контролю відносної вологості сипких матеріалів на базі високочастотного перетворювача.

Запропоновані математичні моделі вихідних сигналів резонансного перетворювача, які дозволяють методами дисперсійного аналізу визначити ефекти розподільного та сумісного впливу вимірюваної вологості і заважаючої насипної щільності на ці сигнали, синтезувати формальну параметричну модель функції вимірювального перетворення, оцінити вірогідність очікуваної вимірювальної інформації та розрахувати мінімальне число рівнів вологості на етапі навчання системи контролю. Запропоновано метод кластеризації діапазону вимірювання вологості (класифікаційна модель вимірювання) для автоматичної корекції результатів непрямой оцінки рівнів вологості. Доказано, що вибір числа кластерів (рівнів вологості) являє собою оптимізаційну задачу. Показана ефективність моделей непрямого вимірювання рівнів вологості при факторному впливі насипної щільності.

Ключові слова: резонансний перетворювач, відносна вологість, точність вимірювання, вірогідність контролю, дисперсійний аналіз.

**Качанов М.П.** Повышение точности измерительных преобразователей при двухпараметровом контроле влажности сыпучих материалов в условиях неустрашимого факторного влияния насыпной плотности. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2007.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи совершенствования методов повышения достоверности измерительного контроля относительной влажности сыпучих материалов со сложной биологической и химической структурой за счет повышения точности непрямых измерений на базе резонансного высокочастотного преобразователя.

Показано, что принципиальная невозможность метрологического обеспечения любых процедур косвенного измерения влажности таких материалов порождает априорную неопределенность на этапе обучения системы контроля влажности, причем основным мешающим фактором является насыпная плотность материала.

Предложены качественная и количественная математические модели для выходных сигналов резонансного преобразователя (добротность и резонансная частота), позволяющие методами дисперсионного анализа определить эффекты отдельного и совместного влияния измеряемых влажности и мешающей насыпной плотности на эти сигналы, с разделением мешающего влияния на аддитивную и мультипликативную составляющие.

Информационный анализ качественной и количественной моделей позволил использовать остаточные дисперсии этих моделей для оценки чувствительности резонансного преобразователя к изменению уровней влажности в условиях априорной неопределенности уровней мешающего фактора, что дало возможность синтеза формальной параметрической модели функции измерительного преобразования.

Применение для выходных сигналов преобразователя модели множественной линейной регрессии позволило оценить достоверность ожидаемой измерительной информации при градуировке преобразователя и рассчитать минимальное число уровней влажности на этапе обучения системы контроля.

Исследована модель компонент дисперсий (случайная модель) для выходных сигналов резонансного преобразователя и получены рекомендации по выбору минимального числа групп образцов влажности на этапе градуировки. При этом, достоверность выбора определяется задаваемыми заранее величинами вероятностей ошибок не только первого, но и второго

рода, что повышает эффективность обучения системы контроля относительной влажности.

Предложен метод кластеризации диапазона измерения влажности (классификационная модель измерения) для автоматической коррекции результатов косвенной оценки уровней влажности, когда для устранения влияния насыпной плотности используется алгоритм принятия решений по вектору выходных сигналов резонансного преобразователя. Доказано, что выбор числа кластеров (уровней влажности), используемых на этапе контроля, является оптимизационной задачей, учитывающей априорную неопределенность факторного влияния на этапе градуировки преобразователя влажности.

Доказано, что несмотря на коррелированность выходных сигналов резонансного преобразователя, последние могут эффективно использоваться в рамках классификационной модели измерения, обеспечивая избыточность информации при оптимальном числе уровней контролируемой влажности. Критерием выбора является дисперсия абсолютной погрешности измерения влажности, минимуму которой соответствует оптимальное число уровней.

Показана эффективность разработанных математических моделей непрямого измерения уровней влажности при факторном влиянии насыпной плотности на двух объектах измерительного контроля:

- зерно пшеницы (физическое моделирование факторного влияния);
- химическое сыпучее сырье для фармацевтического предприятия (практическое использование разработанного резонансного преобразователя для повышения достоверности контроля).

Предоставлено описание, на уровне структурной и логической схем, запатентованного высокочастотного резонансного измерителя относительной влажности, работающего в системе технического контроля фармацевтического предприятия.

Ключевые слова: резонансный преобразователь, относительная влажность, точность измерения, достоверность контроля, дисперсионный анализ.

**Kachanov M.P.** Accuracy increase of measuring transducers by bulk solids humidity two-parameter control under apparent density unavoidable impact conditions. – Manuscript.

Candidate's of technics thesis in speciality 05.11.13 – compositional measuring and control equipment and methods. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2007.

Thesis deals with scientific and technical problem solution to improve methods of bulk solids relative humidity measuring control probability rise, based on high-frequency transducer.

Mathematical models for resonant transducer outputs were proposed that enable using variance analysis methods by defining effects of measurable humidity and apparent density interference on these signals individual and combined



influence, to synthesize measuring transform function's parameter-oriented model, to evaluate accuracy of getting estimated measurements, and to calculate minimum number of humidity levels at the stage of control system instruction.

Humidity measurement range clustering method (classification measurement model) was proposed for humidity levels indirect estimation automatic results correction. It is proved that the choice of clusters number (humidity levels) is an optimization problem. Efficiency of indirect humidity levels defining by apparent density impact is shown.

Key terms: resonant transducer, relative humidity, precision of measurements, accuracy control, variance analysis.