

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Осіна Тетяна Георгіївна

УДК 621.317

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО  
ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ СКЛАДУ  
ОРГАНІЧНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент  
**Щапов Павло Федорович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут",  
професор кафедри інформаційно-вимірювальних  
технологій і систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Большаков Володимир Борисович**,  
Національний науковий центр "Інститут метрології"  
Державного комітету з питань технічного регулювання  
та споживчої політики, м. Харків,  
головний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії-3;

кандидат технічних наук, доцент  
**Половинка Дмитро Васильович**,  
Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля  
Міністерства освіти і науки України, м. Луганськ,  
доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання.

Захист відбудеться: "09" жовтня 2008 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий "06" вересня 2008 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.М. Глоба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Удосконалення методів контролю сприяє підвищенню ступеню вірогідності і своєчасності одержання інформації на всіх етапах виробничого процесу. Як показує світовий досвід, досягнення стабільної якості промислової продукції неможливе без високоякісних сировинних матеріалів. Контроль якості таких матеріалів є вхідним, але для нього, як і для інших видів технічного контролю, вірогідність висновків про практичний стан об'єкта контролю залежить від рівня метрологічного забезпечення технічних вимірювань для одержання первинної інформації та досконалості сучасних інформаційно-обчислювальних технологій, що дають вторинну інформацію для вибору рішення про рівень якості. Слід відзначити важливість системно-нормативного забезпечення як кожного етапу технічного контролю якості, так і всієї системи керування підвищенням якості й конкурентоспроможності вітчизняної продукції.

Розвиток методів параметричного контролю якості сипкої сільськогосподарської сировини за рахунок зниження випадкового факторного впливу при визначенні значень рівнів параметра якості – це важливе наукове й практичне завдання. Проведені дослідження дають можливість підвищити вірогідність контролю якісного складу сипких матеріалів на основі використання результатів прямих вимірювань показників, що опосередковано відображують фізико-механічні властивості цих матеріалів, і застосування методів статистичної теорії прийняття рішень для побудови непрямих вимірювальних процедур оцінювання рівнів параметра контролю з максимально можливою вірогідністю. Тому актуальним є розвиток методів здобуття додаткової вимірювальної інформації про якісні зміни складу сипких органічних матеріалів на етапі навчання системи експрес-контролю, що становить напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ "ХПІ" у процесі розробки держбюджетних науково-дослідних тем за планом МОН України, а саме: "Дослідження проблем прикладної метрології при вирішенні задач управління якістю промислової продукції та самоконтролю технічних систем" (ДР 0100U001647); "Дослідження наукових проблем метрологічного забезпечення динамічного бездемонтажного самоконтролю інтелектуальних інформаційно-керуючих систем" (ДР 0103U001539); "Підвищення точності інформаційно-вимірювальних та управляючих систем засобами бездемонтажного тестового контролю" (ДР 0106U001514), та договорів про науково-технічне співробітництво між НТУ "ХПІ" і ТОВ "Інженерна група ТФК" (м. Харків) та між НТУ "ХПІ" і НПП "Екструдер" (м. Харків), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка методів і технічних засобів, що підвищують точність і вірогідність систем експрес-контролю складу органічних сипких матеріалів за рахунок використання інформації про фізико-механічні й теплофізичні властивості матеріалів при побудові вторинних вимірювальних процедур на основі статистичних правил прийняття рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розробки методу синтезу інформаційно оптимальної системи одиничних показників контролю в умовах невизначеності відтворення рівнів контрольованих параметрів;
- розвитку методів непрямих вимірювальних перетворень на основі параметричного тестування (дискримінації) рівнів параметрів контролю;
- удосконалення методу багатопараметричного експрес-контролю на основі використання комплексних теплофізичних показників для зменшення факторних впливів, викликаних неоднорідністю гранулометричного складу сипких матеріалів;
- розробки первинного теплофізичного перетворювача для вимірювання коефіцієнта тепловіддачі й створення систем експрес-контролю кількості клейковини зерна пшениці та рівнів олійності насіння соняшника.

**Об'єкт дослідження** – процес виникнення невизначеності результатів вимірювань

при багатопараметричному експрес-контролі складу сипких матеріалів в умовах вияву нездоланих ефектів факторного впливу їх фізико-механічних властивостей.

**Предмет дослідження** – методи неруйнівного багатопараметричного експрес-контролю складу сипких матеріалів в умовах невизначеності їх фізико-механічних властивостей.

**Методи досліджень** базуються на використанні: теорії ймовірності і математичної статистики, математичних моделей багатфакторного дисперсійного аналізу – при дослідженні корельованих з параметром контролю інформативних фізичних показників; методів планування експерименту в умовах неоднорідностей і дискримінантного аналізу – при доведенні адекватності моделі класифікації рівнів параметра контролю; теорії інформації та теорії параметричного контролю – при синтезі цільової функції оптимізації і при оцінці вірогідності контролю рівнів параметра якості.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- отримав подальший розвиток метод інформаційного аналізу системи показників контролю, що дозволив формувати оптимальну систему показників в умовах невизначеності відтворення рівнів контрольованих параметрів;

- розвинуто метод непрямого вимірювального перетворення на основі лінійної дискримінації рівнів параметрів контролю і синтезовано цільову функцію оптимізації кількості контрольованих рівнів за мінімумом ширини зони допуску;

- отримано й обґрунтовано математичні моделі просторових структур сипких матеріалів, що дозволяють адекватно моделювати процеси теплопередачі при змінах гранулометричного складу;

- теоретично й експериментально обґрунтовано ефективність застосування теплофізичних вимірювальних перетворень для зниження факторного впливу гранулометричного складу сипких матеріалів на результати експрес-контролю.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у застосуванні їх на таких підприємствах:

- "Інженерна група ТФК" (м. Харків) – впроваджено метод експрес-контролю вмісту клейковини зерна пшениці на етапі рецептурного дозування; методика розрахунку коефіцієнтів функції вимірювального перетворення складу сипких матеріалів; експериментальний зразок приладу експрес-контролю кількості клейковини зерна пшениці (акт від 06.04.2004 р.);

- НВП "Екструдер" (м. Харків) – впроваджено метод розрахунку первинного теплофізичного перетворювача та синтезу функції вторинного перетворення, яке забезпечує лінійність заданому типу градуювальної характеристики; макет пристрою та мікропроцесорна система для вимірювального контролю теплофізичних властивостей для експрес-контролю олійності насіння соняшника при виробництві олії (акт від 30.09.2006 р.).

Результати досліджень дозволили скоротити час вимірювання параметрів складу сипких матеріалів з 2–3 год до 3–5 хв при збільшенні на 5–7 % вірогідності експрес-контролю, що дають змогу використати розроблені методи для визначення складу речовин.

Матеріали роботи використовуються у навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ "ХП".

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз джерел невизначеності вимірювальної інформації у процесі контролю параметрів сипких матеріалів; синтез інформаційно оптимальної системи показників контролю; обґрунтування вибору моделі дискримінації в умовах невизначеності рівнів контрольованого параметра; інформаційний аналіз лінійної моделі дискримінації в умовах обмеження на обсяг навчальних вибірок; дослідження моделі теплопередачі у сипких середовищах; обґрунтування вибору теплофізичної моделі вимірювального перетворення; вибір оптимальних конструктивних па-

раметрів первинного перетворювача порозності сипких матеріалів; математичне моделювання гранулометричного складу матеріалу для різних варіантів щільності упаковки частинок сипких матеріалів; розрахунок режимів роботи та оцінка точності теплофізичного перетворювача; формування висновків і рекомендацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені: на IX, XIII, XIV, XV міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2001, 2005, 2006, 2007 рр.); III, V міжнародних науково-практичних конференціях "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків, 2000, 2006 рр.); III міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми інформатики й моделювання" (м. Харків, 2003 р.); другому міжнародному радіоелектронному форумі "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" (м. Харків, 2005 р.); X ювілейному міжнародному молодіжному форумі "Радіоелектроніка й молодь у XXI столітті" (м. Харків, 2006 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано у 16 наукових працях, з них 7 статей у фахових виданнях ВАК України.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 203 сторінки, включаючи 27 рисунків за текстом; 25 таблиць за текстом; 17 рисунків на 18 сторінках; 4 таблиці на 4 сторінках; 4 додатки на 22 сторінках; 161 найменувань використаних літературних джерел на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано об'єкт, предмет, мету та основні задачі досліджень, показано зв'язок роботи з науковими держбюджетними темами і програмами; викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про апробацію, впровадження основних результатів роботи, а також викладено інформацію про публікації та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз джерел невизначеності вимірювальної інформації під час контролю параметрів сипких матеріалів. Розглянуто існуючі методи одержання вимірювальної інформації про базові властивості сипких матеріалів, обґрунтовано вибір адекватної моделі параметра контролю й проаналізовано методи підвищення вірогідності контролю, які свідчать про принципові обмеження у використанні методів підвищення точності вимірювань через невизначеність дійсних функцій вимірювального перетворення і наявність істотних нелінійностей у градувальних характеристиках. У роботі досліджено фактори, що не дозволяють використовувати традиційні методи контролю параметрів сипких матеріалів зі складною біохімічною структурою (зерно пшениці, насіння соняшника), невизначеність якісних характеристик яких впливає на повноту одержання вимірювальної інформації як на етапі навчання системи, так і на етапі вимірювального контролю. Наприкінці розділу обґрунтовано методологію і напрямки наукових пошуків, сформульовано основні задачі і методи досліджень.

**Другий розділ** присвячено дослідженню впливу невизначеності результатів вимірювань на ефективність багатопараметричного контролю, розробці методу синтезу інформаційно оптимальної системи одиничних показників контролю в умовах обмеження на обсяги вибірок вихідних даних на етапі навчання системи та за відсутності еталонів, які відтворюють задані рівні контрольованого параметра. Ранжування показників проводилось за максимумом очікуваної вимірювальної інформації, що забезпечувало високу вірогідність контролю.

Впливаючими факторами вважались кількісно вимірювані фізичні величини, які відображають гранулометричний склад і важливі теплові властивості зерна пшениці (показники контролю  $X_1, \dots, X_m$ ). Оскільки при експрес-контролі було обрано модель непрямого вимірювання параметра  $Y$ , то для оцінки інформаційної значущості показників контролю було розраховано кількість очікуваної вимірювальної інформації про рівні  $Y$  для кожного з показників  $X_1, \dots, X_m$  ( $m = 3$ ). Як модель результату вимірювання для обраного показника було вико-

ристано спрощену (модифіковану) чотирифакторну модель перехресних класифікацій, яка враховувала тільки парні взаємодії:

$$X_{ijkv} = \bar{X} + y_t + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (y\alpha)_{ii} + (y\beta)_{ij} + (y\gamma)_{ik} + e_{ijkv}^*, \quad (1)$$

де  $t, i, j, k$  – номери рівнів впливаючих факторів;  $y_t$  – відхилення результату вимірювання показника  $X$  від його середнього значення  $\bar{X}$ , яке зумовлене впливом параметра  $Y$ ;  $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$  – відхилення результату вимірювання  $X_{ijk}$  від  $\bar{X}$ , спричинене рештою (трьома) факторами;  $(y\alpha)_{ii}, \dots, (\beta\gamma)_{jk}$  – відхилення, зумовлене парними взаємодіями усіх факторів;  $e_{ijkv}^*$  – випадковий залишок.

Чутливість такої моделі до впливу вмісту клейковини нижча, ніж у загальної моделі впливу, але вища, ніж у двофакторної моделі перехресної класифікації. Модифікована модель може бути подана у формі моделі компонент дисперсій, оскільки частково ефекти зміни рівнів вмісту клейковини випадкові. Така модель дозволяє оцінити вірогідність прийняття рішень при перевірці гіпотез, а отже, і вірогідність результатів вимірювань рівнів вмісту клейковини. Головна перевага модифікованої моделі – це можливість одночасної перевірки складових основної гіпотези  $H_0$ : вплив факторів  $Y, X_{(\alpha)}, X_{(\beta)}, X_{(\gamma)}$  на інформаційний показник  $X$  – відсутній. Це дозволило, використовуючи незмінну серію зразків ( $N = 120$ ) пшениці з випадковими, але відомими рівнями вмісту клейковини, оцінити повну дисперсію  $\sigma_X^2$  моделі (1) та дисперсію  $\sigma_{\Delta X}^2$  її випадкового залишку  $e_{ijkv}^*$  і розрахувати кількість інформації:

$$I = \frac{1}{2} \lg \left[ 1 + \left( \frac{\sigma_X}{\sigma_{\Delta X}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Надійність результатів інформаційного аналізу показників контролю була підтверджена використанням додаткових моделей факторного впливу – регресійної та моделі альтернативної дискримінації. Проведене математичне моделювання дало змогу довести, що при обмеженні кількості зразків  $N$  існує оптимум для кількості найбільш інформативних показників  $m$ .

У **третьому розділі** досліджено застосування процедур статистичної дискримінації для підвищення точності і вірогідності багатопараметричного експрес-контролю складу сипких органічних матеріалів. Невизначеність результатів вимірювань контрольованих показників зумовлена їх слабким зв'язком кореляції з параметром контролю. Точкові оцінки нормованих коефіцієнтів парної кореляції лежать у межах від 0,05 до 0,35, що недостатньо для вибору адекватної моделі прямого вимірювального перетворення. Метою проведених досліджень є обґрунтування ефективності застосування інформаційного підходу для формування оптимальної за максимумом очікуваної вимірювальної інформації системи показників параметричного контролю при обмеженнях на обсяги навчальних вибірок.

Зроблено порівняльний аналіз використання лінійної і квадратичної моделей дискримінації та обґрунтовано доведено нечутливість лінійної моделі до порушень допуску на вид моделі одиничних показників контролю.

Доведено, що вибір числа рівнів параметра контролю є задачею оптимізації і визначається властивостями дискримінації показників. Подано початкові дані для розробки алгоритму прийняття рішень та наведено його структурну схему (рис. 1). Критерієм якості вибору рішення з множини можливих є максимум рівня правдоподібності вибірки виміряних під час контролю значень показників.

Рис. 1. Структурна схема класифікаційного вимірювального перетворення

Якщо  $\mu$  – це кількість рівнів контрольованого параметра  $Y$ , а  $n$  – кількість зразків за

цими рівнями, більш прийнятною є модель дискримінації рівнів  $y_1, \dots, y_\mu$ , яка побудована на байєсовому правилі вибору рішень. Вибір числа рівнів є задачею оптимізації тому, що зі зростанням  $\mu$  зменшується обсяг  $n$  навчальних вибірок за кожним з відтворених значень  $y_1, \dots, y_\mu$ .

Було визначено верхню межу числа  $\mu$  виходячи з мінімальної кількості початкових умов, які надають принципову можливість використання лінійної моделі дискримінації рівнів параметра контролю  $Y$ :

1. Вектор результатів вимірювань  $X = X_1, \dots, X_p$  повинен мати нормальний розподіл з рівними за класами  $\pi_1, \dots, \pi_\mu$ , коваріаційними матрицями.
2. Коваріаційні матриці вектора  $X$  були діагональними з дисперсіями  $\sigma_1^2, \dots, \sigma_p^2$ , оцінками яких є залишкові квадрати  $\sigma_{\Delta X}^2$  модифікованої моделі (1) за кожним із показників  $X_1, \dots, X_p$ .
3. Розподіл рівнів  $y_1, \dots, y_\mu$  вважався рівномірним у діапазоні змін  $A_y$  параметра контролю  $Y$ .
4. Обсяг навчальних вибірок за усіма рівнями параметра  $Y$  був однаковий та становив  $n = N/\mu$ , де  $N$  – загальне число зразків, які було використано для навчання лінійної моделі дискримінації.

Початкові дані для розробки алгоритму прийняття рішення  $\gamma_r : Y \in y_r$  вважалися такими:

- сукупність  $\pi_1, \dots, \pi_\mu$  можливих класів об'єкта контролю є повною групою випадкових подій з однаковими ймовірностями  $q = \mu^{-1}$  цих класів;
- умовні розподіли  $f(x_i/\pi_i)$  показників  $X_i, i = \overline{1, p}$  відомі з точністю до значення параметрів  $\overline{x_i^{(j)}}$ ,  $\sigma_i$  у діапазоні  $A_i$  змін цих показників;
- критерієм якості вибору рішення  $\gamma_r$  із множини можливих рішень  $\gamma_1, \dots, \gamma_\mu$  є критерій максимуму правдоподібності вибірки  $X_1, \dots, X_p$  вимірюваних під час контролю значень показників  $X_1, \dots, X_p$ ;
- функція втрат невідома.

Виходячи з цих вимог було сформульовано функцію правдоподібності:

$$L(x/\pi_j) = 2\pi^{-\frac{p}{2}} \left( \prod_{i=1}^p \sigma_i^{-\frac{p}{2}} \right) \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \left( \frac{x_i - \overline{x_i^{(j)}}}{\sigma_i} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Визначено математичне очікування  $\overline{\Delta y}$  симетричної зони допуску для контрольованого параметра  $y_j$ . Розглянуто випадкові відхилення  $\Delta y$  результату оцінювання цього рівня при двох вимогах: а)  $Y \in y_j$ , тоді  $\Delta y \leq A_y/2\mu$ ; б)  $Y \notin y_j$ , тоді  $\Delta y > A_y/2\mu$ .

Наслідком вимоги а) є те, що значення відхилення  $\Delta y$  дорівнює значенню  $\overline{\Delta y_1} = A_y/4\mu$ . З вимоги б) знайдено середнє значення  $\Delta y$  для усіх  $k \neq j$ :

$$\overline{\Delta y_2} = \frac{A_y}{2\mu} \cdot \frac{\sum_{k=2}^{\mu} k-1}{\mu-1} = \frac{A_y}{4}.$$

З урахуванням того, що  $P_1$  є імовірністю правильної класифікації рівнів  $y_j$ , а  $P_2$  – імовірністю помилкової класифікації цих же рівнів, маємо

$$P_1 = P \left[ \mathfrak{G} \leq \frac{1}{4\mu^2} \sum_{i=1}^p \left( \frac{A_i}{\sigma_i} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$P_2 = P \left[ \mathfrak{G} > \frac{1}{4\mu^2} \sum_{i=1}^p \left( \frac{A_i}{\sigma_i} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

З урахуванням імовірностей  $P_1, P_2$  отримано  $\bar{\Delta} = 4 \bar{\Delta}_{y_1} P_1 + \bar{\Delta}_{y_2} P_2$ . Оскільки  $P_1 = 1 - P_2$ ,

то

$$\bar{\Delta} = \frac{A_y}{\mu} \left[ 1 + \mu - 1 \cdot e^{-\frac{N-3\mu}{2p\mu^2} \frac{1}{N-\mu} \sum_{i=1}^p \left( \frac{A_i}{\sigma_i} \right)^2} \right]. \quad (6)$$

Таким чином, було одержано рівняння (6) для розрахунку зони допуску рівнів параметра контролю, що дозволило зробити вибір їх максимально можливого числа при зафіксованому числі нестандартних зразків та виключило систематичні похибки у межах зони допуску.

Якщо кількість зразків, які відтворюють  $\mu$  рівнів параметра контролю, різна, то

$$\bar{\Delta} = \frac{A_y}{\mu} \left[ 1 + \mu - 1 \cdot e^{-\frac{1}{2p\mu} \left\{ \sum_{j=1}^{\mu} \left( \frac{n_j-1}{n_j-3} \right) \right\}^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^p \left( \frac{A_i}{\sigma_i} \right)^2 \right\}} \right].$$

На рис. 2, 3 наведено графічні залежності  $\bar{\Delta}$  від числа рівнів  $\mu$  при різних значеннях роздільної здатності  $\psi$  і різній кількості зразків  $N$ .

Рис. 2. Залежність  $\bar{\Delta}$  від  $\mu$  при  $\psi=10$       Рис. 3. Залежність  $\bar{\Delta}$  від  $\mu$  при  $N=120$

Таким чином, середня ширина зони допуску  $\bar{\Delta}$  для кожного з рівнів параметра  $Y$  має мінімальне значення  $\bar{\Delta}_{\min}$  для одного зі значень  $\mu_{\text{опт}}$  і зменшується зі збільшенням  $N$ . Крім цього, оптимальне число рівнів  $\mu_{\text{опт}}$  зростає зі збільшенням  $N$ .

Розроблений метод оцінки нижньої межі (7) вірогідності контролю фіксованого числа рівнів при обмеженнях на обсяги вимірювань, дозволив спростити процедуру оцінки вірогідності результатів багатопараметричного контролю:

$$P = \frac{A_y}{\mu} \sqrt{\bar{\Delta}}. \quad (7)$$

**Четвертий розділ** присвячено розробці теплофізичного перетворювача для технологічного контролю гранулометричного складу сипких матеріалів. Досліджено різні моделі теплопередачі у матеріалі та обґрунтовано зроблено вибір оптимального контрольованого теплофізичного показника. Досліджено математичні моделі впливу характеристик гранулометричного складу на теплофізичні показники сипких матеріалів. Розроблено метод і технічний засіб для непрямого вимірювального перетворення рівнів порозності в електричний сигнал вимірювальної інформації.





ристаного як вторинний перетворювач вимірювання коефіцієнта тепловіддачі. На рис. 6 подано зовнішній вигляд установки для визначення коефіцієнта тепловіддачі.

Рис. 6. Лабораторна установка

Отримано аналітичні вирази для розрахунку чутливості теплофізичного перетворювача, доведена ефективність використання теплофізичного перетворювача у складі системи багатопараметричного експрес-контролю.

Проведено аналіз абсолютного  $\alpha$  і відносного  $\gamma$  коефіцієнтів тепловіддачі та обґрунтовано рекомендації щодо застосування як інформативний показник відносного коефіцієнта  $\gamma$ . З табл. 1 видно, що чутливість  $S_\gamma$  не залежить від вимірюваної величини  $\gamma$ , що свідчить про лінійність функції вимірювального перетворення і зменшення значення похибки опосередкованого вимірювання.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз характеристик вимірювального перетворення абсолютного  $\alpha$  і відносного  $\gamma$  коефіцієнтів тепловіддачі

Дисперсія випадкової похибки результату опосередкованих вимірювань

$$\sigma_\gamma^2 = \left( \frac{100}{RIA_0} \right)^2 \left\{ \sigma_\alpha \Delta U^2 + \left[ \sigma_I \frac{\alpha_B - A_0}{I} \Delta U \right]^2 + \left[ \sigma_{\Delta U} \alpha_B - A_0 \right]^2 - \Delta U^2 \frac{\alpha_B - A_0}{I} r_{I\alpha} \right\},$$

де  $r_{I\alpha}$  – позитивний нормований коефіцієнт парної кореляції між струмом і коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha_B$ .

Проведено порівняльний аналіз регресійної й класифікаційної моделей вимірювального перетворення при фізичному моделюванні багатопараметричної системи контролю рівня кількісного вмісту клейковини в зерні пшениці. Результати досліджень дозволили підтвердити перевагу моделі лінійної дискримінації порівняно з функціональними моделями вимірювальних перетворень (табл. 2) у задачі підвищення вірогідності контролю кількості клейковини зерна пшениці.

Таблиця 2

Результати розрахунків вірогідності контролю

$\mu$	Вірогідність контролю	
	Регресійна модель	Модель дискримінації
2	0,702	0,722
3	0,680	0,754
4	0,669	0,725

Розглянуто питання практичної реалізації отриманих результатів. Наведено перелік місць упровадження розробленого пристрою, а також практичні результати застосування розроблених систем і методів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення вірогідності контролю складу органічних сипких матеріалів за рахунок використання методу лінійної дискримінації рівня контрольованого параметра та теплофізичного перетворювача, який ураховує гранулометричний склад. Основні результати роботи полягають у наступному.

1. Проаналізовано існуючі способи підвищення вірогідності багатопараметричного контролю, встановлено відсутність існуючих методів збільшення точності за рахунок інформаційного надлишку та доведена перспективність підвищення ефективності контролю за рахунок статистично обґрунтованого вибору показників контролю на етапі навчання і правильного вибору алгоритму прийняття рішень на етапі контролю.

2. Досліджено проблему зменшення впливу невизначеності результатів багатомірних вимірювань і невизначеності виду функцій вимірювального перетворення на точність і вірогідність багатопараметричного експрес-контролю складу органічних сипких матеріалів. Показано, що дана проблема не може бути вирішена лише за рахунок зменшення інструментальних похибок засобів вимірювального експрес-контролю без урахування ймовірнісно-статистичної структури об'єкта контролю.

3. Розроблено метод синтезу інформаційно оптимальної системи одиничних показників контролю на базі модифікованої (спрощеної) моделі подання результатів вимірювання для кожного з цих показників, які відображують фізико-механічні властивості сипкого матеріалу. Це дозволило розширити число факторів, що впливають на точність одержання інформації про контрольовані параметри за кожним одиничним показником контролю.

Розроблено методи ранжирування за зниженням інформативності використовуваних показників контролю і формування підмножини показників, що забезпечують максимальне значення кількості вимірювальної інформації про рівні контрольованого параметра.

4. Отримав подальший розвиток метод непрямого вимірювального перетворення на базі статистичної дискримінації рівнів контрольованого параметра, який дозволив виключити систематичні похибки вимірювання у заданих заздалегідь зонах допуску на рівні параметра контролю.

Розроблено метод оцінювання вірогідності результатів багатопараметричного контролю трьох і більше рівнів контрольованого параметра.

5. Запропоновано метод теплофізичного вимірювального перетворення, який удосконалив метод багатопараметричного експрес-контролю шляхом підвищення вірогідності контролю за рахунок одержання додаткової вимірювальної інформації про гранулометричний склад сипких матеріалів.

6. Розроблено первинний теплофізичний вимірювальний перетворювач, який забезпечує лінійність градувальної характеристики вимірювання коефіцієнта тепловіддачі сипкого матеріалу.

7. На прикладі контролю якості та кількості вмісту клейковини зерна пшениці отримано підвищення вірогідності контролю за рахунок застосування методу лінійної дискримінації рівнів кількості клейковини і теплофізичного контролю гранулометричного складу. При цьому час вимірювання скоротився з 2–3 год (лабораторний метод) до 3–5 хв (експрес-контроль), а вірогідність контролю зросла від 0,702 до 0,722 при контролі двох рівнів і від 0,680 до 0,754 при контролі трьох рівнів кількості клейковини зерна пшениці для дозаторів сипкої сільськогосподарської сировини.

На прикладі багатопараметричного контролю олійності насіння соняшника досягнуто зменшення середньоквадратичної похибки від 2,293 до 1,629 (%) при використанні теплофізичного перетворювача. Це дозволило до того ж зменшити число регресорів функціональної моделі вимірювального перетворення з 5 до 4, що підвищило вірогідність з 0,912 до 0,925.

8. Наукові та прикладні результати досліджень було використано на вітчизняних підприємствах "Інженерна група "ТФК" та ТОВ НВП "Екструдер" по переробці сільськогосподарської сировини. Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ "ХП".

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Диденко К.И., Кондрашов С.И., Осина Т.Г. Влияние порозности сыпучих материалов на коэффициент теплоотдачи // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – № 4. – С. 60–66.

*Здобувачем розроблено математичні моделі теплофізичних перетворень коефіцієнтів тепловіддачі сипкого матеріалу в струм небалансу незрівноваженого мосту постійного струму.*

2. Овчаренко А.И., Осина Т.Г. Косвенные измерения на основе регрессии в условиях низкой коррелированности входных и выходных переменных // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2003. – № 7, т. 3. – С. 131–135.

*Здобувачем виконано аналіз можливого використання двофакторної моделі множинної регресії для незалежної оцінки вологості та щільності сипкого матеріалу за допомогою резонансного високочастотного перетворювача й розроблено алгоритм вимірювальних процедур для опосередкованого вимірювання відносної вологості.*

3. Овчаренко А.И., Осина Т.Г. Выбор геометрических параметров зерновки для экспресс-измерений клейковины // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2003. – № 21 – С. 137–142.

*Здобувачем отримано результати вимірювального експерименту з визначення геометричних параметрів насіння пшениці при контролі кількості і якості клейковини, а також кореляційний аналіз багатовимірних вибіркового даних.*

4. Овчаренко А.И., Осина Т.Г. Выбор предикторов модели функции измерительного преобразования при косвенных измерениях клейковины // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків, 2004. – № 7 (1) – С. 29–31.

*Здобувачем наведено розраховану оцінку нормованих коефіцієнтів парної кореляції показників контролю з кількістю і якістю клейковини зерна пшениці й висновки за результатами аналізу даних.*

5. Щапов П.Ф., Осина Т.Г., Муляров В.В. Применение классификационных процедур дискриминантного анализа для уменьшения информационной неопределенности многомерных измерительных сигналов // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць. – Харків: ХУПС, 2006. – Вип. 7 (56). – С. 92–94.

*Здобувачем розроблено модель лінійної параметричної дискримінації рівнів параметрів контролю для насіння соняшника й пшениці.*

6. Осина Т.Г. Использование параметрических дискриминантных функций в задачах измерительного контроля качества // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – № 9. – С. 103–107.

7. Осина Т.Г. Оценка ожидаемой измерительной информации о качественном составе // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – № 10. – С. 145–150.

8. Диденко К.И., Сухер А.Н., Осина Т.Г. Моделирование структуры сыпучих материалов // Метрология в електроніці – 2000: III Міжнар. наук.-техн. конф.: Наук. праці: У 2 т. – Харків, 2000. – Т. 2. – С.193–195.

*Здобувачем розроблено математичні моделі впливу порозності на коефіцієнт тепловіддачі для середовищ з різним гранулометричним складом.*

9. Осина Т.Г. К оценке теплоотдачи в дискретную среду // Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, довкілля: IX Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – С. 17.

10. Овчаренко А.И., Осина Т.Г. Методика синтеза регрессионных моделей косвенно измеряемых неэлектрических величин // Проблемы информатики и моделирования: III Международ. науч.-техн. конф. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2003. – С. 18.

*Здобувачем проведено аналіз вимірювань неелектричних величин та визначено необхідність побудови регресійних моделей з метою їх застосування у тих випадках, коли відсутні параметри, які одержано прямим вимірюванням.*

11. Овчаренко А.И., Осина Т.Г. Влияние способа формирования пробы на погрешность экспресс-измерения влажности. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XIII Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – С. 35.

*Здобувачем проведено аналіз впливу способу формування проби на похибку експрес-вимірювань вологості пшениці.*

12. Щапов П.Ф., Осина Т.Г. Оценка информационной значимости показателей измерительного контроля метрологически неопределенных параметров зерна пшеницы // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: II Междунар. радиоэлектронный форум; Междунар. конф. "Метрология и измерительная техника": Сб. науч. тр. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. – Т. VII. – С. 146–149.

*Здобувачем проведено порівняльний аналіз класифікаційної та регресійної моделей для оцінки інформаційної значущості показників контролю.*

13. Щапов П.Ф., Осина Т.Г. Оптимизация системы информационных показателей при метрологической неопределенности параметров контроля // Метрологія та вимірювальна техніка: V Міжнар. наук.-практ. конф.: Наук. праці конф.: У 2 т. – Харків: ННЦ "Інститут метрології", 2006. – Т. 2. – С. 368–371.

*Здобувачем виконано теоретичні дослідження щодо відбору оптимального числа показників на базі пошуку максимального значення коефіцієнта кількості очікуваної вимірювальної інформації в умовах навчання системи контролю.*

14. Щапов П.Ф., Осина Т.Г. Использование функциональных моделей дисперсионного анализа для выбора алгоритма принятия решений в системе измерительного технологического контроля // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XIV Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – С. 34.

*Здобувачем зроблено аналіз впливу похибок у визначенні предикторів на точність регресійного вимірювального перетворення.*

15. Осина Т.Г. Використання багатомірних інформаційних моделей у системах вимірювального контролю // Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.: 10-й ювілейний міжнар. молодіжний форум: Зб. матеріалів форуму. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – С. 451.

16. Щапов П.Ф., Осина Т.Г., Муляров В.В. Модели неопределенности технологических измерений // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XV Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – С. 36.

*Здобувачем зроблено аналіз умов мінімізації залишкової дисперсії лінійних регресійних моделей вимірювального перетворення.*

## АНОТАЦІЇ

**Осіна Т.Г. Розвиток методів багатопараметричного експрес-контролю складу органічних сипких матеріалів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2008.

У дисертаційній роботі розв'язується наукова задача дослідження можливих шляхів підвищення вірогідності методів багатопараметричного експрес-контролю складу органічних сипких матеріалів в умовах обмеження на обсяг навчальних вибірок, зменшення часу контролю і лімітної кількості стандартних зразків, які відтворюють задані значення досліджуваних параметрів. Розроблено спрощену модель подання результатів вимірювань для кожного показника контролю, що відображує фізико-механічні властивості сипкого матеріалу. Розро-

блено методи ранжирування за зменшенням інформативності використаних показників контролю і формування підмножини показників, що забезпечують максимальне значення кількості вимірювальної інформації про рівні контрольованого параметра. Запропоновано метод статистичної дискримінації рівнів контрольованого параметра, що дозволило вперше усунути систематичні похибки вимірювань у заданих заздалегідь зонах допуску на рівні параметра контролю. Запропоновано метод теплофізичного вимірювального перетворення, що дозволив вперше підвищити вірогідність контролю за рахунок одержання додаткової вимірювальної інформації про гранулометричний склад сипких матеріалів. Практично на прикладі контролю якості і кількості вмісту клейковини зерна пшениці отримано підвищення вірогідності за рахунок застосування методу лінійної дискримінації рівнів кількості клейковини і теплофізичного перетворювача гранулометричного складу сипкого матеріалу.

**Ключові слова:** підвищення точності вимірювань, вірогідність контролю, визначення складу речовин, сипкий органічний матеріал, теплофізичний перетворювач, контрольований параметр, оптимізація, експрес-контроль.

***Осина Т.Г. Развитие методов многопараметрического экспресс-контроля состава органических сыпучих материалов. – 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, 2008.

В настоящей диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача в области повышения точности и достоверности принятия решений в ходе технического экспресс-контроля сложного объекта, в качестве которого выступает сыпучий материал с неоднородной биохимической структурой на примере содержания клейковины зерна пшеницы и масляности семян подсолнечника.

Диссертационная работа посвящена развитию методов многопараметрического экспресс-контроля состава органических сыпучих материалов в условиях ограничения на объем обучающих выборок на этапе обучения системы, уменьшения времени контроля и ограниченного количества образцов, воспроизводящих заданные значения исследуемых параметров. Усовершенствованы пути снижения влияния неопределенности результатов многомерных измерений и неопределенности вида функций измерительного преобразования на точность и достоверность многопараметрического экспресс-контроля состава органических сыпучих материалов.

Показано, что решение не может быть получено только за счет уменьшения инструментальных погрешностей средств измерительного экспресс-контроля без учета вероятностно-статистической структуры объекта контроля. Разработана упрощенная (модифицированная) модель представления результатов измерений для каждого из конечного множества показателей контроля, отражающих физико-механические свойства сыпучего материала. Это позволило расширить число учитываемых факторов, влияющих на точность получения информации о контролируемых параметрах по каждому показателю контроля.

Разработаны методы ранжирования по убыванию информативности используемых показателей контроля и формирования подмножества показателей, обеспечивающих максимальное значение количества измерительной информации об уровнях контролируемого параметра. Предложен метод статистической дискриминации уровней контролируемого пара-

метра, что позволило впервые полностью устранить систематические погрешности измерения в заданных заранее зонах допуска на уровни параметра контроля.

Разработан метод оценивания достоверности результатов многопараметрического контроля трех и более числа уровней контролируемого параметра. Предложен метод теплофизического измерительного преобразования, позволивший впервые повысить достоверность контроля за счет получения дополнительной измерительной информации о гранулометрическом составе сыпучих материалов.

Разработана конструкция теплофизического преобразователя, обеспечивающая линейность градуировочной характеристики измерения коэффициента теплоотдачи сыпучего материала.

Практически на примере контроля качества и количества клейковины зерна пшеницы получено повышение достоверности за счет применения метода линейной дискриминации уровней содержания клейковины и теплофизического преобразователя гранулометрического состава сыпучего материала.

**Ключевые слова:** повышение точности измерений, достоверность контроля, определение состава веществ, сыпучий органический материал, теплофизический преобразователь, контролируемый параметр, оптимизация, экспресс-контроль.

***Osina T.G. Development of methods of multiparameters express-control to composition organic friable materials. Manuscript.***

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.11.13 – devices and methods testing and determination of composition of materials. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, – 2008.

The dissertation work is devoted research of possible ways of increase authenticity of methods of multiparameters express-control composition of organic friable materials in the conditions of limit on the volume of teaching selections, diminishing of time of control and absence of standards, playback the set values of the probed parameters. The simplified model of presentation of results of measurings is developed for every index of control, reflecting physic-mechanics property of friable material. Methods are developed of ranging on the decrease of informing of in-use indexes of control and forming of subset of indexes, providing the maximal value of measuring information content about the levels of the controlled parameter. The method of statistical discrimination of levels of the controlled parameter is offered, that allowed first fully to remove the systematic errors of measuring in the areas of admittance on the levels of control parameter set beforehand. The method of thermophysical measuring transformation, allowing first to promote control authenticity for the account of receipt of additional measuring information about grain-size composition of friable materials, is offered. Practically on the example of control of quality and amount of maintenance of gluten of grain of wheat got step authenticity due to application of method of linear discrimination of levels of amount of gluten and thermophysical transformer of grain-size composition of friable material.

**Keywords:** increase of measuring exactness, authenticity of control, determination of composition of matters, friable organic material, thermophysical transformer, controlled parameter, optimization, express-control.