

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Шапіро Михайло Віталійович

УДК 621.317.39

**ПРИЛАДИ І МЕТОДИ ВИМІРУ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА
ТА ПРОДУКТІВ ЙОГО ПЕРЕРОБКИ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та
визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті
“Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Овчаренко Олександр Іванович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри вимірювально-інформаційної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Пиротті Євген Леонідович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри вищої математики;

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

Провідна установа:

Вінницький державний технічний університет,
Міністерство освіти і науки України, м. Вінниця.

Захист відбудеться “ 30 ” 01 2003р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д64.050.09 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за
адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного
університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий “ 28 ” 12 200 2 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми обумовлена потребою експрес-контролю вологості, як одного із шляхів підвищення якості, продуктивності та зниження витрат, у тому числі й енергетичних, при підготовці, виробництві, переробці, транспортуванні і збереженні зерна і продуктів його переробки – круп, комбікормів, макаронів, хліба і хлібобулочних виробів. Одним з можливих і найбільш перспективних напрямків створення вологовимірювачів для експрес-контролю є використання контурних резонансних перетворювачів (КРП) із індуктивними датчиками та корекцією головного заважаючого фактора. Дослідження методів контролю вологості на основі таких перетворювачів та створення власне експрес-вологовимірювачів є актуальною задачею особливо для України, стратегічним напрямком економіки якої є виробництво зерна і продуктів його переробки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація базується на результатах досліджень, отриманих автором у ході виконання: цільової комплексної програми НТУ “ХПІ” по держбюджетній темі М6104 “Дослідження проблем прикладної метрології при вирішенні задач управління якістю промислової продукції та самоконтролю технічних систем”; господарчо-договірної роботи №61928 “Розробка і дослідження експрес-вологовимірювачів зерна і продуктів його переробки”; договору про науково-технічне співробітництво між НТУ ХПІ, Академією суспільного харчування та підприємством ТОВ “Інженерна група ТФК” (м. Харків).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка і дослідження методів та засобів оперативного контролю вологості на основі КРП із індуктивними датчиками та каналом компенсації головного заважаючого фактора.

Відповідно до мети у роботі вирішені наступні основні задачі:

- синтез комплексної моделі електромагнітного КРП, створення її математичного опису та аналіз характеристик у режимах малого і великого параметрів;
- створення моделі помилок виміру вологості дискретним методом, дослідження її складових, виділення головного заважаючого фактора і вироблення комплексу апаратурних, програмно-алгоритмічних, конструктивних і технологічних заходів для мінімізації помилки;
- розробка методики синтезу алгоритмів вимірювального перетворення з обліком головного заважаючого фактора і на її основі дослідження точності регресійних моделей різної складності і пошук оптимальних по точності моделей; створення на основі виконаних досліджень нових промислових приладів для експрес-контролю вологості зерна і продуктів його переробки, конкурентноздатні у ціновому відношенні.

Об'єкт дослідження: зв'язок параметрів зерна і продуктів його переробки з електричними та інформаційними параметрами КРП з індуктивним датчиком і каналом компенсації головного заважаючого фактору.

Предмет дослідження: КРП з індуктивним датчиком і каналом виміру головного заважаючого компонента.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії електричних ланцюгів; теорії планування експерименту; ідентифікації; теорії прийняття рішень в умовах невизначеності; регресійному, дисперсійному і кореляційному аналізі; метрології і теорії точності, теорії ймовірностей та випадкових сигналів.

Відповідно до теми, метою і задачами в дисертації передбачається одержати нові науково обґрунтовані результати, які у сукупності вирішують *наукову задачу* експрес-контролю вологості зерна і продуктів його переробки на основі електромагнітних КРП з каналом виміру головного заважаючого компонента і оцінювання погрішностей виміру.

Наукова новина одержаних результатів роботи полягає в тому, що:

- розроблено наукові основи синтезу КРП з індуктивними датчиками, які функціонують з навантаженням у виді RC-моделі вологого продукту, та запропоновано класифікацію, розроблено методику дослідження і виконано дисперсійний аналіз факторів, що впливають на погрішність виміру вологості дискретними вологовимірниками з насипними датчиками;

- оцінено внески факторів у результуючу помилку, виявлено домінуючий характер впливу питомої ваги вимірюваного продукту і показано необхідність його пригнічення алгоритмічними засобами;

- розроблено методи і засоби для пригнічення та стабілізації впливаючих факторів, у тому числі запропоновано метод і засоби реалізації для корекції прогресуючих погрішностей, синтезовано алгоритм температурної корекції і розроблена методика вибору оптимального по точності способу формування проби;

- показано, що по дисперсійному відношенню Фішера можна здійснювати групування вимірюваних культур і продуктів для виміру в одному приладі;

- розроблено методику структурно-параметричної ідентифікації алгоритмів вимірювального перетворення та процедуру параметричної ідентифікації, яка заснована на критерії мінімуму залишкової дисперсії та пошукової оптимізації із застосуванням критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності;

- знайдено алгоритми вимірювального перетворення вологості з обліком головного заважаючого фактору, оптимальні по точності у підмножинах лінійних регресійних моделей, нелінійних чотиричленних регресійних моделей, нелінійних п'ятичленних регресійних моделей, а також субоптимальний алгоритм у розглянутій безлічі моделей.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на основі розроблених теоретичних положень і виконаних експериментальних досліджень розроблені, досліджені і впроваджені у промисловість вологовимірники дискретної дії ВЦЛ-11, ВЦЛ-11М, ВЦЛ-12, ВЦЛ-12М. Крім того, окремі положення роботи використані на кафедрі “Вимірювально-інформаційна техніка” НТУ “ХПІ” у лекційних курсах “Основи ідентифікації”, “Теорія планування експерименту”, а також при виконанні курсових і дипломних робіт. Розроблена апаратура і методики вимірів використовуються в Академії суспільного харчування при навчанні студентів і підвищенні кваліфікації працівників харчової і переробної промисловості.

Особистий внесок здобувача. Нові наукові результати дисертації одержані здобувачем особисто. В наукових працях, написаних здобувачем у співавторстві, йому належать: синтез модельного базису двохпараметрових рівнянь вимірювального перетворення; методика параметричного синтезу двохпараметрових рівнянь вимірювального перетворення; аналітичні дослідження впливу параметрів інгредієнтів на якість продукту; структура і принципи корекції по фазі проби; структура приладу ВЦЛ-12М; методика та результати дослідження КРП; постановка задачі і результати оцінювання погрішностей, зв'язаних з діями оператора при вимірах вологості дискретним методом; формула й алгоритм температурної корекції КРП.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 5 науково-технічних конференціях міжнародного та державного рівня: міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми інформатики та моделювання”, 2001р., НТУ “ХПІ”, м. Харків; 1-ій міжнародній науковій конференції “Раціональне використання природних ресурсів. Проблеми екології, енергозбереження, економіки, освіти та інформації в умовах ринкових відношень” - РВПІ-2001, 2001, ЧІТІ, м. Черкаси; дев'ятій Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” - “MicroCAD-2001-Харків” (2 доповіді), 2001р., НТУ “ХПІ”, м. Харків; XIV науково-технічній конференції “Датчики і перетворювачі інформації систем виміру, контролю та управління” - “Датчик-2002”, 2002р., МДІЕМ, м. Судаку; десятій Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” - “MicroCAD-2002-Харків”, 2002р., НТУ “ХПІ”, м. Харків.

Розроблені прилади демонструвалися і були відзначені грамотами на виставках: “Фермер України” (м. Київ) 2000, 2001рр.; “Агро-2000”, “Агро-2001”, “Агро-2002” (с. Чубинське, Київської обл.) 2000-2002рр.; “Продэкспо-2001”, “Продэкспо-2002” (м. Москва) 2001-2002 рр.

Апробація результатів роботи здійснена шляхом промислової експлуатації понад 40 приладів, використаних при виробництві зерна у макаронній промисловості.

Публікації результатів дисертації. Основні результати роботи опубліковані в 15 роботах, включаючи 9 статей у фахових наукових виданнях, 5 доповідей на конференціях (одна – без співавторів), 1 патент України.

Упровадження результатів роботи. У переробній і харчовій промисловості впроваджено понад 40 приладів серії ВЦЛ. Вологовимірювач ВЦЛ-12М використовувався для налагодження тунельних печей для сушіння макаронів на декількох фабриках великої і середньої продуктивності.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та 5 додатків. Повний обсяг дисертації складає 174 сторінки, з них 40 ілюстрацій по тексту, 40 таблиць по тексту, список використаних літературних джерел з 142 найменувань на 12 сторінках; 5 додатків на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показане використання вологості, як технологічного параметра у харчовій та

переробній промисловості, обґрунтована актуальність теми дисертації. Сформульовані мета та основні задачі роботи, наукова новизна і практична значимість результатів роботи. Зазначено зв'язок з науковими програмами, відомості про публікації та особистий внесок автора.

У першому розділі дані огляд і аналіз стану проблеми. Розглянуто значення і темпи виробництва в Україні зерна і продуктів його переробки, а також проблема оснащення галузі засобами контрольно-виміральної техніки взагалі і експрес-вологовимірниками – зокрема. Відображена роль вологості, як технологічного параметра, на всіх стадіях – від конструювання машин і устаткування для переробки до підготовки виробництва, збереження, транспортування і переробки зерна. На прикладі виробництва макаронів в аналітичному виді показаний вплив вологості на якість проміжних і остаточних продуктів, висунута концепція поопераційного контролю вологості. Виконаний короткий огляд методів і приладів виміру вологості зерна і продуктів його переробки. Розглянуто основні електричні моделі вологовмісту в сипучих речовинах і показана перспектива РС-моделі. Представлено класифікацію і виконаний вибір для досліджень раціональних для практики засобів первинного вторинного перетворення – відповідно індуктивного датчика і КРП. Відображений недостатній ступінь дослідження цих засобів і відповідних методів. Сформульовані висновки, ціль досліджень і основні задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

В другому розділі виконаний теоретичний аналіз моделей КРП. Методика і результати досліджень можуть бути легко трансформовані і на випадок ємкісних датчиків. Для досліджень запропонована комплексна модель, яка включає не тільки первинні і вторинні перетворювачі, але й модель вимірюваної величини і моделі взаємодії між ними. Дано результати ідентифікації модельних параметрів деяких зернових культур і показана доцільність використання РС-моделі. Запропоновано поетапне дослідження КРП: спочатку грубе у режимі великого параметра, а потім уточнююче в режимі малого параметра. Основою для досліджень є базова модель КРП, передатна функція якої дорівнює:

$$W(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s)}{E(s)} \approx \frac{C_p L_k s^2}{C_p C^* L_k R_z s^3 + (C^* L_k + R_z C_p L_k / R_n + C_p L_k) s^2 + (R_z C_p + L_k / R_n) s + 1} \quad (1)$$

Після обґрунтування і виконання деяких допущень з (1) отримана амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) КРП щодо узагальнених параметрів:

$$A(\omega) \approx \frac{\alpha \sqrt{1 - \alpha - \beta^2 + \chi^2} \beta - \delta^2}{1 - \alpha - \beta^2 + \chi^2 \beta - \delta^2} \quad (2)$$

де $\alpha = \omega^2 / \omega_{\text{пос}}^2$ - відносна расстройка послідовного контуру;

$\beta = \omega_{\text{пар}}^2 / \omega_{\text{пос}}^2$ - расстройка рівнобіжного контуру щодо послідовного;

$\chi = \omega_1 / \omega_{\text{пос}}$ - відносна константа послідовного контуру;

$\delta = (\omega_2 + \omega_1) / \omega_2$ - відносна константа рівнобіжного контуру;

$\omega_{\text{пос}} = 1 / \sqrt{L_k C_p}$ - резонансна частота послідовного контуру;

$\omega_{\text{пар}} = 1 / \sqrt{L_k C^*}$ - резонансна частота рівнобіжного контуру;

$\omega_1 = 1 / (R_r C_p)$ - абсолютна константа послідовного контуру;

$\omega_2 = R_n / L_k$ - абсолютна константа рівнобіжного контуру.

Розглянуто два випадки настроювання послідовного контуру. У першому з них послідовний контур набудовується в резонанс із частотою генератора, тобто $\alpha = 1$ й АЧХ здобуває вид:

$$A(\omega) \approx \frac{1}{\sqrt{\beta^2 + \chi^2 (\beta - \delta)^2}} \quad (3)$$

Для доступної інтерпретації результатів досліджуються два крайніх варіанта: модель вимірюваної величини володіє тільки R-чутливістю $C_n = 0$, $R_n = \mathbf{var}$ і модель вимірюваної величини володіє тільки C-чутливістю $C_n = \mathbf{var}$, $R_n = \infty$. Моделювання в режимі великого параметра дозволило виявити діапазони параметрів RC-моделі, у яких раціональне використання КРП.

У режимі малого параметра дослідження проведені в більш вузькому діапазоні, де чутливість істотно відрізняється від нуля. Вихідними параметрами моделювання прийняті значення чутливості і нелінійності перетворення.

Аналіз чутливості і лінійності R-характеристик у режимі малого параметра дозволив зробити наступні висновки: чутливість і похибка нелінійності як функції C_k / C_p мають явно виражені і практично співпадаючі по аргументу максимуми; зазначені максимуми мають місце при $C_k / C_p \approx 0,004 \dots 0,01$, причому з ростом опору генератора R_r максимуми зміщуються у бік менших значень C_k / C_p ; величина опору генератора R_r дуже сильно позначається на величині чутливості; залежність чутливості від опору генератора в практичних розрахунках може бути оцінена по формулах:

$$S_R \approx -6,9927 * E-7 * \ln(R_r) + 3,9973 * E-6, \quad (4)$$

$$S_R \approx 5,8593 * E-5 * R_r^{-9,7014 * E-1}. \quad (5)$$

Величина опору генератора практично не впливає на максимальні значення погрешностей; залежність максимального значення відносної погрешності від опору генератора в практичних розрахунках може бути оцінена по формулі:

$$|\Delta_R|_{\text{max}} \approx -4,1000 * E-4 * R_r + 2,3265 * E+0. \quad (6)$$

Аналіз чутливості і лінійності С-характеристик у режимі малого параметра дозволив зробити наступні висновки: чутливість і похибка нелінійності як функції C_k/C_p мають при малих значеннях R_T явно виражені максимуми, причому максимуми похибки зрушені щодо максимумів чутливості у бік великих аргументів; зазначені максимуми мають місце при $C_k/C_p \approx 0,005 \dots 0,02$, причому з ростом опору генератора R_T максимуми зміщаються у бік менших значень C_k/C_p тільки для чутливості, для похибки максимуми зосереджені в околиці крапки $C_k/C_p \approx 0,015$; величина опору генератора R_T дуже сильно позначається на величині чутливості, ця залежність у практичних розрахунках може бути оцінена по формулі:

$$S_C \approx 7,0882 \cdot 10^4 \cdot R_T^{-1,8998}; \quad (7)$$

величина опору генератора сильно впливає на максимальні значення похибки, причому С-характеристики, будучи увігнутими при $R_T = 50$ Ом, стають опуклими при $R_T = 200$ Ом. Фактично це приводить до того, що мається деякий набір змінних, при якому похибка дорівнює нулю. Цей набір оцінюється нами, як $R_T \approx 100$ Ом, $C_k/C_p \approx 0,02$.

У третьому розділі запропоновані методика і виконаний дисперсійний аналіз помилок виміру вологості на основі КРП. Запропоновано модель похибки вимірів, що включає три основних складових: похибки КРП (інструментальна похибка), похибки оператора та похибки, обумовлені об'єктом виміру. Виконаний роздільний аналіз зазначених похибок.

На прикладі макаронних виробів показано, що смуга абсолютних інструментальних похибок при 20°C має вид:

$$\Delta(N) = \Delta_0 + \gamma_S (N-628), \quad (8)$$

де $\Delta_0 \approx 2$ – аддитивна складова абсолютної похибки;

$\gamma_S (N-628) \approx 0,0148(N-628)$ – мультиплікативна складова абсолютної похибки.

Запропоновано методику оцінювання і корекції температурної похибки. Алгоритм корекції похибки (8) має вид: $N_{ij}^* = N_{ij} / (A \Delta t + 1)$, де для макаронних виробів по методу мінімальної залишкової дисперсії визначене $A=0,00703723$. Корекція в діапазоні $10 \dots 35^{\circ}\text{C}$ зменшила математичне чекання абсолютної температурної похибки в 5 разів, а середньоквадратичне відхилення - у 4 рази. Досліджено прогресуючі похибки і запропоновані заходи для їхньої мінімізації. Найбільш конструктивною мірою є перехід від методу безпосередньої оцінки до методу порівняння. Запропоновано прості робочі міри вологості у виді тари із законсервованим (залитим парафіном) матеріалом. Ефективність запропонованого способу корекції підтверджена експериментально протягом місяця (приблизно по 10 вимірів у день) і в умовах некервованого температурного дрейфу ($\approx 16 \dots 23^{\circ}\text{C}$). Основні висновки отримано в результаті експерименту: при збереженні невеликої асиметрії розподілу істотно збільшився ексцес; корекція викликала кількісні зміни в законі розподілу погрішностей – практично в 4 рази зменшилося середньоквадратичне відхилення; в умовах малої мультиплікативної складової інструментальна похибка КРП з урахуванням запасу в 1.25 може бути оцінена як ± 1 одиниць молодшого розряду (для довірчої імовірності 0,95). Це означає, що похибка аналогової частини порівняння з похибкою квантування АЦП і що число розрядів АЦП (10 двоїчних) обрано вірно. Виконаний

двохетапний аналіз похибок оператора. На першому етапі досліджений вплив способу формування проби на похибку вимірів вологості і вироблені рекомендації з її мінімізації. Після виявлення оптимального по точності способу формування оцінено вплив оператора саме як суб'єкта, шляхом розпорядження йому дій по виявленому оптимальному по точності способу.

Дослідження проведені для культур з великою, середньою і малою дисперсністю, що максимально відрізняються друг від друга (сімейство, рід, вид, морфологічні особливості і т.д.). Однофакторний дисперсійний аналіз (ДА) для 5 способів формування проби привів до результатів, відбитих у табл.1.

Таблиця 1

Оцінки дисперсійних відносин для різних продуктів

| Культура | Оцінка внутрігрупової дисперсії S_e^2 | Оцінка міжгрупової дисперсії S_x^2 | Розрахункове значення F |
|----------------|---|--------------------------------------|-------------------------|
| Гречана крупа | 14,4 | 120,73 | 8,39 |
| Цукор | 32,89 | 1549,13 | 47,1 |
| Пшенична крупа | 193,75 | 1424,67 | 7,35 |
| Перлова крупа | 54,31 | 968,13 | 17,83 |
| Горохова крупа | 20,83 | 580,52 | 27,87 |
| Рапс | 4,80 | 436,33 | 90,94 |
| Льон | 17,32 | 3959,17 | 228,59 |
| Соя | 14,61 | 884,15 | 60,52 |
| Соняшник | 28,77 | 3876,43 | 134,74 |
| Коноплі | 17,53 | 1145,78 | 65,37 |

Для всіх досліджених культур гіпотеза про істотність впливу способу формування проби виконується навіть при $\alpha=0.01$ ($F_{0,01} = 3,77$). Таким чином, першим і головним висновком цієї частини досліджень є те, що спосіб формування проби є істотним чинником і обов'язково повинний бути обговорений при калібруванні й експлуатації приладу. Зневага цією умовою може викликати значні відхилення похибки результатів вимірів від декларуємих значень.

Другий і при отриманому висновку про значимість фактора “спосіб” - головне питання, що виникає при описуванні дослідженнях, це – вибір оптимального за деякими критеріями способу формування проби. Попередній аналіз експериментальних даних показав, що необхідно виділити більш дрібні групи культур для того, щоб досягти однорідності оптимального способу в межах групи. Таким чином, виникла задача класифікації вимірюваних культур. Спроба вирішити цю задачу ранжируванням за критерієм F для всіх десяти культур (табл.1) принесла успіх. Таким чином, отриманий критерій для поділу культур при дослідженнях. Так само (роздільно) з погляду мінімізації погрішностей, внесених способом формування проби, варто проектувати вологовимірювачі. Для зернових і олійних культур роздільно методом ДА виявлені оптимальні способи формування проби.

Виконано аналіз суб'єктивного впливу оператора в рамках регламентованого оптимальних по точності способу формування проби. Показано, що з імовірністю помилки першого

роду $\alpha = 0,05$ може бути прийнята гіпотеза про сумірність впливу оператора і неврахованих факторів (наприклад, інструментальних погрешностей) на погрешність вимірювального перетворення КРП і формування ваги проби.

Знайдені оптимальні способи формування проби використовуються у вологовимірювачах серії ВЦЛ.

Похибки, внесені об'єктом виміру, досліджені різновидом ДА – способом латинських квадратів. Результати представлені в табл.2. У таблиці прийняті позначення: d - дисперсність продукту, P – вага проби, W – вологість продукту.

У підсумку показано, що тільки два фактори (питома вага і вологість) відчутно впливають на вихідний сигнал КРП, причому вплив питомої ваги, як і передбачалося за попередніми оцінками позначається сильніше. Розроблені раніше заходу для придушення і стабілізації факторів інших груп виявилися, таким чином, доцільні до застосування (знижують внесок неврахованих факторів). Фактор же “питома вага” необхідно враховувати в рівнянні вимірювального перетворення, оцінивши його кореляційні зв'язки з вихідним сигналом КРП і корисним фактором “Вологість”.

У четвертому розділі розроблені і досліджені алгоритмічні методи обліку домінуючого заважаючого фактора. Розроблено методику ідентифікації рівняння вимірювального перетворення з обліком головного фактора, що заважає, що включає три основних задачі: структурного синтезу, параметричного синтезу, пошукової оптимізації.

При рішенні задачі структурного синтезу обґрунтований вибір класу двохпараметрових моделей другого порядку: від лінійної тричленної моделі виду:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (9)$$

до повної квадратично шестичленної моделі виду:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2, \quad (10)$$

– усього 17 моделей.

Методом мінімальної залишкової дисперсії вирішена задача параметричного синтезу, тобто відшукання оцінок b -коефіцієнтів моделей (9)...(10). Для завершальної задачі – пошукової оптимізації - запропонована двоступінчаста процедура виявлення оптимальної по точності моделі з визначеного класу. Відшукується оптимальна модель у кожному підкласі, а потім - субоптимальна серед кращих у своїх підкласах. Для вирішення конфліктних ситуацій при оптимізації притягнутий апарат прийняття рішень в умовах невизначеності. Конфліктні ситуації виникають через неоднозначність вибору точностного критерію. У роботі використовувалися наступні критерії:

- скоректований коефіцієнт детермінації:

$$R_p^2 = 1 - \left[(1 - R^2) \left(\frac{n}{n - p} \right) \right], \quad (11)$$

де p – кількість предикторів.

- множинний коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (12)$$

де $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ – оцінка середнього в навчаючій вибірці.

- критерій Маллоуза:

$$C_P^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} - \frac{2p}{n-2p} \quad (13)$$

де \hat{Y} – прогноз по моделі з максимальною кількістю предикторів.

Для процедури пошукової оптимізації запропоновано застосувати математичний апарат теорії прийняття рішень в умовах невизначеності. У цьому випадку складають матрицю:

| | | | | | |
|-------------|---------------------------|---------------------------|-------|---------------------------|------|
| | λ_1 | λ_2 | | λ_k | |
| φ_1 | $v(\varphi_1, \lambda_1)$ | $v(\varphi_1, \lambda_2)$ | | $v(\varphi_1, \lambda_k)$ | |
| φ_2 | $v(\varphi_2, \lambda_1)$ | $v(\varphi_2, \lambda_2)$ | | $v(\varphi_2, \lambda_k)$ | |
| · | · | · | · | · | |
| · | · | · | · | · | |
| · | · | · | · | · | |
| φ_q | $v(\varphi_q, \lambda_1)$ | $v(\varphi_q, \lambda_2)$ | | $v(\varphi_q, \lambda_k)$ | (14) |

де λ_i – можливий стан оптимізуємої системи (критерії точності);

φ_j – можлива дія (вибір тієї чи іншої моделі);

$v(\varphi_j, \lambda_i)$ – виграш (програв) при виборі j-го дії і реалізації i-го стану.

Робота з матрицею (14) може здійснюватися по ряду стратегій:

- використання критерію Лапласа, відповідно до якого вибирається варіант із максимальним виграшем:

$$\max_{\varphi_j} \left\{ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v(\varphi_j, \lambda_i) \right\} \quad (15)$$

- використання мінімаксного критерію, відповідно до якого вибирається найкращий з гірших варіантів:

$$\max_{\varphi_j} \min_{\lambda_i} v(\varphi_j, \lambda_i) \quad (16)$$

- використання критерію Севиджа передбачає застосування мінімаксного критерію (16), але для матриці (14) з елементами (приводиться випадок виграшів):

$$r(\varphi_j, \lambda_i) = \max_{\varphi_j} v(\varphi_j, \lambda_i) - v(\varphi_j, \lambda_i) \quad (17)$$

- використання критерію Гурвіца припускає варіантний вибір рішення (від самого оптимістичного до самого песимістичного) за рахунок уведення показника оптимізму $\alpha \in 0 \dots 1$ (приводиться для виграшів):

$$\max_{\varphi_j} \alpha \max_{\lambda_i} v(\varphi_j, \lambda_i) + (1 - \alpha) \min_{\varphi_j} v(\varphi_j, \lambda_i) \quad (18)$$

Оскільки ситуація з вибором стратегії теж є невизначеною, тому рекомендується приймати рішення методом голосування за всіма критеріями (15)...(18). У результаті описаної процедури оптимальним по точності визнаний алгоритм:

$$\hat{W} = -192,80 + 0,75167 N - 0,00023451 NP - 0,00058273 N^2 \quad (19)$$

На основі процедури дослідження залишків (помилки прогнозування вологості) виконаний доказ адекватності моделі (19). Аналіз залишків, як міри непояснених варіацій, переслідує дві основних мети: перевірити основні допущення, прийняті при синтезі регресійної моделі, про незалежність помилок, про рівність нулю їхніх середніх значень, про рівність (сталості) дисперсій і про нормальність закону розподілу; перевірити відсутність трендів у тимчасових рядах, представлених залишками. Сама процедура включає: перевірку гіпотези про нормальність розподілу (проводилася за непараметричним критерієм χ^2); перевірку гіпотези про нульовий середньому залишків (перевірялася за допомогою двостороннього Т-тесту); дослідження залишків як погрішностей, що мають тільки аддитивну складову (F-тест на значимість лінійних регресій позитивних і негативних залишків); тестування незалежності залишків і їхньої стаціонарності за середнім значенням (перевірялася за критерієм Вілкоксона). У підсумку виявилось, що всі умови регресійного аналізу виконана і модель адекватна.

У п'ятому розділі приведені основні результати розробки і впровадження. Описано розроблені прилади ВЦЛ-11, ВЦЛ-11М, ВЦЛ-12, ВЦЛ-12М та їхні технічні характеристики; приводяться основні положення програми метрологічної атестації цих приладів; дані зведення упровадження вологовимірювачів у промисловості; розглянуті перспективи подальшої розробки даної тематики (зокрема, застосування потокових вологовимірювачів для керування процесами в макаронній промисловості) і використання отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача розробки і дослідження методів і засобів оперативного контролю вологості на основі КРП з індуктивними датчиками і каналом компенсації головного заважаючого фактору.

Найбільш важливими науковими і практичними результатами, отриманими в роботі, є:

- розроблені наукові основи синтезу КРП з індуктивними датчиками, що функціонують з навантаженням у виді RC-моделі вологого продукту;

- запропонована класифікація, розроблена методика дослідження і виконано дисперсійний аналіз факторів, що впливають на погрішність виміру вологості дискретними вологовимірювачами з насипними датчиками;

- оцінені внески факторів у результуючу помилку, виявлений домінуючий характер впливу питомої ваги вимірюваного продукту і показана необхідність його пригнічення алгоритмічними засобами;

- розроблені методи і засоби для придушення і стабілізації факторів, що впливають, у тому числі запропоновані метод і реалізуючі засоби для корекції прогресуючих погрішностей, синтезований алгоритм температурної корекції і розроблена методика вибору оптимального по точності способу формування проби;

- показано, що по дисперсійному відношенню Фішера можна здійснювати групування вимірюваних культур і продуктів для виміру в одному приладі;

- розроблена методика структурно-параметричної ідентифікації алгоритмів вимірювального перетворення і процедура параметричної ідентифікації, заснована на критерії мінімуму залишкової дисперсії і пошукової оптимізації з застосуванням критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності;

- знайдені алгоритми вимірювального перетворення вологості з обліком головного заважаючого фактору, оптимальні по точності в підмножинах лінійних регресійних моделей, нелінійних чотиричленних регресійних моделей, нелінійних п'ятичленних регресійних моделей та субоптимальний алгоритм у розглянутій безлічі моделей;

- на основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів створені і серійно випускаються прилади для виміру вологості і супутніх параметрів зернових культур і продуктів їхньої переробки, розроблена технічна документація на ці прилади, включаючи методику метрологічної атестації.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Оценка влияния нестабильности факторов при замешивании теста в макаронном производстве. // Труды Международной конференции "MICROCAD-2001".- Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001.

Автором узагальнено аналітичні співвідношення та чисельні розрахунки впливу параметрів інгредієнтів на якість продукту, новизна яких полягає в тому, що вони дозволяють виявити

питому вагу впливу вологості на процеси.

2. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Модельное оценивание влияния нестабильности факторов. // Материалы международной научно-технической конференции “Проблемы информатики и моделирования”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. - 2001. - С. 11.

Здобувачем запропоновано нову методику розрахунку коефіцієнтів впливу параметрів двохкомпонентних сумішей на якість процесів у макаронній промисловості.

3. Комирный А.С., Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Вычислительные аспекты высокочастотных методов измерения влажности на основе феноменологических RC-моделей. //Материалы международной научно-технической конференции “Проблемы информатики и моделирования”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2001. – С. 3.

Автором сформульовано задачі оптимізації за розміром похибки при структурно-параметричному синтезі регресійних рівнянь другого порядку і методика її рішення.

4. Комирный А.С., Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Синтез статических моделей двухпараметровых измерительных резонансных преобразователей. //Системы обработки информации (Харківський військовий університет). - 2001. - Вип. 5 (15). - С. 116-121.

Автором запропоновано методичні основи оптимального параметричного синтезу алгоритмів вимірювального перетворення для двопараметрових перетворювачів.

5. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Способ учета главной влияющей компоненты при измерениях влажности зерновых культур и продуктов их переработки. //Тезисы докладов 1-ой международной научной конференции “Рациональное использование природных ресурсов. Проблемы экологии, энергосбережения, экономики, образования и информации в условиях рыночных отношений”. - Черкасы:ЧИТИ. – 2001.- С. 33-34.

Автором запропоновано метод обліку головної впливової компоненти при вимірюванні вологості, що дозволяє одержати суттєве підвищення точності при збереженні високої швидкості вимірювання.

6. Комирный А.С., Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Вычислительные аспекты высокочастотных методов измерения влажности на основе феноменологических RC-моделей. //Системы обработки информации (Харківський військовий університет). - 2002. - Вип. 6 (16). - С. 62-69.

Автором запропонована модифікація обчислювального алгоритму методу найменших квадратів, що реалізовано у середовищі пакету “Математика”.

7. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Модельное оценивание влияния нестабильности факторов (на примере процессов в макаронной промышленности). //Системы обработки информации (Харківський військовий університет). - 2002. - Вип. 6 (16). - С. 88-93.

Автором запропоновано модель поопераційного контролю вологості на прикладі процесів у макаронній промисловості.

8. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Экспресс-измерения влажности зерновых культур и продуктов их переработки с коррекцией по весу пробы. //Хранение и переработка зерна. – 2001. - №12(30).- С. 22-23.

Автором запропоновано структуру приладу та принципи корегування по масі виміральної проби.

9. Овчаренко А.И., Щапов П.Ф., Комирный А.С., Шапиро М.В. Цифровой экспресс-влажномер для макаронной промышленности. //Хранение и переработка сельхозсырья. - Российская Академия сельскохозяйственных наук. - 2002.- №1.- С. 53-54.

Здобувачем запропонована структура та результати дослідження технічних характеристик приладів ВЦЛ-11М та ВЦЛ-12М.

10. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. Исследование моделей резонансных измерительных преобразователей при измерениях влажности сыпучих материалов. //Системы обработки информации (Харківський військовий університет). - 2002. - Вип. 1 (17). - С. 42-47.

Автором запропонована методика та результати дослідження КРП у режимах великого та малого параметру, емпіричні залежності чутливості та нелінійності перетворювання від параметрів перетворювача.

11. Овчаренко А.И., Шапиро М.В. О погрешности измерительного преобразования во влагомерах. //Хранение и переработка зерна. – 2002.- №4(34). – С. 36-39.

Автором запропонована методика та результати дослідження похибок вимірювання за рахунок оператора, що виконує вимірювання.

12. Овчаренко А.И., Шапиро М.В., Щапов П.Ф. Коррекция погрешностей по минимуму остаточной дисперсии. //Український метрологічний журнал. – 2002. - Вип.2 . – С. 5-7.

Автором запропоновано алгоритм та методика коригування похибок на основі мінімуму залишкової дисперсії.

13. Овчаренко А.И., Шапиро М.В., Комирный А.С. Контурные резонансные преобразователи влажности сыпучих веществ с индуктивными датчиками. // Сборник материалов XIV Научно-технической конференции “Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления” (“Датчик-2002”). – М.: МГИЭМ. - 2002. – С. 134-135

Автором запропоновані теоретичні основи резонансних КРП вологості та результати їх моделювання.

14. Шапиро М.В. Исследование составляющих ошибки измерения влагомерами дискретного действия. // Материал X международной научно-практической конференции “Информационные технологии, техника, технология, образование, здоровье”. – Харьков. - 2002.

15. Середа О.Д., Шапиро М.В., Стеганцов І.В. Патент на промисловий зразок № 1029 від 29.09.1995р., Україна. Машина для виробництва макаронних виробів. Заяв.06.06.95. Опубл. 29.09.95. Бюл.№ 3.

АНОТАЦІЇ

Шапиро М.В. Прилади і методи виміру вологості зерна та продуктів його переробки. – 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, 2003.

Дисертація присвячена питанням розробки та дослідження двопараметрових методів та реалізуючих їх пристроїв для вимірювання вологості зерна та продуктів його переробки на основі КРП з корегуючим каналом по масі проби. Розроблені наукові основи синтезу КРП з індуктивними давачами, функціонуючих с навантаженням у виді RC-моделі вологого продукту. Розроблені класифікація, методика дослідження та виконано дисперсійний аналіз факторів, що впливають на похибку вимірювання вологості. Отримана оцінка вкладів факторів в результуючу похибку, виявлено домінуючий характер впливу насипної маси та необхідність його придушення алгоритмічними засобами. Розроблені методи і засоби для придушення і стабілізації впливаючих факторів. Розроблена методика структурно-параметричної ідентифікації регресійних алгоритмів вимірювального перетворення і знайдені оптимальні по точності алгоритми. На підставі проведених досліджень розроблені серійні прилади.

Ключові слова: вологомір, зерно та продукти його переробки, контурний резонансний перетворювач, корегуючий канал по насипній масі проби, двопараметрова регресійна модель.

Шапиро М.В. Приборы и методы измерения влажности зерна и продуктов его переработки. – 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, 2003.

Диссертация посвящена исследованию и разработке двухпараметровых методов измерения и реализующих их устройств на основе контурных резонансных преобразователей (КРП) и канала учета главного влияющего фактора – насыпной массы пробы.

Повышение точности измерения влажности зерна и продуктов его переработки позволяет значительно повысить эффективность производства, хранения, переработки, транспортировки зерна и продуктов его переработки. Проведен обзор методов контроля влажности сыпучих материалов. Показана целесообразность для экспресс-контроля применения высокочастотных влагомеров с КРП по сравнению с кондуктометрическими и сверхвысокочастотными приборами.

Выполнены теоретические исследования КРП и предложена комплексная модель КРП, включающая в себя модели первичного преобразователя, измеряемой величины, взаимодействия измеряемой величины и первичного измерительного преобразователя, модель взаимодействия первичного и вторичного измерительных преобразователей; выполнена идентификация параметров RC-моделей зерна и отдельных продуктов его переработки; создано математическое описание модели КРП, обоснованы допущения, получены базовые формулы для расчета КРП; предложены процедуры раздельного анализа КРП в режимах малого и большого

параметров, а также отдельного анализа R-характеристик и C-характеристик для RC-моделей измеряемых продуктов; создана программа в среде EXCEL, предназначенная для моделирования КРП; выполнен анализ чувствительности и погрешности за счет нелинейности для R-характеристик и C-характеристик, получены качественные и количественные оценки этих характеристик и формулы для инженерного расчета чувствительности и погрешности за счет нелинейности. На основе полученных теоретических результатов разработана инженерная методика расчета КРП, использованная для проектирования реальных приборов.

Предложена модельная структура и разработаны методологические основы дисперсионного анализа ошибок измерительного преобразования влажности сыпучих сельхозкультур и продуктов их переработки во влагомерах дискретного действия. Выполнен анализ, получены числовые значения метрологических характеристик и предложены меры по минимизации инструментальных ошибок КРП, включая алгоритм температурной коррекции и способ исключения прогрессирующих погрешностей. Выполнен анализ ошибок, вносимых оператором. Предложены методика и ранговый критерий, использующий дисперсионное отношение Фишера, а также меры по стабилизации влияния этого фактора в виде выбора наиболее точных способов формирования пробы. Показано, что объединение измеряемых культур и продуктов их переработки в одном приборе целесообразно осуществлять по величине дисперсионного отношения Фишера. Доказано, что в рамках фиксированного способа формирования пробы погрешность, связанная с индивидуальными особенностями оператора, статистически незначима. Выполнен анализ влияний факторов, обусловленных самим измеряемым продуктом, вычислены вклады факторов и показано, что фактор “удельный вес” должен быть учтен в уравнении измерительного преобразования.

Показана возможность применения двух способов подавления главного мешающего фактора – его физическая стабилизация и его алгоритмический учет в уравнении измерительного преобразования. Разработана методика структурно-параметрической идентификации уравнения измерительного преобразования, на основе которой реализуется вычислительный метод коррекции результатов измерения влажности по объемной массе пробы. Разработана методика оптимального по точности выбора уравнения измерительного преобразования в условиях неопределенности критерия оптимальности. Выполнен синтез оптимальных по точности регрессионных моделей в подмножествах трехчленных линейных, четырехчленных и пяти-членных неполных квадратичных регрессионных моделей и полной шестичленной квадратичной модели, а также анализ остатков, включая оценку выполнения основных допущений регрессионного анализа и тестирование на отсутствие. Проведен анализ адекватности моделей и поисковая оптимизация в указанных подмножествах, в результате которой найдены оптимальные алгоритмы в рассматриваемых подмножествах, а также субоптимальный алгоритм. Исследованы метрологические характеристики, включая методическую и инструментальную погрешности вычислений; соотношение инструментальной и методической погреш-

ности и разработаны практические рекомендации по выбору длины разрядной сетки микроконтроллера.

Созданы и серийно выпускаются влагомеры типа ВЦЛ, предназначенные для измерения влажности зерновых культур и продуктов их переработки.

Ключевые слова: влагомер, зерно, продукты его переработки, контурный резонансный преобразователь, корректирующий канал по насыпной массе пробы, двухпараметровая регрессионная модель.

Shapiro M.V. Devices and methods for measuring humidity of grain and products of grain processing. – Typescript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a speciality 05.11.13 – devices and methods for check-up and analysis of substance composition. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2003.

The thesis is dedicated to the issues of development and study of two-parameter methods and devices for measurement of grain and grain processing products' humidity on the basis of contoured resonant transducer (hereinafter “CRT”) with test sample mass correcting channel. Scientific basics of synthesis of CRT and variable-induction pickups working at capacity in the form of damp product's RC-model have been developed. Classification and methods of the present thesis have been developed and a dispersed analysis of factors that influence precision of humidity measurements has been carried out. There has been made an assessment of the above factors' influence on the resultant error, the dominating character of bulk weight influence and a necessity to suppress it algorithmically have been established. Methods and means for suppression and stabilisation of influencing factors have been developed. Methods of structural and parametrical identification of regression algorithms of measurement conversion have been developed and optimal with respect to precision algorithms have been established. On the basis of the above research devices for commercial production have been designed.

Key words: humidity meter, grain and grain processing products, contoured resonant transducer, test sample mass correcting channel, two-parameter regression model.