

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БОГАЧУК ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 681.78

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ
ВОЛОГОСТІ ПОРОШКОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ
В ІНФРАЧЕРВОНІЙ ОБЛАСТІ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2007

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Мокін Борис Іванович,
Вінницький національний технічний університет,
ректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Петрук Василь Григорович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри “Хімія та екологічна безпека”

доктор технічних наук, професор
Стенцель Йосип Іванович
Сєверодонецький технологічний інститут
Східноукраїнського національного університету
імені В. Даля, завідувач кафедри “Автоматизація
технологічних процесів”

Захист відбудеться “29” вересня 2007 р. о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий " 22 " серпня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. В. Павлов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з основних завдань, які стоять перед промисловими підприємствами України з огляду на перспективу входження до СОТ є підвищення конкурентоспроможності виготовлюваної продукції. Досягнути цього можна лише через зниження собівартості та підвищення якості продукції шляхом більш раціонального використання сировини та інтенсифікації процесів її переробки, а також впровадження новітніх технологій та достовірних засобів контролю основних технологічних параметрів продукту на всіх стадіях виробництва. В першу чергу це стосується підприємств харчової та переробної промисловості агропромислового комплексу. На сьогоднішній день значну частину діючих підприємств цих галузей складають молокопереробні заводи та заводи з виготовлення сухого молока.

Основним технологічним параметром якості сухого молока є масова доля вологи в готовому продукті. На переробних підприємствах цей параметр вимірюють у лабораторіях термогравіметричним способом. Тільки даний спосіб із всіх відомих рекомендовано ГОСТ 29246-91 до застосування для контролю вологості сухого молока. Але цей метод вимагає значних затрат часу, а отже робить неможливим оперативне керування технологічним процесом сушки.

Відомі засоби контролю вологості порошкоподібних матеріалів, до яких відносяться сухі молочні продукти, є громіздкими, працюють переважно в ручному режимі, мають низьку точність, достовірність та швидкодію. Результати вимірювань залежать від впливу неінформативних параметрів, таких як: хімічний та гранулометричний склад матеріалу, його температура, неоднорідність, щільність та нерівномірність розподілу вологи в об'ємі.

Саме тому очевидною є необхідність вдосконалення відомих та розвитку нових методів вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів, до яких відноситься сухе молоко, та створення на їх основі засобів автоматизованого контролю вологості в технологічному процесі їх виробництва. Вони повинні забезпечувати високу точність, чутливість і вірогідність контролю.

Використання таких вологомірів у промисловості дозволить покращити якість, знизити витрати на виробництво продукції і, як наслідок, підвищити її конкурентоспроможність.

Суттєвий доробок у розробку теорії, методів та засобів контролю вологості порошкоподібних матеріалів внесли такі вчені: Берлінер М.А., Кісіль І.С., Кричевський Є.С., Осадчук В.С., Бандак М.І., Бензарь В.К., Невзлін Б.І. та їхні учні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2002-2007 років у відповідності з тематичними планами проведення НДДКР у Вінницькому державному технічному університеті та Вінницькому національному технічному університеті на госпдоговірних засадах з ПП "Фірма Кастор" (м. Вінниця), договір № 4211 від 27.12.2002 р. "Розробка і виготовлення вологоміра зерна" (№ державної реєстрації 0103U008912), а також договору № 29/5 від 10 січня 2007 р. з ВАТ "Вінницький міський молочний завод".

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення вірогідності контролю вологості порошкоподібних матеріалів у реальному часі технологічного процесу шляхом використання відносного методу контролю.

Відповідно до цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

- здійснити огляд відомих методів та засобів контролю вологості порошкоподібних матеріалів;
- вдосконалити математичну модель об'єкту контролю та розробити математичну модель первинного вимірювального перетворювача вологості;
- вдосконалити метод безпосереднього контролю вологості порошкоподібних матеріалів, розробити структурну схему для його здійснення і алгоритм вимірювального контролю;
- розробити відносний метод контролю вологості порошкоподібних матеріалів, структурну схему для його здійснення і алгоритм вимірювального контролю;
- оцінити невизначеність вимірювань розроблених засобів та вірогідність контролю;
- провести метрологічні дослідження і пронормувати похибки засобу вимірювання вологості на прикладі сухого молока і прального порошку та експериментально підтвердити отримані

теоретичні результати та прийняті гіпотези.

Об'єкт дослідження – процес вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів.

Предмет дослідження – методи та засоби вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів в умовах їхнього виробництва.

Методи дослідження – при розв'язанні поставлених задач використано методи математичного та фізичного моделювання, теорію вимірювального перетворення, теорію контролю, теорію випадкових процесів, методи математичної статистики при обробці результатів, методи метрологічної атестації і перевірки нестандартизованих засобів вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні та розробці нових методів та засобів вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів в інфрачервоній області, які дозволяють в промислових умовах у реальному часі забезпечити вірогідність контролю, що не поступається термогравіметричному методу, і для реалізації яких:

1. Вперше розроблено відносний метод контролю та структурну схему для його здійснення, які від відомих відрізняються тим, що результат вимірювання отримують як різницю відношень спектральних коефіцієнтів відбиття вимірювального та опорного каналів при нульовій вологості. Встановлено, що при створенні однакової освітленості фотоприймачів вимірювального та опорного каналів результати вимірювання інваріантні до величини частинок матеріалу, його пористості, кольору, шорсткості. Експериментально доведено, що засоби, які реалізують даний метод, характеризуються самою високою вірогідністю контролю (0,86 – 0,95).

2. Вдосконалено математичну модель об'єкта контролю у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка адекватно описує фізичні процеси, що протікають під час конвективної сушки порошкоподібних матеріалів (похибка моделі не перевищує 8ч10%). Встановлено закономірність між вхідною величиною (температура гарячого повітря) та вихідною – вологовміст порошкоподібних матеріалів. Показано зв'язок між допусками на контрольований параметр (від 3,5% до 4,5%) і відповідними змінами температури гарячого повітря (від 70⁰ С до 130⁰ С).

3. Вдосконалено математичну модель первинного вимірювального перетворювача, яка враховує параметри джерела світла, та отримано рівняння перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення фотоструму і вхідну – значення вологості. Показано, що статична характеристика запропонованого вимірювального перетворювача лінійна. Доведено, що в процесі зміни значення світлового потоку, залежно від типу лампи в джерелі світла мультиплікативна похибка може досягати 0,8, а від заміни інтерференційного фільтра – 0,5. Одержано аналітичні залежності для корекції цієї складової похибки.

4. Отримав подальший розвиток метод та розроблено засіб безпосереднього контролю вологості порошкоподібних матеріалів в інфрачервоній області, які, на відмінну від відомих, здійснюють корекцію мультиплікативної похибки, що дозволило в промислових умовах у реальному часі здійснювати вимірювальний контроль із вірогідністю контролю (0,801 – 0,887), яка притаманна термогравіметричному методу (0,813 – 0,897).

Достовірність та обґрунтованість положень, отриманих в роботі наукових результатів зумовлена виконанням теоретичних досліджень з використанням законів Столетова, теорії вимірювального перетворення, теорії невизначеності вимірювань і контролю, а також теорії диференціальних рівнянь.

Достовірність отриманих в роботі результатів підтверджується також доброю збіжністю результатів математичного і фізичного моделювання та результатами метрологічних досліджень. При цьому система припущень є коректною, а справедливість висновків підтверджується також впровадженням експериментального зразка в промислові умови.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані наукові результати впроваджено у ВАТ “Вінницький міський молочний завод” та у навчальний процес кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету. Впровадження підтверджуються відповідними актами.

Практична цінність роботи полягає в тому, що на основі виконаних теоретичних досліджень розроблено методику проектування мікропроцесорних засобів контролю вологості сухого молока і

прального порошку, яка складається з трьох основних частин: первинний вимірювальний перетворювач, аналоговий блок і цифровий перетворювач. За даною методикою розроблено схему електричну принципову аналогового блоку сумісно з первинним вимірювальним перетворювачем та виготовлено експериментальний зразок засобу, що реалізує відносний метод.

В результаті метрологічних досліджень експериментального зразка засобу контролю встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок. Максимальна зведена похибка засобу контролю вологості порошкоподібних матеріалів не перевищує 1,8 %, а клас точності даного приладу складає 2,0.

Експериментально досліджено закони розподілу контрольованих величин і похибки вимірювання. Доведено, що дані закони є нормальними. Для термогравіметричного методу та засобів контролю, які реалізують відносний і метод безпосередньої оцінки, отримано номограми для оцінювання вірогідності контролю. Встановлено, що засіб контролю, який реалізує метод безпосередньої оцінки, забезпечує вірогідність контролю вологості сухого молока в межах 0.801 - 0.887. Такий результат практично відповідає вірогідності контролю термогравіметричного методу (0,813 – 0,897).

Показано також, що засіб контролю, що реалізує відносний метод контролю, має дещо кращий показник (0,86 – 0,95). Дані результати дозволяють стверджувати, що розроблені засоби контролю, можуть використовуватися не тільки в лабораторних умовах для вибіркового контролю, але й у виробничих умовах технологічного процесу виготовлення порошкоподібних матеріалів для контролю вологості в реальному часі, а результати контролю використовувати в системі автоматизованого управління якістю. Це дозволить до мінімуму знизити випуск неякісних продуктів.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У наукових працях, написаних у співавторстві, автору належить: у роботі [1] - створення комбінованого способу сушки шляхом застосування на певній стадії процесу високочастотного методу; [2] – аналіз основних математичних моделей процесу сушки молока; [3, 4] – математична модель процесу конвективного сушіння; [5-7] – математичні моделі вимірювального перетворення вологості сухих сипучих матеріалів в інфрачервоній області; [8] – розробка структурної схеми пристрою контролю; [9] – методика оцінювання комбінованої невизначеності вимірювань; патентний пошук та обґрунтування одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних у дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічних та науково-практичних конференціях, а саме: 1) VI міжнародній науково-технічній конференції "Контроль і управління в технічних системах" (КУТС-97), яка проводилась у Вінницькому державному технічному університеті 21-23 жовтня 1997 р.; 2) 14-й міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини", яка проводилась у Київському національному університеті технологій та дизайну 5-8 липня 2004 р.; 3) XIII Міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика-2006", яка проводилась у Вінницькому національному технічному університеті 25-28 вересня 2006 р.; 4) п'ятій міжнародній науково-практичній конференції "Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів", яка проводилась в Хмельницькому національному університеті 17-19 травня 2007 р.; 5) Науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області у 1997 – 2007 роках.

Публікації. Результати дисертації викладені в 9 публікаціях, у тому числі в 5 наукових працях у виданнях, що входять до переліку ВАК України, в 3 статтях у збірниках матеріалів і тезах доповідей науково-технічних конференцій та 1 патенті України на корисну модель.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини (що містять 53 рисунки і 16 таблиць), висновків, списку використаних джерел (131 найменування) та 10 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 241 сторінка, з яких основний зміст викладено на 137 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень і необхідність розробки нових методів та засобів автоматизованого контролю вологості порошкоподібних матеріалів в технологічному процесі їх виробництва. Показано зв'язок роботи з науковими темами та планами. Сформульовано мету та задачі дослідження. Визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробації та впровадження.

У першому розділі проведено порівняльний аналіз та подано систематизацію відомих методів контролю вологості з метою виявлення доцільності застосування кожного з них для автоматизованого контролю вологості порошкоподібних матеріалів в умовах реального часу.

В результаті порівняння непрямих методів з точки зору можливості їх застосування для контролю вологості порошкоподібних матеріалів, зокрема, продуктів харчової промисловості, встановлено, що найбільш придатними є електричні та оптичні методи. Хоча вимірювання вологості електричними методами є майже миттєвою процедурою, їх використання обмежується властивими їм недоліками, а саме: результат вимірювання вологості залежить від хімічного та гранулометричного складу об'єкту контролю, нерівномірності розподілу вологи в ньому, температури, неоднорідності та щільності матеріалу, наявності поверхневої вологи та співвідношення кількості вологи різних станів і видів зв'язку. Всі відомі електричні методи характеризуються вузьким діапазоном вимірювання вологості та недостатньою чутливістю.

Порівняно з електричними, оптичні методи контролю вологості, що полягають у дослідженні залежності оптичних властивостей матеріалів від їх вологовмісту, мають ряд вагомих переваг. Основною характерною особливістю оптичних методів є безконтактність вимірювань, широкий діапазон вимірювання, можливість інтегральної оцінки вологості у великих об'ємах (велика інформативна ємність методу). Останнє є важливою перевагою саме для реальних виробничих умов, де завжди спостерігається нерівномірність розподілу вологи в об'ємі.

Порівняльний аналіз відомих оптичних методів з врахуванням особливостей сушки органічних речовин показав, що для контролю вологості порошкоподібних матеріалів найбільш доцільним є використання інфрачервоних методів. На відміну від електричних методів, температурні впливи на результат вимірювання ІЧ-методами є незначними, що особливо важливо під час контролю вологості в процесі сушки матеріалу. Через свій неруйнівний вплив на об'єкт контролю, високу вибірковість, чутливість та точність, а також можливість безперервного, безконтактного, експресного аналізу вологості ІЧ-метод максимально відповідає вимогам, які висуваються до технічних засобів контролю вологості порошкоподібних матеріалів в технологічному процесі під час їхнього виробництва.

Серед існуючих засобів контролю вологості, які реалізують інфрачервоний метод, значну увагу приділено двохвиловим вологомірам, заснованих на прийомі відбитого від матеріалу випромінювання. Наведено структурні схеми, особливості побудови та роботи, переваги та недоліки найбільш поширених з них. В результаті зроблено висновок, що жоден з відомих засобів не відповідає всім вимогам, які висуваються до засобу контролю вологості в потоці (реальному режимі часу): можливість автоматизованого експресного контролю з високою точністю в широкому діапазоні вимірювання.

Другий розділ присвячено дослідженню об'єкту контролю для встановлення допусків на контрольований параметр, в результаті чого вдосконалено математичну модель процесу конвективної сушки та подано її у вигляді системи диференційних рівнянь збереження енергії для повітря, збереження енергії для матеріалу, збереження маси для сухого матеріалу та рівняння збереження маси для вологи в повітрі. Розв'язок цієї системи отримано методом Кута-Мерсона за допомогою розробленого програмного забезпечення. Порівнянням результатів моделювання та відомих емпіричних залежностей доведено, що запропонована модель адекватно описує фізичні процеси, які протікають під час конвективної сушки сухих порошкоподібних матеріалів. Похибка моделі не перевищує (8-10)%. Отримано рівняння, що однозначно пов'язує вхідну величину (температуру гарячого повітря) та вихідну – вологовміст сипучих матеріалів (рис.1).

Рис.1. Графік залежності вологовмісту матеріалу від температури

Показано, що при зростанні температури гарячого повітря вологовміст матеріалу зменшується, але починаючи зі значення температури 130°С вологість готового продукту залишається сталою і наближається до нормованого значення 4 %. Встановлено зв'язок між допусками на контрольований параметр (від 3.5% до 4.5%) і відповідними змінами температури гарячого повітря (від 70°С до 130°С). Показано вплив неінформативних параметрів (коефіцієнтів тепловіддачі та сушки) на значення вологовмісту матеріалу.

Удосконалено математичну модель вимірювального перетворення вологості (рис.2) порошкоподібних матеріалів в ІЧ-області, яка від відомих відрізняється тим, що враховує параметри джерела світла.

Рис.2. Оптична схема вимірювального перетворення

$$I_{\phi} = S_{\phi} \cdot \rho_x \cdot K_{en}, \quad (1)$$

де S_{ϕ} – інтегральна чутливість фотоприймача; ρ_x – коефіцієнт відбиття від об'єкту контролю;

$$K_{en} = \tau_{\lambda_1} \Phi \cdot \frac{\tau_o \tau_n \pi r^2}{l^2 L^2} \cdot \cos \alpha \cos \beta, \quad (2)$$

де τ_{λ_1} – коефіцієнт пропускання інтерференційного фільтра у вимірювальному перетворювачі; Φ – світловий потік, що випромінюється боковою поверхнею циліндра вольфрамової нитки лампи; τ_n – коефіцієнт, що характеризує проходження світла через захисне скло; τ_o – коефіцієнт, що характеризує проходження світла через оптичну систему; l – відстань від рівноскравого диску до вольфрамової нитки; L – відстань від рівноскравого диску до площадки фотоприймача; r – радіус рівноскравого диску; α – кут падіння світла на площадку фотоприймача; β – кут між нормаллю до відбиваючої поверхні і напрямом на відбиваючу площадку ΔS_{ϕ} .

Встановлено, що освітленість світлочутливої площадки фотоприймача прямо пропорційна силі світла, площі освітлюваного середовища і коефіцієнту відбиття від середовища та обернено пропорційна квадрату відстані від освітлюваного середовища до світлочутливої площадки фотоприймача. Отримано функцію перетворення вологості у значення напруги на виході фотоприймача у вигляді

$$U_{\phi} = \pi 10^{-4} \cdot \frac{S_{\phi} \tau_o \tau_n \cos \alpha \cos \beta R r^2 \cdot \tau_{\lambda_1} \Phi}{l^2 L^2} \cdot W_x. \quad (3)$$

Дослідження статичної характеристики даного вимірювального перетворювача показало, що вона лінійна. Похибка між результатами математичного і фізичного моделювання не перевищує 2,5%, до було доведено експериментально.

Оцінено функції впливу неінформативних параметрів на зміну вихідного сигналу (табл.1).
Таблиця 1

Аналitичні залежності для оцінювання основних метрологічних характеристик

Найменування	Аналitична залежність
Коефіцієнт сумісного впливу W_x і τ_{λ_1} на швидкість зміни U_{ϕ}	$\alpha = \frac{\partial^2 U_{\phi}}{\partial W_x \partial \tau_{\lambda_1}} = \pi 10^{-4} \frac{S_{\phi} \Phi \tau_o \tau_n \cos \alpha \cos \beta R r^2}{l^2 L^2} \quad (4)$
Швидкість зміни коефіцієнта впливу на вихідний сигнал	$D(\beta) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{\phi}}{\partial \tau_{\lambda_1}^2} = 0 \quad (5)$
Мультиплікативна похибка перетворення	$\Delta_{\mathcal{M}} = \pi 10^{-4} \frac{S_{\phi} \Phi \tau_o \tau_n \cos \alpha \cos \beta R r^2}{l^2 L^2} \Delta \tau_{\lambda_1} W_x \quad (6)$
Розрахункова залежність	$\Delta_{\mathcal{M}_{\tau_{\lambda_1}}} = \pm 0.5 \cdot W_x \cdot \Delta \tau_{\lambda_1} \quad (7)$

Крім того, як показують теоретичні розрахунки та експериментальні результати, в процесі вимірювального перетворення вологості в запропонованому вимірювальному перетворювачі має місце мультиплікативна складова похибки. Доведено, що в процесі зміни значення світлового потоку, залежно від типу лампи в джерелі світла мультиплікативна похибка може досягати 0,8 %, а значення мультиплікативної похибки від заміни інтерференційного фільтра – 0,5% (рис.3).

Рис.3. Мультиплікативна похибка для W = 2% (1), W = 4 % (2), W = 8 % (3)

Поверхня, яка показує зміну мультиплікативної похибки перетворення в умовах зміни світлового потоку Φ на значення $\Delta\Phi=0...1$ (від 1,8 до 2,8) в діапазоні зміни контрольованого параметра ($W = 1...10\%$) наведена на рис. 4.

Рис.4. Графік мультиплікативної похибки для різних значень вологості та світлового потоку

Адитивна похибка перетворення відсутня

$$\Delta_a = \beta \cdot \Delta\Phi + D(\beta) \cdot \Delta\Phi^2 = 0 . \quad (8)$$

Для даного типу вимірювального перетворення теоретична залежність для корекції мультиплікативної похибки має вигляд

$$\Delta_{m\phi} = \pm 0.1 \cdot W \cdot \Delta\Phi . \quad (9)$$

Результати моделювання статичної характеристики вимірювального перетворювача показують, що у випадку зміни значення коефіцієнта пропускання інтерференційного фільтра в межах від $\tau_{\lambda_{1min}} = 0.38$ до $\tau_{\lambda_{1max}} = 0.48$, також має місце мультиплікативна похибка вимірювального перетворення (рис.5).

Рис. 5. Графічна інтерпретація впливу значення $\tau_{\lambda 1}$ на зміну статичної характеристики: а) $\tau_{\lambda_{1min}} = 0.38$; б) $\tau_{\lambda_{1max}} = 0.48$

Отже, при проектуванні засобів контролю необхідно пропонувати алгоритми та конструкційні рішення, спрямовані на зменшення мультиплікативної складової похибки.

У **третьому розділі** на основі виконаних досліджень об'єкта контролю і первинного вимірювального перетворювача запропоновано два методи та засоби контролю вологості порошкоподібних матеріалів: безпосередньої оцінки та відносний.

Якщо опромінювати об'єкт контролю від джерела світла в ІЧ-області, то відбитий від нього промінь сприймається фотоприймачем, який перетворює випромінювання, що на нього поступило, в електричний сигнал (рис.6). При цьому коефіцієнт відбиття від вологого порошкоподібного матеріалу однозначно пов'язаний з контрольованим параметром лінійною залежністю. Розроблено структурну схему та алгоритм контролю модифікованого методу безпосередньої оцінки.

Рис.6. Структурна схема одноканального засобу контролю вологості

Виведено рівняння перетворення для мікропроцесорного засобу контролю вологості

$$N = k \cdot 2^n \cdot \pi 10^{-4} \cdot \frac{S_\phi \tau_0 \tau_n \cos \alpha \cos \beta R r^2 \cdot \tau_{\lambda 1} \Phi}{U_0 l^2 L^2} \cdot W_x \quad (10)$$

і показано, що даний засіб має лінійну статичну характеристику. Аналіз рівняння похибки квантування підтверджує, що значення цієї складової похибки (рис.7) в межах зміни контрольованої величини не перевищує 0.25%.

Рис.7. Графік похибки квантування в діапазоні вимірювання вологості

Для корегування мультиплікативної похибки необхідно отримати залежність для розрахунку корегувального коефіцієнта. За паспортними даними визначається номінальне значення світлового потоку Φ_n . Якщо підставити в евристично отриману нижче наведену залежність

$$\Phi_g = I^4 \cdot (R_n^{\kappa_1} + \kappa_2), \quad (11)$$

$$\text{де } \kappa_1 = \frac{\ln R_n}{\ln U + (\ln P \cdot U + \ln \frac{R_n}{I \cdot \ln(P+U)}) \cdot 0,1}, \quad \kappa_2 = \ln \frac{R_n}{\ln U + \frac{1}{\ln P + \ln R}}$$

виміряні значення напруг U_u , U_I джерела світла, то опосередковано отримаємо вимірне значення Φ_g світлового потоку джерела світла. З врахуванням цього значення поправочного коефіцієнта визначається як $\eta = \frac{\Phi_n}{\Phi_g}$.

Результат вимірювання вологості за відносним методом (рис.8) визначається різницею відношень спектральних коефіцієнтів відбиття вимірювального та опорного каналів при нульовій вологості $Y = \frac{Y_1}{Y_2}$. Остаточне рівняння перетворення матиме вигляд

$$Y = \frac{k_{\lambda 1} \cdot \rho_{\lambda 1} \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot k_{П1} \cdot k_{МП} \cdot k_I \cdot k_{Г}}{k_{\lambda 2} \cdot \rho_{\lambda 2} \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot k_{П2} \cdot k_{ПП}}. \quad (12)$$

Рис.8. Структурна схема двоканального засобу, що реалізує відносний метод

У рівнянні (12) змінними є лише коефіцієнти спектрального відбиття світла від зразка $\rho_{\lambda 1}$ та $\rho_{\lambda 2}$. Визначимо коефіцієнт перетворення вимірювального каналу K_1 як

$$K_1 = k_{\lambda 1} \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot k_{П1} \cdot k_{МП} \cdot k_I, \quad (13)$$

а коефіцієнт перетворення опорного каналу K_2 як

$$K_2 = k_{\lambda 2} \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot k_{П2} \cdot k_{ПП}. \quad (14)$$

Тоді

$$Y = \frac{\rho_{\lambda 1} \cdot K_1 \cdot k_{Г}}{\rho_{\lambda 2} \cdot K_2} \quad (15)$$

Розглянемо градування вологоміра, побудованого по даній структурній схемі. При постановці під освітлювач об'єкту контролю з нульовим вмістом вологи, покази приладу дорівнюватимуть

$$Y_0 = \frac{Y_{10}}{Y_{20}} = \left(\frac{\rho_{\lambda 10}}{\rho_{\lambda 20}} - B \right) \cdot \frac{K_1}{K_2} \cdot k_{Г} = 0 \quad (16)$$

де $B = \rho_{\lambda 10} / \rho_{\lambda 20}$ – зміщення, встановлюване в процесі регулювання.

При установці під освітлювач вологоміра матеріалу з вмістом вологості W %, та за умови $k_{Г} = K_2 / K_1$, покази приладу визначаються як

$$Y_X = \frac{Y_{1X}}{Y_{2X}} = \left(\frac{\rho_{\lambda 1X}}{\rho_{\lambda 2X}} - \frac{\rho_{\lambda 10}}{\rho_{\lambda 20}} \right). \quad (17)$$

Метрологічні характеристики вологоміра визначаються в основному конструкцією вологоміра. При створенні однакової освітленості фотоприймачів вимірювального та опорного каналів незалежно від розмірів частинок порошку, його пористості, шорсткості, отримуються високу точність. При наявності значної залежності фотоприймачів від температури вплив температури на показник вологості практично зводиться до нуля. Якщо коефіцієнти підсилення відрізняються в 2-3 рази, то температурна похибка є нехтувано малою. Звідси також видно, що для засобу контролю,

реалізованого за такою структурною схемою, відсутній вплив кольоровості об'єкта контролю на показник вологоміра.

Отримано аналітичні залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик засобу контролю, що реалізує відносний метод (табл.2).

Запропоновано методику оцінювання комбінованої невизначеності вимірювання вологості, яка являє собою послідовність дій, спрямованих на вилучення мультиплікативної складової похибки шляхом корегування нахилу статичної характеристики засобу контролю (невизначеність типу В) та оцінки середньоквадратичного відхилення невилученої випадкової складової похибки (невизначеність типу А).

Таблиця 2

Аналітичні залежності для оцінювання основних статичних характеристик

№	Найменування	Аналітична залежність
1	Рівняння перетворення	$W_x = 10^4 \frac{NU_0 I^2 L^2}{\pi 2^n \cdot k S_\phi \Phi \cdot \tau_0 \tau_n \tau_{\lambda 1} \cdot R r^2 \cdot \cos \alpha \cos \beta} \cdot (18)$
2	Крок квантування	$h = \frac{W_{x \max}}{2^n}, \text{ де } W_x = h \cdot N = \frac{W_{x \max}}{2^n} \cdot N. (19)$
3	Крок дискретизації	$T_D = t_{ADC} + t_{DR} = t_{ADC} + t_{DR} = T_0 \cdot \sum_{i=1}^n p_i (20)$
4	Максимальна частота дискретизації	$f_D = \frac{1}{T_D} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6} \text{ c}} = 20 \text{ кГц}. (21)$

За критерій оцінки аномальних результатів вимірювань вибрано критерій Ірвіна, оскільки на етапі попередньої оцінки метрологічних характеристик ще невідомо закон розподілу ймовірностей.

Якщо стандартні невизначеності за типом А і типом В є несумірними величинами, то комбінована стандартна невизначеність приймає значення більшої невизначеності. Для незалежних і не корельованих величин комбінована невизначеність рівна квадратному кореню із суми невизначеностей типу А і В.

Отримано залежності помилок першого і другого роду від значення середнього квадратичного відхилення для різних математичних очікувань похибки для термогравіметричного методу контролю, які в подальшому будуть використані для оцінки α і β за результатами експериментальних досліджень та в процесі метрологічної атестації засобів контролю вологості порошкоподібних матеріалів.

У **четвертому розділі** розглянуто питання практичної реалізації мікропроцесорних засобів контролю вологості порошкоподібних матеріалів запропоновано методику проектування, яка складається з трьох основних частин: первинний вимірювальний перетворювач, аналоговий блок і цифровий перетворювач.

Як було показано вище, найбільш важливим елементом, від значення параметрів якого залежить похибка вимірювання є лампа джерела світла. Тому для вибору типу лампи запропонована залежність (12), яка дозволяє по вихідних параметрах лампи (струм споживання, напруга живлення, внутрішній опір і потужність споживання), визначити номінальне значення світлового потоку.

В процесі роботи дані параметри лампи можуть змінюватися, що приводить до зміни світлового потоку, тобто, до появи похибки чутливості – мультиплікативної похибки. Для корекції цієї складової похибки її значення множать на значення корегувального коефіцієнта η .

На основі рівняння перетворення отримано теоретичні градуювальні характеристики для первинного вимірювального перетворювача і засобу контролю. В середовищі програмного забезпечення Mapl отримано експериментальну градуювальну характеристику засобу контролю воло-

гості, яку апроксимовано поліномом 1-го порядку. Порівняльний аналіз теоретичної градуовальної характеристики з експериментальними показують задовільну збіжність між теорією і експериментом.

Наведено підходи до визначення значень кроків квантування і дискретизації для контролю вологості сухого молока і прального порошку та визначено максимальну швидкодію засобів контролю даного типу (20 000 вимірювань за секунду).

За даною методикою розроблено схему електричну принципову аналогового блока сумісно з первинним вимірювальним перетворювачем та виготовлено експериментальний зразок засобу (рис.9), що реалізує відносний метод.

Рис.9. Зовнішній вигляд засобу вимірювального контролю вологості

В результаті метрологічних досліджень експериментального зразка (табл.3) засобу контролю встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок. Максимальна зведена похибка засобу контролю вологості порошкоподібних матеріалів не перевищує 1.8 %, а клас точності даного приладу складає 2.0.

Для експериментального визначення дійсного значення засобу контролю виконано вимірювання вологості за ГОСТ 29246-91.

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень

Дійсне значення вологи, %	3.03	3.44	3.91	4.52	5.07	Нормоване значення
Виміряне значення вологи, %	2.96	3.50	3.99	4.61	5.12	-
Абсолютна похибка, %	- 0.07	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.09	+0.05	0.09 %
Відносна похибка, %	2.31	1.74	2.05	1.99	0,99	2.5 %
Зведена похибка, %	1.37	1.17	1.56	1.76	0,98	2.0 %

Результати експериментальних досліджень підтвердили прийняту гіпотезу, що закони розподілу контрольованої величини і похибки вимірювання є нормальними. Для термогравіметричного методу і розроблених засобів контролю отримано номограми для оцінювання вірогідності контролю. Порівняльна характеристика засобу контролю, регламентованого Державним Стандартом, і розроблених засобів контролю наведена в табл.4.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика засобів контролю вологості

Найменування	\bar{w} , %	σ_{Δ} , %	σ_w , %	α	β	D
Термогравіметричний	4.0	0.2...0.3	0.25	0.088... 0.17	0.015 - 0.017	0.813 - 0.897
Одноканальний	4.0	0.2...0.3	0.25	0.093...0.175	0.020 - 0.024	0.801 - 0.887
Двоканальний	4.0	0.2...0.3	0.25	0.037...0.11	0.004 - 0.005	0.86 - 0.95

Примітки: \bar{w} – середнє арифметичне значення контрольованого параметра; σ_{Δ} – СКВ похибки; σ_w – СКВ контрольованого параметра; α – помилка першого роду; β – помилка другого роду; D – вірогідність контролю.

Отримані результати показують, що вірогідність контролю вологості одноканальним засобом (0,801 – 0,887) практично забезпечує вірогідність термогравіметричного методу (0,813 – 0,897). Такий результат отримано за рахунок корегування мультиплікативної похибки і зменшення випадкової складової шляхом усереднення результатів вимірювань. Двоканальний засіб контролю має вищу вірогідність контролю (0,86 – 0,95) у порівнянні з попередніми. Це пояснюється тим, що результати вимірювання вологості інваріантні температурі об'єкту контролю, розмірам його частинок, кольору.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі проведених досліджень розвинуто відомі теоретичні, метрологічні та експериментальні основи вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів в умовах їхнього виробництва.

Основні наукові та прикладні результати роботи полягають у наступному:

1. Проаналізовано відомі методи та засоби контролю вологості порошкоподібних матеріалів та теоретичні підходи, що покладено в основу їх побудови. Встановлено, що на сучасному етапі розвитку теорії та техніки актуальним і перспективним є створення нових методів та засобів автоматизованого контролю вологості в реальному часі з вірогідністю, яка притаманна термогравіметричному методу.

2. Вдосконалено математичну модель об'єкта контролю у вигляді системи диференціальних рівнянь, що адекватно описує фізичні процеси, які протікають під час конвективної сушки порошкоподібних матеріалів. Встановлено закономірність між вхідною величиною (температура гарячого повітря) та вихідною – вологовміст порошкоподібних матеріалів. Обґрунтовано зв'язок між допусками на контрольований параметр (від 3,5% до 4,5%) і відповідними змінами температури гарячого повітря (від 70⁰С до 130⁰С). Доведено адекватність даних моделей (похибки моделей не перевищують 10%) і необхідність використання для аналізу автоматизованих засобів контролю вологості.

3. Вдосконалено математичну модель вимірювального перетворення вологості порошкоподібних матеріалів в інфрачервоній області, яка від відомих відрізняється тим, що враховує параметри джерела світла. Отримано рівняння перетворення, яке однозначно пов'язує вихідну величину – значення фотоструму і вхідну – значення вологості. Показано, що статична характеристика пропонуваного вимірювального перетворювача лінійна. Доведено, що в процесі зміни значення світлового потоку, залежно від типу лампи в джерелі світла, мультиплікативна похибка може досягати 0,8, а від заміни інтерференційного фільтра – 0,5. Одержано аналітичні залежності для корекції цієї складової похибки.

4. Вдосконалено метод безпосереднього контролю, суть якого полягає в тому, що, якщо опромінювати об'єкт контролю від джерела світла в ІЧ-області, то відбитий від нього промінь сприймається фотоприймачем, який перетворює випромінювання, що на нього поступило, в електричний сигнал. При цьому коефіцієнт відбиття від вологого порошкоподібного матеріалу однозначно пов'язаний з контрольованим параметром лінійною залежністю. Введено корекцію на значення мультиплікативної складової похибки, яка виникає за рахунок зміни світлового потоку джерела світла. Виведено рівняння перетворення для мікропроцесорного одноканального засобу контролю вологості і показано, що даний вологомір має лінійну статичну характеристику. Аналіз рівняння похибки квантування показує, що значення цієї складової похибки в межах зміни контрольованої величини не перевищує 0,25%. Оцінено невизначеність вимірювань та вірогідність контролю для даного засобу контролю.

5. Вперше розроблено відносний метод контролю вологості порошкоподібних матеріалів та структурну схему для його реалізації. При вимірюванні вологості за відносним методом та відповідною структурною схемою результат визначається різницею відношень спектральних коефіцієнтів відбиття вимірювального та опорного каналів при нульовій вологості, а метрологічні характеристики вологоміра визначаються в основному конструкцією вологоміра. Показано, що при створенні однакової освітленості фотоприймачів вимірювального та опорного каналів, не залежно від величини частинок порошку, його пористості, шорсткості, кольору отримується висока точність (зведена похибка не перевищує 1,8 %).

Доведено, що навіть при наявності значної залежності параметрів фотоприймачів від температури, її вплив на результати вимірювання практично зводиться до нуля. Якщо коефіцієнти підсилення відрізняються в 2-3 рази, то температурна похибка виражається в сотих відсотка вологості. Доведено, що для засобу контролю, реалізованого за такою структурною схемою, відсутній вплив кольоровості об'єкта контролю на показник вологоміра.

6. Запропоновано методику оцінювання комбінованої невизначеності вимірювань, яка складається з аналізу попередньо отриманих аналітичних залежностей для оцінки адитивної і мультиплікативної складових систематичної похибки та експериментальних статистичних характеристик випадкової складової похибки на прикладі засобу вимірювання вологості сухого молока та прального порошку в умовах їхнього виробництва.

Показано, що розрахунок комбінованої стандартної невизначеності доцільно проводити, якщо стандартна невизначеність за типом А та стандартна невизначеність за типом В є сумірними величинами, інакше комбінована невизначеність просто приймається рівною більшій величині.

7. На основі запропонованої методики розроблено функціональні схеми та алгоритми роботи мікропроцесорних засобів контролю вологості за методом безпосередньої оцінки та відносним методом.

В результаті метрологічних досліджень експериментального зразка засобу контролю встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок. Максимальна зведена похибка засобу контролю вологості порошкоподібних матеріалів не перевищує 1,8 %, а клас точності даного приладу складає 2,0.

8. Експериментально досліджено закони розподілу контрольованих величин і похибки вимірювання. Доведено, що дані закони є нормальними. Для термогравіметричного методу та засобів контролю, які реалізують відносний і метод безпосередньої оцінки, отримано номограми для оцінювання вірогідності контролю. Встановлено, що засіб контролю який реалізує метод безпосередньої оцінки забезпечує вірогідність контролю вологості сухого молока в межах 0,801 – 0,887. Такий результат практично відповідає вірогідності контролю термогравіметричного методу (0,813 – 0,897). Показано також, що засіб контролю, що реалізує відносний метод контролю, має дещо кращий показник (0,86 – 0,95).

Дані результати дозволяють стверджувати, що розроблені засоби контролю, можуть застосовуватись у виробничих умовах технологічного процесу виготовлення порошкоподібних матеріалів для контролю вологості в реальному часі, а результати контролю використовувати в системі автоматизованого управління якості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Богачук В.В., Мокін Б.І. Модернізація камери для сушки згущеного молока з позиції побудови інваріантної системи регулювання температури в ній // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – №4. – С. 36–39.

2. Богачук В.В., Головченко О.М., Кухарчук В.В. Математична модель процесу конвективного сушіння сипких матеріалів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №3. – С.67-73.

3. Богачук В.В., Кухарчук В.В. Математична модель вимірювального перетворення вологості сипучих матеріалів в ПЧ-області // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. – Кременчук, 2007. – Вип. 4/2007 (45). – Ч.2. – С.130-133.

4. Богачук В.В., Дмитрієв Ю.О., Кухарчук В.В. Засіб вимірювального контролю вологості сипучих матеріалів // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – Т.1, №2. – С.241-245.

5. Кухарчук В.В. Каців С.Ш., Богачук В.В., Говор І.К. Оцінка комбінованої стандартної невизначеності вимірювань вологості сипучих матеріалів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №3. – С. 59-66.

6. Пат. 9734, МПК G01N27/02. Пристрій для вимірювання вологості матеріалів з безперервним режимом роботи в часі / Шабатура Ю.В., Дмитрієв Ю.О., Бараболя В.П., Богачук В.В. – 2005 02686; Заявл. 24.03.2005; Опубл. 17.10.2005; Бюл. № 10. – 6 с.

7. Богачук В.В., Мокін Б.І. Аналіз основних математичних моделей та похибок обчислення вихідних параметрів процесу сушки молока // Контроль і управління в технічних системах: VI Міжнарод. наук. конф. Вінниця, 21-23 жовтня 1997 р. – Вінниця, 1997. – Т. 1. – С. 76-81.

8. Головченко О.М., Богачук В.В., Студинський В.В., Шевченко А.В. Математичне моделювання конвективної сушарки // Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини: Зб. наук. праць. – К., 2004. – С. 204-209.

9. Богачук В.В., Кухарчук В.В. Математична модель вимірювального перетворення вологості сипучих матеріалів в ІЧ-області // Автоматика – 2006: XIII Міжнарод. конф. з автоматичного управління. Вінниця, 25-28 верес. 2006 р. – Вінниця, 2006. – С.164.

АНОТАЦІЯ

Богачук В.В. Методи та засоби вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів в інфрачервоній області. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2007.

Дисертацію присвячено дослідженню проблемних питань, пов'язаних з удосконаленням методів та розробкою на їх основі нових інфрачервоних засобів контролю вологості порошкоподібних матеріалів, а також підвищенням швидкодії та вірогідності контролю. В роботі представлено порівняльний аналіз відомих методів та засобів вимірювання вологості, виявлено їх переваги та недоліки, обґрунтовано доцільність використання інфрачервоних засобів для автоматизованого контролю вологості порошкоподібних матеріалів. Досліджено об'єкт контролю та удосконалено математичну модель процесу конвективної сушки порошкоподібних матеріалів.

Вдосконалено математичну модель первинного вимірювального перетворювача та отримано рівняння перетворення. Проведено оцінювання його основних статичних метрологічних характеристик. На основі отриманого рівняння перетворення модифіковано метод безпосереднього контролю та вперше розроблено відносний метод контролю вологості, а також структурні схеми для їх реалізації. Отримано аналітичну залежність для корекції мультиплікативної складової похибки. Запропоновано методику оцінювання комбінованої невизначеності вимірювань.

Створено експериментальний зразок двоканального засобу контролю вологості в автоматичному режимі роботи у реальному часі, який реалізує відносний метод, та отримано залежності для оцінювання основних статичних метрологічних характеристик. Проведено метрологічні дослідження експериментального зразка, встановлено нормовані значення абсолютної, відносної та зведеної похибок. Досліджено закони розподілу контрольованої величини та похибки вимірювання. На основі розрахованих помилок першого і другого роду оцінено вірогідність контролю темографіметричним методом, методом безпосередньої оцінки та відносним методом.

Ключові слова: вологість, метод вимірювання, засіб контролю, математична модель, метрологічні характеристики, невизначеність вимірювання, вірогідність контролю.

АННОТАЦИЯ

Богачук В.В. Методы и средства измерительного контроля влажности порошкообразных материалов в инфракрасной области. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2007.

Диссертация посвящена исследованию проблемных вопросов, связанных с усовершенствованием методов и разработкой для их реализации инфракрасных средств контроля влажности порошкообразных материалов, а также повышением быстродействия и вероятности контроля. В работе представлено сравнительный анализ известных методов и средств измерения влажности, определено их преимущества и недостатки, обосновано целесообразность использования инфракрасных влагомеров для автоматизированного контроля влажности порошкообразных материалов в процессе их производства. Для определения допусков на контролируемый параметр исследовано объект контроля и усовершенствовано математическую модель процесса конвективной сушки порошкообразных материалов.

Усовершенствовано математическую модель первичного измерительного преобразователя, которая от известных отличается тем, что учитывает параметры источника света. Получено уравнение преобразования, которое однозначно связывает выходную величину – значение фототока и входную – значение влажности. Оценено его основные статистические метрологические характеристики. Получены аналитические зависимости для коррекции мультипликативной составляющей погрешности измерений.

На основании полученного уравнения преобразования модифицирован метод непосредственного контроля влажности и впервые разработано относительный метод контроля, а также структурные схемы для их реализации. Выведено уравнение преобразования для микропроцессорного одноканального средства контроля влажности и показано, что данный влагомер имеет линейную статическую характеристику. Оценено неопределённость измерений и вероятность контроля для данного средства контроля (0,801 – 0,887).

Доказано, что при контроле влажности относительным методом результат определяется разницей отношений спектральных коэффициентов отражения измерительного и опорного каналов при нулевой влажности, а метрологические характеристики влагомера определяются его конструкцией. Показано, что при создании одинаковой освещённости фотоприёмников измерительного и опорного каналов, независимо от размеров частиц порошка, его пористости и шероховатости, достигается высокая точность измерений (сведённая погрешность не превышает 1,8 %). Доказано, что для средства контроля влажности, реализованного за предложенной схемой, влияние температуры на результат измерения практически равно нулю, а влияние на показания влагомера цвета объекта контроля отсутствует.

Предложено методику оценки комбинированной неопределённости измерений, которая состоит из анализа предварительно полученных аналитических зависимостей для оценки аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности и экспериментальных статистических характеристик случайной составляющей погрешности измерений. Разработаны функциональные схемы и алгоритмы работы микропроцессорных средств контроля влажности методом непосредственной оценки и относительным методом.

Создан экспериментальный образец двуканального средства контроля влажности в автоматическом режиме работы в реальном времени, который реализует относительный метод контроля и получены зависимости для оценивания основных статистических метрологических характеристик. Проведены метрологические исследования экспериментального образца, определены нормативные значения абсолютной, относительной и сведённой погрешностей. Исследованы законы распределения контролируемой величины и погрешности её измерения. Получены значения ошибок первого и второго рода и оценена вероятность контроля влажности термогравиметрическим методом, методом непосредственной оценки и относительным методом.

Ключевые слова: влажность, метод измерения, средство контроля, математическая модель, метрологические характеристики, неопределённость измерения, вероятность контроля.

ABSTRACT

Bohachuk V.V. Methods and devices for the measuring control of the powdery materials humidity in the infrared field. – Manuscript.

Thesis for PhD. scientific degree on the speciality 05.11.13 – Devices and controlling methods, determination of the substances composition. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. – 2007

Thesis considers the complicated issues, associated with the improvement of the methods and elaboration, on the basis of these methods, of the new infrared devices for the humidity control of the powdery materials and also the increasing of the speed and the controlling reliability. There is a compare analysis of the known methods and the devices for measuring humidity, discovered their advantages and disadvantages, substantiated the advisability of the infrared devices for the automatic control of the powdery materials humidity in the thesis. It was researched the object of the control and improved the mathematical model of the process of the powdery materials convective drying.

There was improved the mathematical model of the primary measuring transformer and got the equation of the transformation. It was appreciated its main statistical metrological characteristics. On the basis of the equation of the transformation, the method of the direct control was modified and for the first time there was worked out the relative method of the humidity control and also the structural schemes for their realization. There was got the analytical dependence for the correction of the multiple component of the deviation. There were suggested the appreciate methods of the combined indefiniteness of the measurements.

There was created the experimental model of the two-channel device of the humidity control in the automatic work at the moment which had been realized by the relative method, got the dependence for the appreciation of the main statistical metrological characteristics. The metrological researches of the experimental model were developed and the fixed exponents of the absolute, relative and combined deviation were determined in the thesis. The distributive laws of the controlled constant and the measuring deviation were investigated. On the basis of the calculated failures of the first and the second sort, there had been evaluated the reliability of the control by the thermogravimetric method, the measuring method, the method of the direct appreciation and the relative method.

Key words: the humidity, the measuring method, the controlling device, the mathematical model, the metrological characteristics, the indefiniteness of the measurements, the control reliability.

Підписано до друку 20.08.2007. Формат 29,7x42j

Наклад 100 прим. Зам. № 2007 – 117

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел. (0432) 59-81-59