

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. Ф. Граняк, В. В. Кухарчук**

**ВИСОКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ  
ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО  
КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ  
ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ  
ДИЕЛЕКТРИКІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2015

УДК 621.317:53.093

ББК 31.221.9

Г19

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 24.09.2015 р.)

Рецензенти:

**В. А. Порєв**, доктор технічних наук, професор

**В. Ю. Кучерук**, доктор технічних наук, професор

**Граняк, В. Ф.**

Г19 Високочастотні методи та засоби вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків : монографія / В. Ф. Граняк, В. В. Кухарчук. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 184 с.

ISBN 978-966-641-650-9

В монографії розглядаються розробки нових високоточних методів та засобів вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків.

Проаналізовано особливості об'єкта контролю, методи та засоби контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків. Обґрунтовано математичну модель об'єкта контролю, запропоновано і теоретично обґрунтовано математичну модель первинного вимірювального перетворювача. Сформульовано високочастотні методи вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків.

УДК 621.317:53.093

ББК 31.221.9

ISBN 978-966-641-650-9

© В. Граняк, В. Кухарчук, 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	8
1.1 Аналіз особливостей об'єкту контролю .....	8
1.2 Огляд і систематизація відомих методів автоматизованого контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	13
1.3 Класифікація високочастотних засобів автоматизованого контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	24
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ ТА ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	35
2.1 Вибір та обґрунтування математичної моделі об'єкту контролю .....	35
2.2 Математична модель первинного вимірювального перетворювача.....	47
2.2.1 Розробка та дослідження функції перетворення вологості зразка у зсув початкової фази інформативної хвилі.....	49
2.2.2 Розробка та дослідження функції перетворення вологості зразка у затухання амплітуди інформативної хвилі.....	53
2.3 Оцінювання функцій впливу неінформативних параметрів сенсора.....	58
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ВИСОКОЧАСТОТНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....	73
3.1 Фазовий метод вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	73
3.1.1 Розробка алгоритму фазового методу вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	74

3.1.2 Оцінювання методичних похибок фазового методу вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	76
3.1.3 Засоби, що реалізують фазовий метод вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	85
3.2 Амплітудний метод вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	104
3.2.1 Розробка алгоритму амплітудного методу вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	105
3.2.2 Оцінювання методичних похибок амплітудного методу вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	107
3.2.3 Засоби, що реалізують амплітудний метод вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	113
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕНОЇ ВІРОГІДНОСТІ ТА ШВИДКОДІЇ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ .....	122
4.1 Комбінований метод розширеного діапазону вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	122
4.1.1 Розробка алгоритму комбінованого методу розширеного діапазону вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	124
4.1.2 Засоби, що реалізують комбінований метод розширеного діапазону вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків .....	126
4.2 Метод автоматичного налаштування засобу вимірювального контролю у функції «Точність–швидкодія».....	132
4.2.1 Розробка алгоритму методу автоматичного налаштування засобу вимірювального контролю у функції «Точність–швидкодія».....	133

4.2.2 Засоби вимірювального контролю вологості, що реалізують метод автоматичного налаштування у функції «Точність – швидкодія».....	138
<b>РОЗДІЛ 5 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ .....</b>	
5.1 Методика проектування засобів вимірювального контролю .....	143
5.2 Методика виконання експерименту.....	145
5.3 Оцінка метрологічних характеристик та вірогідності контролю.....	147
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>155</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>158</b>
Додаток А Експериментальні дослідження залежності зсуву фази та амплітуди інформативної хвилі від вологості рослинного жиру (маргарину) .....	169
Додаток Б Поправки, що компенсують похибки конструктивних параметрів сенсора .....	170
Додаток В Повні структурні схеми засобів вимірювального контролю вологості.....	175

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НДР – науково-дослідна робота

ВЧ – високочастотний

НВЧ – надвисокочастотний

ЯМР – ядерно магнітний резонанс

АПК – агропромисловий комплекс

ТЕМ-хвилі – електромагнітна хвиля,

в якій електричні та магнітні поля строго поперечні

ОК – об'єкт контролю

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

W – масова частка вологи

## ВСТУП

Гострою проблемою, що ускладнює широке представництво українського виробника на світовому ринку, є невідповідність продукції світовим стандартам, у тому числі стандартам ISO. Особливо гостро ця проблема проявляється в переробній галузі агропромислового комплексу, що є традиційно пріоритетним для значної частини регіонів нашої держави. Тож, підвищення якості продукції підприємств агропромислового комплексу, більш повне і раціональне використання сировини, інтенсифікація процесів її переробки відноситься до найбільш актуальних завдань, які стоять перед економікою України.

На теперішній час значну частину діючих підприємств переробної галузі агропромислового комплексу складають заводи, що спеціалізуються на виготовленні харчових жирів, що відносяться до класу гетерогенних дисперсних діелектриків (вершкове масло, майонези, маргарини, спреди тощо). Але через застарілі технології та відсутність достовірних засобів контролю основних технологічних параметрів їх продукція є недостатньо якісною.

Основним технологічним параметром якості вершкового масла, як одного з найбільш поширених представників згаданого класу речовин, є масова частка вологи в готовому продукті. В умовах виробництва цей параметр вимірюють у лабораторіях термогравіметричним способом, що вимагає значних затрат часу, а, отже, робить неможливим оперативне керування технологічним процесом фракційного розділення сировини.

Відомі засоби вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків працюють переважно в ручному режимі, мають незадовільні точність, вірогідність та швидкодію вимірювань. Отже, очевидно є необхідність подальшого наукового дослідження, спрямованого на розвиток відомих методів та розробку нових засобів підвищеної точності та швидкодії вимірювального контролю вологості цих речовин.

Перспективними, з точки зору розв'язання цієї науково-прикладної задачі, є високочастотні методи вимірювального контролю вологості, що характеризуються високою швидкістю, безінерційністю та об'ємним вимірюванням вологості зразка. Про те вони недостатньо досліджені, тому їхнє широке застосування неможливе.

З огляду на викладене вище, очевидно є необхідність розв'язання науково-технічної задачі розвитку високочастотних методів вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків та створення на їх основі засобів безперервного контролю вологості в процесі їхнього виробництва.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

### 1.1 Аналіз особливостей об'єкту контролю

Вода входить до складу переважної більшості органічних та неорганічних матеріалів. Матеріали, утворені в природних умовах чи отримані в процесі виробництва, як правило, містять у своєму складі певну кількість води, масова частка якої залежить як від здатності матеріалу поглинати (сорбувати) або утримувати на поверхні (адсорбувати) воду, так і від умов, в яких це явище має місце [1].

Вміст вологи суттєво впливає на фізичні, хімічні, механічні та технологічні властивості значної частини неметалічних матеріалів, в тому числі і тих, що належать до класу гетерогенних дисперсних діелектриків. Це пов'язано з особливими властивостями води, якій властива висока діелектрична проникність і здатність вибірково поглинати електромагнітне та оптичне випромінювання тощо.

Вплив води на електричні та фізичні властивості матеріалів залежить також і від виду зв'язку вологи з структурою цього матеріалу. Зокрема, відомо три основні форми зв'язку води з твердими матеріалами: хімічна, фізико-хімічна і фізико-механічна [2–4].

В залежності від форми енергії зв'язку і виду матеріалу волога може бути у вигляді вільної води, капілярно-зв'язана (фізико-механічний зв'язок), адсорбційно-зв'язана (фізико-хімічний зв'язок) та хімічно-зв'язана [5].

Особливістю твердих жирів тваринного, рослинного та штучного походження, що відносяться до класу гетерогенних дисперсних діелектриків, є явище гідрофобності [6,7]. Тобто, для речовин цього класу характерним є малий запас вільної поверхневої енергії, що обумовлює існування у такій речовині вологи лише у вільній формі. Така властивість дещо спрощує процес кількісного контролю вологості, бо різні методи вимірювання вологості по-різному реагують на форми зв'язку вологи з речовиною [3].



Про те, номенклатура гетерогенних дисперсних діелектриків, які є об'єктом контролю вологості, як уже зазначалося, включає у себе широкий спектр харчових та промислових жирів різного походження та їх суміші. А, отже, при розробці кількісних методів вимірювання вологості необхідно врахувати особливості фізико-хімічних та технологічних властивостей, що є спільними для усіх речовин цього класу.

Для системи «сухий жир–вода» характерним є відсутність молекулярних взаємодій [7]. Тобто таку речовину можна розглядати як особливий вид в'язкої емульсії. В такому випадку вкраплення вологи, по суті, утворюють нерозчинну дисперсну фазу, що на молекулярному рівні не взаємодіє з жирами, обумовлюючи двогенну природу діелектричних властивостей вологих гетерогенних дисперсних діелектриків [8]. Решта фізичних властивостей вологого гетерогенного дисперсного діелектрика, аналогічно до діелектричних властивостей, також має двогенну природу, що визначається фізичними властивостями сухої речовини та води [9, 10]. Отже, об'єктами вологометрії гетерогенних дисперсних діелектриків є в'язкі емульсії, неоднорідні за складом та властивостями, що містять у своєму об'ємі вкраплення вологи різної дисперсності [11].

Вершковому маслу, як об'єкту контролю, властиві всі перераховані вище особливості. А молочний жир, що є основною складовою вершкового масла, як і рослинні та штучні жири, характеризується непрозорістю для оптичного спектра випромінювання та невеликою діелектричною і магнітною проникностями [12]. Наявність у окремих видах вершкового масла солі додатково викликає нерівномірність розподілу вологи в об'ємі об'єкта контролю [13, 14]. Про те, відповідно до існуючої нормативної бази, а саме ДСТУ 1399:2005 [15], маслом вважається харчовий жировий продукт, що його виробляють тільки з коров'ячого молока та (або) продуктів його переробки, з рівномірно розподіленою в жировому середовищі вологою і сухими знежиреними речовинами. Виходячи з цього, при виборі у якості об'єкта контролю вершкового масла можна вважати розміщену у ньому вологу такою, що розподілена рівномірно у всьому об'ємі досліджуваного зразка.

У свою чергу, в відповідності з цим же нормативним актом, вершкове масло – це масло, що його виробляють з вершків та (або) продуктів перероблення молока, яке має специфічний, притаманний йому смак, запах та пластичну консистенцію за температури  $(12\pm 2)$  °C, з

вмістом молочного жиру не менше ніж 61,5 %, що становить однорідну емульсію типу «вода в жирі» [15]. Це дає підстави стверджувати, що для вершкового масла справедливим є вираз:

$$W = \frac{m_3 - m_{жс}}{m_3} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де  $W$  – масова частка води;  $m_3$  – маса досліджуваного зразка;  $m_жс$  – маса молочного жиру в зразку.

Масова частка води є одним з основних параметрів, що визначає якість вершкового масла [16]. Максимально допустимий вміст води у готовому продукті є строго регламентованим міждержавним стандартом ГОСТ 37–91 [17].

Крім максимально допустимого значення дуже важливим є і мінімально допустиме значення вологості. Від цього параметра також залежить якість вершкового масла. Як буде показано нижче, ці особливості суттєво впливають на архітектуру засобів вимірювання. А оскільки як строго регламентованою ДСТУ 1399:2005 [15] є і максимально допустима масова частка молочного жиру, що міститься у вершковому маслі, то це дає можливість, з урахуванням (1.1), визначити нижнє граничне значення вмісту води у різних видах вершкового масла. Приведені у зазначених нормативних документах гранично допустимі значення вологості різних видів вершкового масла зведені в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Гранично допустимі значення вологості різних видів вершкового масла

Вид вершкового масла	Максимальна масова частка води, %.	Мінімальна масова частка води, %.
Вологодське	16,0	15,0
Несолоне солодковершкове та кисловершкове	16,0	15,0
Солоне солодковершкове та кисловершкове	16,0	15,0
Любительське солодковершкове та кисловершкове несолоне	20,0	16,0
Любительське солодковершкове та кисловершкове солоне	20,0	16,0
Селянське солодковершкове та кисловершкове несолоне	25,0	20,1
Селянське солодковершкове солоне	25,0	20,1
Топлене	0,7	0,5

Як впливає з табл. 1.1, контроль масової частки вологи у вершковому маслі доцільно здійснювати у діапазоні від 0,5 % до 30 %, який обумовлює діапазон вимірювання технічних засобів.

Як показано у ГОСТ 3626 – 73, максимально допустимий довірчий інтервал зміни виміряних значень вологості для наведеного у ньому прямого методу висушування при температурі  $(102 \pm 2)$  °С становить 0,1 % [18]. Варто зазначити, що цей метод передбачає висушування зразка у термогравіметричній камері протягом двох годин, з подальшим вимірюванням зміни маси проби за рахунок випаровування вологи [18], у зв'язку з чим не може бути використаний для побудови систем контролю вологості у реальному часі.

Оскільки у процесі вимірювання вологості за цією методикою похибка останньої формується за рахунок великої кількості факторів, для яких виконуються умови центральної граничної теореми теорії ймовірності (Теореми Ляпунова), то можна стверджувати, що похибка цього методу розподілена за нормальним законом [19]. Тоді, скориставшись правилом трьох сигм, знайдемо дисперсію зміни випадкової похибки [20]

$$\sigma = \frac{\Delta_d}{6} = \frac{0,1}{6} = 0,017 (\%), \quad (1.2)$$

де  $\Delta_d$  – довірчий інтервал зміни виміряних значень вологості.

Виходячи з цього, оцінимо вірогідність контролю за умови використання вказаного методу, обравши у якості об'єкта контролю любительське солодковершкове масло, для якого допустиме значення вологості  $W_x$  знаходиться в таких межах [15, 17]:

$$16,0\% \leq W_x \leq 20,0\%. \quad (1.3)$$

Вірогідність контролю може бути розрахована за такою математичною залежністю [20]:

$$D = 1 - \alpha - \beta, \quad (1.4)$$

де  $\alpha$  – ймовірність визнати придатним за контрольованими параметрами непридатний об'єкт контролю;  $\beta$  – ймовірність забракувати за контрольованими параметрами придатний об'єкт контролю.

Тож, для її знаходження необхідно визначити нормоване значення ймовірності помилки першого та другого роду [20]:

$$\alpha_{\text{вм}} \approx \int_{- \Delta_{\text{н}}}^{W_{\text{вг}} - W_{\text{д}}} f(\Delta) d\Delta \cdot \int_{W_{\text{вг}} - W_{\text{д}}}^{\Delta_{\text{н}}} f(\Delta) d\Delta, \quad (1.5)$$

$$\beta_{\text{вм}} \approx \int_{W_{\text{вг}} - W_{\text{д}}}^{\Delta_{\text{н}}} f(\Delta) d\Delta \cdot \int_{- \Delta_{\text{н}}}^{W_{\text{вг}} - W_{\text{д}}} f(\Delta) d\Delta, \quad (1.6)$$

де  $W_{\text{вг}}$  – верхнє гранично допустиме значення вологості;  $\Delta$  – абсолютна випадкова похибка;  $\Delta_{\text{н}}$  – нормоване значення абсолютної випадкової похибки;  $W_{\text{д}}$  – дійсне значення вологості.

А оскільки похибка розподілена за нормальним законом розподілу, то справедливою буде рівність [20, 21]:

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-0,5 \left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)^2}, \quad (1.7)$$

де  $\sigma$  – дисперсія зміни випадкової похибки.

Тоді, ймовірності помилки першого та другого роду у приграничній зоні верхнього граничного значення контрольованого параметра можуть бути розраховані за таким співвідношеннями [20]:

$$\alpha_{\text{вм}} \approx \int_{W_{\text{нг}} - W_{\text{д}}}^{\Delta_{\text{н}}} f(\Delta) d\Delta \cdot \int_{- \Delta_{\text{н}}}^{W_{\text{нг}} - W_{\text{д}}} f(\Delta) d\Delta, \quad (1.8)$$

$$\beta_{\text{вм}} \approx \int_{- \Delta_{\text{н}}}^{W_{\text{нг}} - W_{\text{д}}} f(\Delta) d\Delta \cdot \int_{W_{\text{нг}} - W_{\text{д}}}^{\Delta_{\text{н}}} f(\Delta) d\Delta. \quad (1.9)$$

Результати моделювання залежності вірогідності контролю від дійсного значення вологості для приграничної зони верхнього та нижнього граничного значення показані на рис. 1.1.

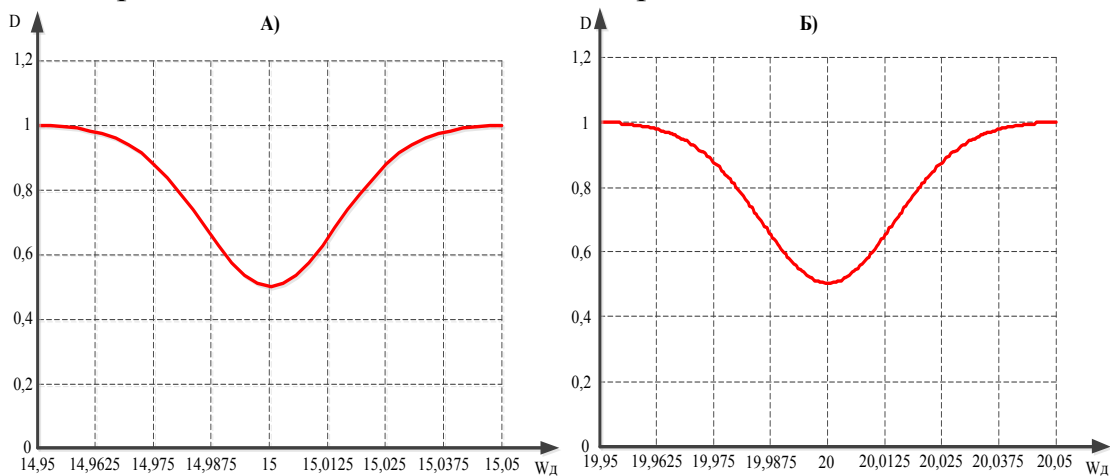


Рисунок 1.1 – Залежність вірогідності контролю від дійсного значення вологості: А) для приграничної зони нижнього граничного значення; Б) для приграничної зони верхнього граничного значення

## 1.2 Огляд і систематизація відомих методів автоматизованого контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків

Відомо багато методів, що можуть бути використаними при вимірюванні вологості гетерогенних дисперсних діелектриків. Всі вони поділяються на прямі, коли інформативний параметр вимірюється безпосередньо, та непрямі, коли вимірюють зміну фізичних величин або властивостей об'єкта контролю, функціонально пов'язаних з вологістю матеріалу [2, 11, 14, 22, 23].

При використанні прямих методів безпосередньо вимірюваними величинами є маса води в пробі (навісі)  $m_g$  і маса проби  $m$ . За результатами вимірювань  $m_g$  і  $m$  визначають масову частку води в речовині [24]:

$$W = \frac{m_g}{m} \cdot 100\%, \quad (1.10)$$

або інші відносні величини, такі як об'ємна або молярна частка води, що використовується в якості характеристики вологості твердих речовин.

За способом виділення води з речовини прямі методи, які використовують у виробництві та в умовах лабораторії, можна поділити на метод висушування (ваговий або гравіметричний), дистиляційний, екстракційний та хімічний.

Такі методи вимірювання мають високу точність та використовуються у якості зразкових. Зокрема, для вершкового масла зразкові прямі методи визначені у міждержавному ГОСТ 3626–73 [18]. Про те їх використання вимагає тривалого часу вимірювання і достатньо складних технічних засобів, що унеможлиблює створення на їх основі автоматизованих систем контролю якості вихідного продукту [11, 25, 26].

Систематизацію прямих методів вимірювання вологості наведено на рис. 1.2.

Друга група, непрямі методи вимірювання вологості, об'єднує низку різноманітних методів та засобів, в яких контроль вологості здійснюється за оцінюванням зміни властивостей об'єкта контролю.

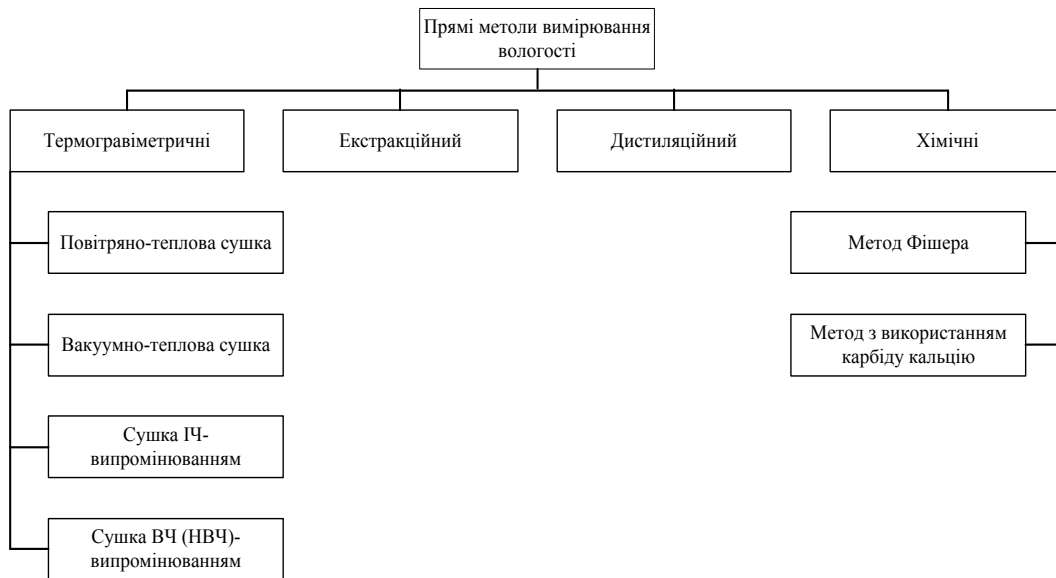


Рисунок 1.2 – Систематизація прямих методів вимірювання вологості матеріалів

Варто зазначити, що в даний час не існує єдиної остаточної класифікації непрямих методів вимірювання вологості. Так, наприклад, у класифікаціях, що наведені в [1–4, 14, 27–31] є істотні відмінності. У зв'язку з цим, а також виходячи з того, що мова йде лише про методи вимірювання вологості гетерогенних діелектриків, пропонується до непрямих методів віднести методи, що перераховані нижче.

Найбільшого поширення серед непрямих методів вимірювання вологості набули електричні методи [32–34]. Вони ґрунтуються на прямому вимірюванні електричних параметрів матеріалу, які залежать від вмісту в ньому води. Вимірювання вологості електричними методами можна вважати миттєвою процедурою, що дає можливість з їх допомогою автоматизувати процеси контролю вологості, а, отже, створити системи автоматичного керування вологістю для технологічних процесів, що протікають в динаміці. Електричні методи вимірювання вологості поділяють на кондуктометричні, діелькометричні, високочастотні (ВЧ) та надвисокочастотні (НВЧ). Як особливий окремий випадок діелькометричних методів доцільно розглянути також ємнісні методи [2, 14].

В основу кондуктометричних методів покладено залежність питомої провідності (питомого опору) матеріалу, вимірюваної на постійному або змінному струмі промислової частоти, від вмісту води. Діапазон вимірювання визначається областю гігроскопічності матеріалів, які не проводять струм у сухому стані [35]. Метод не застосовується для вимірювання вологовмісту дуже сухих та дуже вологих матеріалів.

лів. А для речовин, що не змочуються водою їх сфера застосування додатково звужується [36].

Значного розповсюдження також набули діелькометричні методи вимірювання вологості, що базуються на вимірюванні діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат матеріалів і речовин у широкому діапазоні частот – від звукових до НВЧ [3]. На відміну від кондуктометричних, ці методи вимагають суттєвих апаратних затрат, але дозволяють вимірювати вологість дуже сухих, дуже вологих матеріалів та матеріалів, що не змочуються водою, забезпечують індикацію рідини в ізольованих ззовні порожнинах та видають сигнал, пропорційний інтегральному вмісту вологості, в той час як кондуктометричний метод забезпечує індикацію тільки місцевих включень вологи [37, 38]. Про те на результат вимірювання вологості діелькометричним методом суттєво впливає щільність матеріалу та зовнішні неінформативні впливні величини [39].

Ємнісні методи вимірювання вологості, по суті, можна вважати окремим випадком діелькометричних методів вимірювання, про те через їх значне поширення вони потребують додаткового розгляду. Їх особливість полягає у вимірюванні інтегральної діелектричної проникності зразка, що, в наслідок значної різниці між діелектричною проникністю води ( $\xi_v \approx 80$ ) та інших речовин ( $\xi \approx 1 \div 10$ ) [9, 40], дозволяє робити висновки про вміст вільної води за значенням діелектричної проникності зволоженої речовини. Діелектрична проникність зволоженої речовини вимірюється через ємність ємнісного сенсора, заповненого речовиною, що контролюється [41]. Такі методи характеризуються доволі високою чутливістю та не позбавлені недоліків, що характерні в цілому для діелькометричних методів [39, 42].

Високочастотні (ВЧ) та надвисокочастотні (НВЧ) методи становлять особливу групу методів вимірювання вологості, що пов'язані з використанням відбитої чи прохідної електромагнітної хвилі.

До класифікації ВЧ- та НВЧ-методів різні автори підходять по різному. Так, в [43] їх поділяють на дві групи методів: засновані на вимірюванні діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат в залежності від вологи, і методи, що базуються на дослідженні оптичних характеристик вологих матеріалів – коефіцієнта поглинання та відбиття. В [2] автор класифікує ці методи таким чином: методи вільного простору (з використанням прохідної чи відбитої хвилі), резонаторні і хвилевідні методи. Тут також виділено методи, які не отри-

мали широкого поширення у вологометрії: зондові, поверхневої хвилі, методи, засновані на повороті площини поляризації.

В першій з наведених класифікацій перераховано залежні від вологості параметри матеріалу, що змінюються на високій частоті, в другій наведено способи локалізації електромагнітного поля в матеріалі, що контролюється. Але ні одна з них не дозволяє провести порівняльний аналіз і вибір методу з врахуванням особливостей матеріалу та умов вимірювання.

Більш повну та обґрунтовану класифікацію ВЧ- та НВЧ-методів подано в [43]. Тут класифіковано методи, виходячи з результатів взаємодії магнітного поля з вологим матеріалом. Оскільки на даний результат може впливати не лише вологість матеріалу, а й інші неінформативні параметри (товщина, поверхнева вологість, діапазон вимірювання вологості та ін.), то при такій класифікації потенційно з'явиться можливість врахування цих неінформативних факторів. В основу побудови покладено три класифікаційні ознаки. Найбільш загальним результатом взаємодії електромагнітного поля з вологим матеріалом є виникнення відбитої від матеріалу хвилі та хвилі, що пройшла через нього. Розподіл на методи, що використовують відбиту чи прохідну хвилі і є першою класифікаційною ознакою.

Вологість матеріалу, від якої залежать його діелектричні характеристики, впливає на параметри поля, що з ним взаємодіє. Розподіл на методи по параметру електромагнітної хвилі, який вимірюється, – друга класифікаційна ознака. Отже, ВЧ- та НВЧ-методи, що досліджують відбиту чи прохідну хвилю, в свою чергу можуть бути амплітудними, фазовими або частотними. Можливі також комбінації цих методів.

В залежності від модифікації елемента, що використовується для введення матеріалу в НВЧ-поле, перераховані вище методи також можуть бути: хвилевідними, резонаторними, зондовими та методами вимірювання у вільному просторі [31, 44].

За використанням в промисловості високочастотна вологометрія, яка працює в діапазоні частот від  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^8$  Гц, може конкурувати з НВЧ-методом, частота поля хвиль якого знаходиться в діапазоні до 30 Гц [31, 45, 46]. Цей спектр електромагнітного випромінювання менш чутливий до дефектів апаратної частини, у порівнянні з надвисокочастотними методами, та у більшості випадків дозволяє розглядати систему «сенсор–зразок» у вигляді параметрів активного кола заміщення, що значно спрощує її математичну модель та зменшує динамічну похибку



системи за рахунок скорочення тривалості перехідних процесів у сенсори [47–50]. Про те використання цього діапазону електромагнітного випромінювання пов'язане з низкою труднощів, обумовленою пониженою проникністю випромінювання цього діапазону [48, 51], що ускладнює реалізацію безконтактних методів вимірювання.

Перевагами НВЧ-методів є: можливість безконтактного вимірювання, висока чутливість і точність. Це зумовлено підвищеною проникністю, що в більшості випадків призводить до взаємодії з навколишнім середовищем, а отже і впливом неінформативних параметрів на результати вимірювання, а їх реалізація пов'язана з підвищеними вимогами до точності виконання НВЧ-трактів [48, 52].

Не менш привабливу групу методів вимірювання вологості становлять оптичні (оптометричні) методи, суть яких полягає у дослідженні залежності оптичних властивостей матеріалів від їх вологовмісту. Для твердих матеріалів використовуються інфрачервона і видима області спектра [53, 54], що відповідає енергетичним рівням молекулярних та атомних коливань [55]. Оптичні методи отримали широке використання, оскільки їх характерною особливістю є безконтактність вимірювань, можливість інтегральної оцінки вологості у великих об'ємах (велика інформаційна здатність методу) [9]. Останнє є важливою перевагою, оскільки в реальних виробничих умовах завжди спостерігається нерівномірний розподіл вологи в об'ємі. Про те більшість речовин, що належать до класу гетерогенних дисперсних діелектриків, є оптично непрозорими [6, 56], що обмежує можливість застосування оптичних методів лише методами відбитої хвилі. А це, у свою чергу, призводить до надлишкової похибки в наслідок нерівномірності розподілу вологи на поверхні та в товщині зразка.

Радіаційні (радіометричні) методи базуються в основному на сучасних способах дослідження складу, структури і властивостей речовини, що використовують взаємодію різних видів електромагнітних коливань і ядерних випромінювань з об'єктом контролю. В радіометричних (ядерно-фізичних) методах використовуються різні види ядерних випромінювань (гама-промені, бета-частки, швидкі нейтрони) і взаємодій (поглинання і розсіяння гама-, і бета-випромінювань, пружне розсіяння швидких нейтронів). Так, наприклад, в основі гамаметодів лежить послаблення інтенсивності гама-випромінювань твердою фазою і вологою матеріалу в результаті розсіювання і поглинання атомами речовини. Найбільш поширеними серед радіаційних методів

є метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР), рентгенівський та нейтронний метод [3].

В основі ЯМР-методу лежить резонансне поглинання радіочастотної енергії ядрами атомів водню (протонами) води при введенні вологого матеріалу в постійне магнітне поле. Явище ЯМР пов'язано з квантовими переходами між енергетичними рівнями атомних ядер, які виникають у результаті взаємодії ядерного магнітного моменту з зовнішнім магнітним полем.

Рентгенівський метод характеризується високою чутливістю через сильне поглинання вологою рентгенівського випромінювання. Метод використовується для дослідження розподілу вологи в об'ємі зразка в процесі сушки або зволоження. Однак рентгенівський метод заборонений для вимірювання вологості продуктів харчової промисловості і сільського господарства.

Фізичною основою нейтронного методу вимірювання вологості є явище гальмування швидких нейтронів при їх пружному зіткненні з атомами речовини. Швидкі нейтрони втрачають частину своєї енергії і перетворюються у повільні або теплові зі значно меншою енергією [3]. При зіткненні з легкими атомами водню, втрата енергії може бути досить значною [31]. Отже, нейтронні промені, які гальмуються атомами водню, без перешкод проходять через елементи з великим атомним номером. Це явище протягом багатьох років використовується для визначення вологовмісту в великих об'ємах матеріалів, переважно піску, будівельних матеріалів, шлаку, ґрунту і т. і. В якості джерела нейтронів використовують ізотопні випромінювачі на базі берилію.

Слід зазначити, що нейтронний метод, як і рентгенівський, заборонено використовувати для вимірювання вологості продуктів харчової промисловості [57]. А метод ЯМР, як було сказано вище, пов'язаний з поглинанням радіочастотної енергії ядрами атомів водню, що входять як до складу молекули води, так і до складу молекули жиру.

Механічні методи базуються на вимірюванні механічних характеристик матеріалів, які змінюються зі зміною його вологості. Ці методи не набули широкого поширення в наслідок не високої точності [2]. Варто зазначити, що, враховуючи фізичні властивості речовин, що належать до класу гетерогенних дисперсних діелектриків, використання цих методів є доволі проблематичним [56].

В основу теплофізичних методів покладено залежність від вологості матеріалу його теплофізичних властивостей – коефіцієнта теп-

лопровідності, питомої та об'ємної теплоємності, енергії фазового переходу [58]. Та оскільки перераховані властивості суттєво залежать від гранулометричного складу досліджуваної речовини, в більшості випадків необхідне градування вологоміра для конкретного матеріалу [59]. Це значно ускладнює процес отримання результату та зменшує його ефективність через допустимі відхилення нетехнологічних параметрів вихідного продукту.

Акустичні методи базуються на залежності акустичних властивостей матеріалу від вмісту в ньому вологи. Метод полягає у вимірюванні значення поперечної і повздовжньої швидкості ультразвукової хвилі. При цьому, на параметри акустичної хвилі можуть впливати як зовнішні чинники, обумовлені властивостями середовища, що знаходиться між випромінювачем, досліджуваним зразком та приймачем, так і неоднорідність параметрів самого зразка (щільності, складу тощо), жодним чином не пов'язаних з його вологістю.

Перераховані вище непрямі методи вимірювання вологості та їх систематизацію наведено на рис. 1.3.

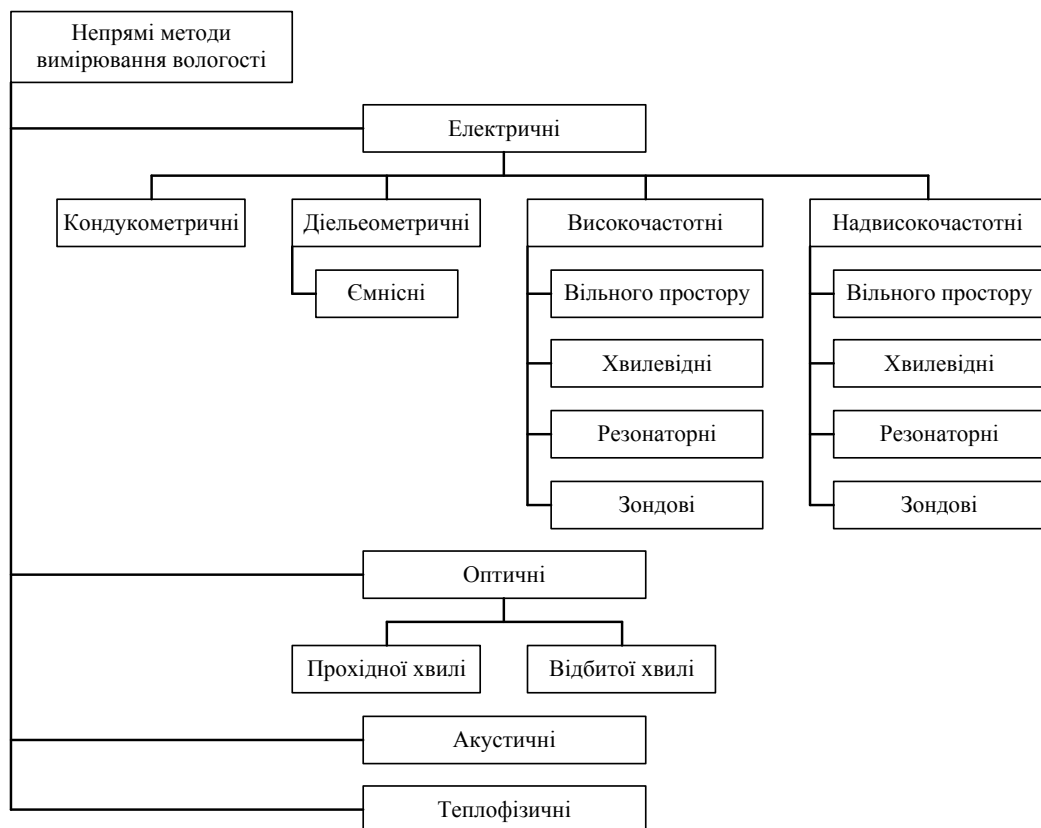


Рисунок 1.3 – Систематизація непрямих методів вимірювання вологості матеріалів

Було проведено порівняння особливостей перерахованих методів і здійснено аналіз недоліків та переваг кожного з них з точки зору можливості їх застосування для контролю вологості твердих матеріалів, що відносяться до гетерогенних дисперсних діелектриків. Серед основних метрологічних характеристик, що враховувалися при порівняльному аналізі зазначених вище методів, у першу чергу, враховувалися: похибка вимірювання, швидкодія засобів, що реалізують метод та можливий діапазон вимірювання. Результати порівняння, суть переваги і недоліки описаних вище методів наведені в табл. 1.2.

Для визначення оптимального методу вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків було здійснено порівняння описаних методів неруйнівного контролю за чотирма основними критеріями (діапазон вимірювання, точність, швидкодія, вартість), під час якого кожній із значущих характеристик було присвоєно оцінку за шкалою, у якій «1» означала, що ця характеристика найменше задовольняє технічні вимоги до побудови засобів вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків та зростала з наближенням до бажаних параметрів. Методи, характеристики яких мало відрізняються, отримували однакову оцінку. Значущість кожної з характеристик для вирішення конкретної технічної задачі враховується за допомогою вагового коефіцієнта. Визначення загальної оцінки методу відбувалося у відповідності до виразу

$$ZO = \sum_{i=1}^4 k_i O_i, \quad (1.11)$$

де  $O_i$  – оцінка методу за  $i$ -м критерієм;  $k_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го критерію (оскільки кожна з розглянутих характеристик є незалежною та такою, що суттєво впливає на можливість застосування методу для вирішення поставленої задачі, то при дослідженні вони вважалися рівноцінними, тобто  $k_i = 1$ ).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Посудін Ю. І. Фізика і біофізика навколишнього середовища / Ю. І. Посудін. – К. : Світ, 2000. – 303 с.
2. Берлинер М. А. Измерение влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 399 с.
3. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С., Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
4. Дубров Н. С. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов / Н. С. Дубров, Е. С. Кричевский, Б. И. Невзлин. – М. : Энергоатомиздат, 1980. – 144 с.
5. Фертман Г. Й. Химико-технологический контроль спиртового и лежководочного производства / Г. Й. Фертман, М. И. Мойхет. – М. : Пищевая промышленность, 1976 – 440 с.
6. Мецлер Д. Биохимия : в 2 т. Т. 1 Химические реакции в живой клетке. / Д. Мецлер; Пер. с англ. акад. А. Е. Браунштейна, д-ра хим. наук Л. М. Гинодмана, д-ра хим. наук Е. С. Сеевина ; под ред. А. Е. Браунштейна – М. : Мир, 1980. – 407 с.
7. Биохимия / В. Г. Щербаков, В. Г. Лобанов, Т. Н. Прудникова, А. Д. Минакова – М. : ГИОРД, 2005 – 466 с.
8. Берлинер М. А. Электрические методы и приборы для измерения и регулирования влажности. / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1960. – 68 с.
9. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е. С. Кричевский, В. К. Бензарь, М. В. Венедиктов и др. ; под ред. Е. С. Кричевского. – М. : Энергия, 1980. – 240 с.
10. Влажность: Измерение и регулирование в научных исследованиях и технике : в 4 т. Т.4. Принципы и методы измерения влажности жидких и твердых материалов / пер. с англ. под ред. Е. С. Кричевского. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 254 с.
11. Аналіз методів неруйнівного контролю гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, І. К. Говор, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2009. – №5. – С. 7–14.
12. Арутбян А. С. Технология переработки жиров / А. С Арутбян. – М. : Агропромиздат, 1997. – 363 с.

13. Липатов Н. Н. Сухое молоко / Н. Н. Липатов, В. Д. Харитонов. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 264 с.
14. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю порошкоподібних матеріалів : Монографія. / В. В. Богачук, Б. І. Мокін – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 141с.
15. Масло вершкове. Технічні умови : ДСТУ 4399:2005. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 12 с. – (Державний стандарт України).
16. Панфилов В. А. Машины и аппараты пищевых производств / В. А. Панфилов. – М. : Высшая школа, 2001 – 703 с.
17. Масло коровье. Технические условия : ГОСТ 37–91. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 10 с. – (Міждержавний стандарт).
18. Молоко и молочные продукты. Методы определения влаги и сухого вещества: ГОСТ 3626–73. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1973. – 12 с. – (Міждержавний стандарт).
19. Тичинська Л. М. Теорія ймовірностей : ч. 1. Історичні екскурси та основні теоретичні відомості : навчальний посібник / Л. М. Тичинська, А. А. Черепашук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 112 с.
20. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник. / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко – Вінниця : ВНТУ, 2012 – 522 с.
21. Метрологія та вимірювальна техніка : навчальний посібник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004 – 252 с.
22. Посудін Ю. І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища / Ю. І. Посудін. – К. : Світ, 2003. – 288 с.
23. Коряков В. І. Прилади в системах контролю вологості твердих речовин та його метрологічні характеристики / В. І. Коряков, О. С. Запорожець // Практика приладобудування. – 2002. – № 1. – С. 5–11.
24. Иванов В. П. Метрологическое обеспечение влагометрии твердых веществ : обзорная информация / В. П. Иванов, С. В. Медведевских, А. М. Меньшиков – М., 1990. – 40 с.
25. Вышемирский Ф. А. Производство сливочного масла / Ф. А. Вышемирский – М. : Агропромиздат, 1987. – 340 с.
26. Кухарчук В. В. Аналіз та класифікація відомих методів неруйнівного контролю вологості порошкоподібних матеріалів / В. В. Ку-

- харчук, В. В. Богачук, В. Ф. Граняк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2. – С. 13–21.
27. Грицай В. И. Классификация методов измерения влажности сыпучих материалов / В. И. Грицай // Контрольно-измерительная техника. – 1972. – Вып. 12. – С. 130–133.
  28. Дубров Н. С. Современные электрические способы измерения влажности зерна и продуктов его переработки / Н. С. Дубров, Е. П. Виноградов // Мукомольно-элеваторная промышленность. – 1966. – № 8. – С. 14–18.
  29. Федоткин И. М. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности / И. М. Федоткин, В. П. Ключков – К. : Техника, 1974. – 308 с.
  30. Івах Р. М. Систематизація методів вимірювання вологості сипких матеріалів / Р. М. Івах, М. М. Дорожовець, І. Д. Питель // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2003. – № 62. – С. 97–101.
  31. Кричевский Е. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов / Е. С. Кричевский, А. Г. Волченко, С. С. Галушкин ; под ред. Е. С. Кричевского. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
  32. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв та ін. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
  33. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин / О. А. Агеев, В. М. Мамиконова, В. В. Петров и др. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
  34. Цюцюра В. Д. Метрологія та основи вимірювань : навч. посібн. / В. Д. Цюцюра, С. В. Цюцюра – К. : Знання–Прес, 2003. – 180 с.
  35. Лалак Н. О. Аналіз методів визначення загальної твердості води / Н. О. Лалак, Є. В. Походило // Вимірювальна техніка та метрологія – 2009. – № 70. – С. 177– 81.
  36. Івченко Ю. О. Чим виміряти вологість? / Ю. О. Івченко, А. А. Федоров // Датчики і системи. – 2003. – № 8. – С. 53–54.
  37. Форейт Й. Емкостные датчики неэлектрических величин / Й. Форейт; пер. с чешс. В. И. Дмитриева. – М. : Энергия, 1966. – 160 с.
  38. Заболотний О. В. Вимірювання вологості нафтопродуктів / О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий // Метрологія та прилади. – 2008. – № 1. – С. 36–41.
  39. Івах Р. М. Вибір та оптимізація конструкції ємнісного первинного перетворювача діелькометричного вологоміра сипких матеріалів /

- Р. М. Івах // Вісник НУ Львівська політехніка. – 2005. – № 530. – С. 135–142.
40. Бензарь В. К. Два пика диэлектрической релаксации воды в зерне / В. К. Бензарь, Б. Л. Ценципер, И. И. Ренгарт // Известия АН БССР, сер. Физико-энергетическая. – 1984. – № 4. – С. 72–76.
41. А. с. 734548 СССР МКИ G 01 N 27/22. Ёмкостный влагомер / Б. А. Баховец, В. В. Васин, Г. П. Горюнов, В. И. Пастушенко, Я. В. Ткачук ; заявитель и патентообладатель Украинский институт инженеров водного хозяйства ; заявл. 16.03.1977 ; опубл. 15.05.1980, Бюл. № 18.
42. Бухгольц В. П. Ёмкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления / В. П. Бухгольц, Э. Г. Тисевич. – М. : Энергия, 1972. – 79 с.
43. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влагометрии / В. К. Бензарь. – Минск, 1974. – 286 с.
44. Исмагуллаев Р. П. Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов / Р. П. Исмагуллаев, А. Б. Гринвальд – Ташкент : Фан, 1982. – 83 с.
45. Нові розробки в області СВЧ вимірювань вологості матеріалів / М. А. Берлінер, А. А. Дем'янов, П. Г. Малорацький та ін. // Прилади і системи управління. – 1974. – № 9. – С. 22–25.
46. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
47. Кухарчук В. В. Високочастотний метод і цифровий засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, В. Ф. Граняк // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – №1. – Режим доступу: [http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2012\\_1/2012-1.files/uk/12vvhdd\\_ua.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2012_1/2012-1.files/uk/12vvhdd_ua.pdf).
48. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. / В. Фуско. – М. : Радио и связь, 1990. – 288 с.
49. Граняк В. Ф. Система керування маслосбивача безперервної дії на базі прогнозуючої моделі динамічної ідентифікації стохастичного параметра / В. Ф. Граняк, А. А. Видмиш // ХІІ науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу та студентів ВНТУ. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inceem/txt/granyak.pdf>.



50. Богачук В. В. Система керування маслозбивача безперервної дії з урахуванням запізнення отримання інформації про стан технологічного об'єкта / В. В. Богачук, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2012. – № 2. – С. 9–13.
51. Сивухин Д. В. Общий курс физики : учебное пособие для вузов : В 5 т. Т. VI. / Д. В. Сивухи – М. : Физматлит, 2005. – 795с.
52. Брант А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. / А. А. Брант. – М. : Гос. физ.-мат. издат., 1963. – 403 с.
53. Бабко А. К. Фотометрический анализ. Общие сведения и аппаратура / А. К. Бабко, А. Г. Пилипенко – М. : Химия, 1968. – 324 с.
54. Стенцель Й. І. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості : навч. посібник / Й. І. Стенцель, В. В. Тіщук. – Луганськ : Вид-во Східноукр. Держ. ун-ту, 2000. – 264 с.
55. Кухарчук В. В. Визначення характеристичних довжин оптичної хвилі для забезпечення достовірного контролю складу речовини / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, В. Ф. Граняк // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 2.– Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1245/563>.
56. Тищенко Л. М. Дослідження складу та властивостей молочного жиру і вдосконалення технології вершкового масла : дис. канд. техн. наук : 05.18.16 / Тищенко Людмила Миколаївна. – Київ, 2009. – 136 с.
57. Козлова А. В. Стандартизация, метрология, сертификация в общественном питании : учебник / А. В. Козлова. – М. : Мастерство, 2001. – 160 с.
58. Грег С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М. : Мир, 1970. – 407 с.
59. Разработка методик выполнения измерений влажности твердых веществ вакуумно-тепловым методом : отчет о НИР / ВНИИМ-СО; – Свердловск, 1987. – 75 с. – Деп. В ВНИИЦ 02.87, № ГР 01850053202.
60. Метод компенсації фазово-амплітудної похибки при перетворенні вологості у різницю фаз електромагнітних хвиль ВЧ діапазону в функції «точність-швидкодія» / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, В. Я. Ніколаєв, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2012. – № 5. – С. 7–10.

61. Викторов В. А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
62. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы химических производств : учебн. для вузов / М. В. Кулаков – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 424 с.
63. Kraezewski A. Microwave aquametry – a bibliography / A. Kraezewski // Journal of Microwave Power. – 1980. – v. 15, – № 4. – P. 298–310.
64. Кораблев И. В. Промышленные фотометрические анализаторы жидкостей в инфракрасной области спектра / И. В. Кораблев, А. И. Поляков, А. И. Шевчук. – М. : НИИТЭХИМ, 1987. – 35 с.
65. Патент 34555 Україна МПК G 01 N 20/00. Пристрій для вимірювання вологості / Крилик Л. В., Кравченко Ю. С., Звягін О. С., Мельник О. М., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 10.04.2008 ; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 25.
66. Патент 38067 Україна МПК G 01 N 22/04. Мікрохвильовий вимірювач вологості / Скрипник Ю. О., Марченко І. М., заявник і патентовласник Київський державний університет технології та дизайну ; заявл. 24.05.2000 ; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.
67. Білінський Й. Й. Світловодний аналізатор вологості газу / Й. Й. Білінський, К. Ю. Іоніна, Б. П. Книш // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – №27. – С. 44–47.
68. Патент 67312 Україна МПК G 01 N 22/04. Пристрій для вимірювання вологості / Гордієнко Ю. О., Полетаєв Д. О., Шадрін А. О., заявник і патентовласник Гордієнко Ю. О., Полетаєв Д. О., Шадрін А. О. ; заявл. 09.08.2011 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 3.
69. Патент 50396 Україна МПК G 01 N 22/04. Давач для вимірювання вологості діелектричних матеріалів / Гордієнко Ю. О., Кочержин О. І., заявник і патентовласник Харківський національний університет радіотехніки ; заявл. 03.01.2002 ; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
70. Патент 62016 Україна МПК G 01 N 27/00. Мікроелектронний вимірювач вологості / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 05.07.2001 ; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.

71. Комирный А. С. Синтез статических моделей двухпараметровых измерительных резонансных преобразователей / А. С. Комирный, А. И. Овчаренко, М. В. Шапиро // Системи обробки інформації. – 2001. – Вип. 5 (15). – С. 116–121.
72. Патент 259 Україна МПК G 01 N 27/22. Пристрій вимірювання вологості / Овчаренко О. І., Гунбін М. В., Мигущенко Р. П., Сулима В. В. ; заявник і патентовласник Товариство з обмеженою відповідальністю «Сигма» ; заявл. 21.05.1997 ; опубл. 25.12.1998, Бюл. № 6.
73. Кухарчук В. В. Математична модель несиметричного смугового сенсора вологості / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2012. – № 4. – С. 7–11.
74. Походило Є. В. Контроль якості питної води за електричними параметрами / Є. В. Походило, О. К. Гонсьор // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 68. – С. 237–242.
75. Теория диэлектриков / Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Таргев. – М. : Энергия, 1965. – 344 с.
76. Граняк В. Ф. Метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків з використанням ВЧ сенсора на базі смугового несиметричного хвилеводу / В. Ф. Граняк, В. В. Кухарчук // ХІІ науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу та студентів ВНТУ. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/ineeem/txt/granyak2.pdf>.
77. Кухарчук В. В. Індуктивний метод вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2011. – № 1. – С. 7–10.
78. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособ. для вузов в 10 т. Т. 8 / Электродинамика сплошных сред. – 4-е изд., стер. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.
79. Сушко М. Я. Метод компактных групп в теории диэлектрической проницаемости гетерогенных систем / М. Я. Сушко, С. К. Криський // Журнал технической физики. – 2009. – № 3. – С. 97–101.
80. Поглинання електромагнітного випромінювання багаточастотними кульовими частинками та матричними дисперсними системами на їх основі / Л. Г. Гречко, Ю. Б. Гнучій, С. В. Шостак, С. В. Стеценко // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – № 153. – Режим доступу: [http://visnyk.nubip.edu.ua/index.php?option=com\\_cont](http://visnyk.nubip.edu.ua/index.php?option=com_cont)

ent &view=article&id=77&Itemid=86&lang=uk.

81. Криворучко Я. С. Багатокомпонентні гетерогенні системи; ефективна діелектрична проникність та поглинання / Я. С. Криворучко, Л. Б. Лерман, Н. Г. Шкода // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 66. – С. 167–173.
82. Кухарчук В. В. Метод та засіб вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків на основі високочастотного сенсора / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк // Перспективні технології та прилади. – 2012. – № 2. – С. 119–131.
83. Квасніков В. П. Фазо-амплітудний метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. П. Квасніков, В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк // АВІА – 2013 : Збірник тез доповідей. – Київ, 2013. – С. 102–107.
84. Kuharchuk V. Phase-amplitude method for measuring humidity content of heterogenetic disperse dielectric / V. Kuharchuk, V. Graniak // Метрологія та прилади – 2013. – № 4 – С. 3–8.
85. Івах Р. М. Внесення температурної поправки при вимірюванні вологості сипучого матеріалу / Р. М. Івах, М. М. Дорожовець, І. Д. Питель // Вимірювальна техніка і метрологія. – 2003. – № 64. – С. 140–142.
86. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Температурный коэффициент - диэлектрическая проницаемость. – Режим доступу: <http://www.ngpedia.ru/id115428p1.html>.
87. Никулов Н. В. Радиоматериалы и радиокомпоненты / Н. В. Никулов, А. С. Назаров – М. : Высшая школа, 1986. – 208 с.
88. Лаборатория метеотехнологий. Диэлектрические свойства воды и льда. – Режим доступу: <http://www.meteolab.ru/projects/dielectric/>.
89. Дьяков Є. Д. Електротехнічні матеріали. Діелектрики / Є. Д. Дьяков. – Харків : ХНАМГ, 2006 – 67 с.
90. Лопатин Б. А. Теоретичні основи електрохімічних методів аналізу / Б. А. Лопатин. – М. : Вища школа, 1975. – 296 с.
91. Основи метрології та вимірювальної техніки : у 2 т. Т.1 : Основи метрології / М. М. Дорожовець, В. П. Мотало, Б. І. Стадник та ін. ; за ред. Б. І. Стадника. – Львів : Нац. ун-ту Львівська політехніка, 2005. – 532 с.
92. Кухарчук В. В. Метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків на основі ВЧ сенсора на базі смугового несиметричного хвилеводу / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк //

- Інтегровані інтелектуальні робототехнічні системи і комплекси – 2012. : тези доповідей / НАУ. – К., 2012. – С. 128.
93. Граняк В. Ф. Фазо-амплітудний метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. Ф. Граняк // Технологія – 2013 : тези доповідей. – Сєверодонецьк, 2013. – С. 73–75.
94. Зайцев В. В. Электростатическое моделирование полосковых линий / В. В. Зайцев, В. И. Занин, В. М. Трещов. – Самара : Универс-груп, 2005 – 52 с.
95. Капуρο П. А. Направляющие системы телекоммуникаций / П. А. Капуρο, В. Н. Мищенко. – Минск, 2007. – 172 с.
96. Кухарчук В. В. Метод та засіб вимірювального контролю вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк // Контроль і управління в складних системах – 2012 : тези доповідей / ВНТУ. – Вінниця, 2012. – С. 97.
97. Дослідження залежності параметрів затухання та зміщення фази електромагнітних хвиль від вологості середовища їх поширення / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, Ю. О. Дмитрієв, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2011. – № 4. – С. 103–106.
98. Конструирование и расчет полосковых устройств : учебное пособие для вузов / В. И. Голубев, И. С. Ковалев, Е. Г. Кузнецов и др. – М. : Советское радио, 1974. – 296 с.
99. Кухарчук В. В. Математична модель затухання інформативної хвилі смугового сенсору вологості / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк // Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 3–4 – С. 186–192.
100. Форкун Я. Б. Теоретичні основи електротехніки : текст лекцій / Я. Б. Форкун, С. М. Юрченко. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 78 с.
101. Граняк В. Ф. Фазо-амплітудний метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. Ф. Граняк // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій – 2013 : тези доповідей. – Севастополь, 2013. – С. 263.
102. Комирный А. С. Вычислительные аспекты высокочастотных методов измерения влажности на основе феноменологических РС-моделей / А. С. Комирный, А. И. Овчаренко, М. В. Шапиро : материалы международной научно-технической конференции Проблемы информатики и моделирования. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2001. – С. 3.

103. Кухарчук В. В. Полосковий метод та засіб вимірювання вологості гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах – 2011 : тези доповідей / ВНТУ – Вінниця, 2011. – С. 58.
104. Порев В. А. Похибки вимірювання температури в біспектральній пірометрії / В. А. Порев, М. О. Маркін // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація» – 2010. – № 169. – С. 199–205.
105. Бовсуновський А. П. Електротехнічні матеріали. Короткий довідник / А. П. Бовсуновський. – К. : НУХТ, 2012 – 36 с.
106. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Быстродействие – логический элемент. – Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id292980p1.html>.
107. Патент 65756 Україна МПК G 01 N 22/04. Смоговий вимірювач вологості / Кухарчук В. В., Богачук В. В., Дмитрієв Ю. О., Граняк В. Ф., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.
108. Глинченко А. С. Цифровые методы измерения сдвига фаз / А. С. Глинченко, С. Ф. Контдорф. – Новосибирск : Наука, 1979. – 280 с.
109. Поздняков И. К. Определение амплитудных погрешностей фазометров / И. К. Поздняков // Труды ин-ов Комитета, М. : Стандартгиз, 1963. – Вып. 70 (130). – 176 с.
110. Патент 73072 Україна МПК G 01 N 22/04. Пристрій для контролю вологості / Кухарчук В. В., Богачук В. В., Граняк В. Ф., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 28.02.2012 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 17.
111. Патент 74396 Україна МПК G 01 N 22/04. Пристрій для контролю вологості / Кухарчук В. В., Богачук В. В., Граняк В. Ф., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 11.04.2012 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.
112. Воронов А. С. Измерение разности фаз сигналов / А. С. Воронов // Горизонты образования. – 2007. – № 9. – С. 1–2.
113. Патент 76417 Україна МПК G 01 N 22/04. Адаптивний пристрій контролю вологості / Кухарчук В. В., Богачук В. В., Граняк В. Ф.,

- заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 18.04.2012 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1.
114. Кухарчук В. В. Фазо-амплітудний метод та засоби вимірювально-го контролю гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. Ф. Граняк // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах – 2013 : тези доповідей / ВНТУ – Вінниця, 2013. – С. 101–103.
115. Патент 83336 Україна МПК G 01 N 22/04. Двоканальний пристрій контролю вологості / Кухарчук В. В., Богачук В. В., Граняк В. Ф., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 24.12.2012 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.
116. Патент 84426 Україна МПК G 01 N 22/00. Двоканальний пристрій контролю вологості / Граняк В. Ф., Кухарчук В. В., заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет ; заявл. 19.03.2013 ; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20.
117. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : Либідь, 1997. – 544 с.
118. Застосування моделей прогнозування для стабілізації вмісту вологи у кінцевому продукті при виробництві вершкового масла / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, В. Ф. Граняк, А. С. Ніколаєв // Вісник ВПІ. – 2012. – № 3 – С. 9–12.
119. Богачук В. В. Розробка системи керування електропривода маслосбивача безперервної дії з урахуванням запізнення отримання інформації про стан технологічного об'єкта. / В. В. Богачук, В. Ф. Граняк – Оптимальне керування електроустановками – 2011 : Матеріали I Міжнародної конференції. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/energo/2011/>
120. Майстренко В. М. Основи теорії засобів вимірювання : Монографія. / В. М. Майстренко. – Хмельницький : ПП Мельник А. А., 2010. – 492 с.
121. Білинський Й. Й. Аналізатор вологості природного газу та оцінка вірогідності вимірювального контролю вологості / Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, В. В. Онушко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – № 3. – С. 28–31.

*Наукове видання*

**Граняк Валерій Федорович**  
**Кухарчук Василь Васильович**

**ВИСОКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ  
ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ  
ГЕТЕРОГЕННИХ ДИСПЕРСНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Граняком

Підписано до виготовлення 24.12.2015 р.

Системні вимоги:  
процесор Pentium; 512 Mb RAM;  
Windows XP,7,8; Acrobat Reader 6.0.  
Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 3,5 Мб.  
Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2015-07

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,  
Комп'ютерний інформаційно-видавничий центр Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ,  
ГНК, к. 114, м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

**publish.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.