

*М. О. Куцевол, О. М. Куцевол,  
О. С. Яремчук*

***ВИСОКОЧАСТОТНІ  
МЕТОДИ І ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ  
ВОЛОГОСТІ ХЛІБОБУЛОЧНИХ  
ВИРОБІВ***

Монографія

Видавництво ВДАУ  
2009

УДК 621.317:578.087  
ББК 30.10 + 36 – 1  
К 95

*Рецензенти:*

**В. М. Лисогор**, доктор технічних наук, професор ВДАУ

**В. Г. Петрук**, доктор технічних наук, професор ВНТУ

Рекомендовано до видання методичною радою Вінницького державного аграрного університету Міністерства аграрної політики України (протокол №\_\_ від \_\_.\_\_\_\_\_.2009 р.)

**Куцевол М. О., Куцевол О. М., Яремчук О. С.**

К 95 Високочастотні методи і засоби контролю вологості хлібобулочних виробів. Монографія. – Вінниця: Видвництво ВДАУ, 2009. –104 с.

ISBN

В монографії описані високочастотні методи та засоби контролю вологості хлібобулочних виробів, як капілярно-пористих матеріалів із нестабільними діелектричними втратами і пористістю. Запропоновано нові інформативні параметри об'єкта контролю. Розроблено нові методи контролю, захищені від нестабільних діелектричних втрат і пористості. Розроблено математичну модель об'єкта контролю вологості, алгоритми функціонування та структури засобів контролю вологості хлібобулочних виробів.

Для науковців, спеціалістів народного господарства, викладачів, аспірантів, студентів.

**УДК 621.317:578.087**  
**ББК 30.10 + 36 – 1**

**ISBN**

© М. Куцевол, О. Куцевол, О. Яремчук 2009

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	6
1.1. Поняття вологості пористих харчових матеріалів .....	6
1.2. Аналіз і порівняльна оцінка методів контролю вологості пористих харчових матеріалів .....	7
1.3. Вимоги до засобів контролю вологості пористих харчових матеріалів .....	9
1.4. Постановка завдань досліджень .....	12
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ .....	14
2.1. Фізичні процеси, що протікають при виробництві хліба .....	14
2.2. Діелектричні властивості вологих капілярно-пористих харчових матеріалів .....	19
2.3. Експериментальні дослідження діелектричних параметрів об'єкта контролю .....	24
2.4. Розробка і дослідження електрофізичної моделі об'єкта контролю ...	34
2.5. Дослідження м'якушки хліба за допомогою повного факторного експерименту .....	38
2.6. Розробка математичної моделі м'якушки хліба .....	40
2.7. Вибір і обґрунтування способу реалізації діелектрометричного методу виміру вологості хліба .....	46
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУР ВОЛОГОМІРІВ, ВИБІР ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....	50
3.1. Ємнісна комірка - чутливий елемент високочастотних вологомірів ..	50
3.2. Вибір інформативних параметрів сигналу вимірювального перетворювача .....	52
3.3. Розробка алгоритмів виміру .....	65
3.4. Структурна побудова вологомірів хліба .....	67
3.5. Розробка рівняння градуювання вологоміра хліба і перевірка його адекватності .....	74
3.6. Розробка рівняння градуювання вологоміра м'якушки хліба і перевірка його адекватності .....	76
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ПОХИБКИ І ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ХЛІБА .....	82
4.1. Розрахунок інструментальної похибки пристрою для контролю вологості хліба .....	82
4.1.1. Розрахунок похибки від нестабільності частоти генераторів вхідної	

напруги .....	82
4.1.2. Розрахунок похибки від температурної нестабільності ємності чутливого елемента .....	83
4.1.3. Розрахунок похибки від нестабільності частоти допоміжного генератора .....	85
4.1.4. Розрахунок похибки, внесеної аналого-цифровим перетворювачем	
4.2. Перевірка збіжності дослідних розподілів з теоретичними .....	86
4.3. Обґрунтування припустимої похибки засобів контролю вологості хліба .....	89
4.4. Оцінка впливу похибки контролю на вірогідність контролю .....	92
4.5. Результати контрольних випробувань засобу контролю вологості хліба .....	94
ВИСНОВОК .....	95
ЛІТЕРАТУРА .....	97

## ВСТУП

Виробництво хлібобулочних виробів представляє собою складний фізико-хімічний процес, для керування яким необхідно мати об'єктивну інформацію про різні параметри як на окремих операціях технологічного циклу, так і на кінцевій стадії виробництва [1,18,19,34,47,63,69,71,87].

Одним з основних контрольованих параметрів при виробництві хлібобулочних виробів є їхня вологість, оскільки якісні показники і тривалість зберігання залежать саме від цього параметра. Хлібобулочні вироби представляють собою складні капілярно-пористі органічні матеріали. Для вибору оптимального методу контролю їхньої вологості необхідно враховувати такі фізико-хімічні фактори, як будова матеріалу і форми зв'язку вологи з речовиною [5,11,20,35].

Нині на підприємствах, що виробляють хлібобулочні вироби, відсутні автоматизовані засоби контролю вологості кінцевого продукту. Аналіз вологості виконується трудомістким і малоефективним термогравіметричним методом. При цьому самі виміри носять скоріше атрибутивний характер, оскільки результат неможливо використовувати для корекції технологічного процесу.

Складність об'єкта досліджень призвела навіть до твердження [72,73], що контроль вологості хліба можливий тільки стандартним термогравіметричним методом.

Об'єктивні виміри вологості неможливо виконати без врахування форм зв'язку води з іншими речовинами [14,60], оскільки електрофізичні властивості води сильно залежать від ступеня і виду зв'язку її з речовиною [6,7,41,50,62].

На результат виміру в значній мірі впливає пористість і нестабільність діелектричних втрат матеріалу, а оскільки мова йде про контроль вологості капілярно-пористих матеріалів, до яких відносяться хлібобулочні вироби, то усунення цього впливу приведе до збільшення точності і вірогідності контролю [58,66,74,83].

Тому, із практичної і наукової точки зору, розробка і створення вологомірів хлібобулочних виробів є завданням актуальним. Це неможливо зробити без вивчення індивідуальних особливостей м'якушки хліба, як найбільш характерного представника хлібобулочних виробів, що визначаються в основному специфікою зв'язку води з речовиною об'єкта контролю.

Метою даної роботи є розробка методів і засобів контролю повної вологості хлібобулочних виробів, у яких зменшена похибка від зміни пористості і діелектричних втрат.

Виконання поставленої мети можливо при вирішенні наступних завдань:

- розробка методів і технічних засобів контролю повної вологості хлібобулочних виробів;
- оцінка похибки контролю вологості;

- промислове застосування методів і засобів контролю повної вологості.

## **РОЗДІЛ 1**

### **СТАН ПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **1.1. Поняття вологості пористих харчових матеріалів**

Вологість речовин є одним з визначальних показників якості, оскільки фізичні і технологічні властивості матеріалів, продуктивність устаткування, здатність до зберігання у великому ступені залежать від вологості сировини і напівфабрикатів. Наявність вологи в матеріалах сильно впливає на їх фізико-хімічні і електричні властивості. Це пов'язано із високою діелектричною проникністю води, її здатністю легко взаємодіяти з іншими речовинами [6,7,59,65,99].

Вплив води на електрофізичні властивості матеріалу в значній мірі залежить від того, у якому стані перебуває вона в досліджуваній речовині. Відповідно до класифікації академіка Ребіндера П. А. можна виділити три основні форми зв'язку вологи з матеріалом: хімічну, фізико-хімічну і фізико-механічну [78]. Класифікація заснована на принципі вивчення енергії цього зв'язку.

Найбільш високу енергію зв'язку має хімічно зв'язана волога (гідратна або кристалогідратна). Хімічний зв'язок призводить до утворення речовин з новими властивостями. Вода входить до складу молекул нової речовини в точних кількісних співвідношеннях, утримується в них дуже міцно і може бути вилучена в процесі хімічних реакцій або в результаті прожарювання.

Фізико-хімічний зв'язок припускає поглинання вологи в різних нестрого певних співвідношеннях. Цей зв'язок має адсорбційну і осмотичну вологу.

Адсорбційна вода утворюється в результаті дії молекулярного силового поля. На поверхні речовини під дією молекулярного силового поля утворюється один або кілька мономолекулярних шарів, які пов'язані з поверхнею адсорбенту. Причому, найбільш міцно пов'язаний з речовиною перший шар, ступінь зв'язку наступних слабшає в міру віддалення їх від поверхні речовини. Це зв'язок середньої інтенсивності. Може бути порушений випаровуванням, десорбцією або дезадсорбцією.

Осмотична форма зв'язку утворюється за рахунок вибіркової дифузії через напівпроникну оболонку під впливом осмотичного тиску. За інтенсивністю – це слабкий зв'язок. Умовою порушення зв'язку є вологовидалення, утворення більш концентрованого розчину зони розподілу вологи, коли вода проникає із середовища з менш концентрованим розчином. У результаті осмотичної взаємодії речовини з вологою відбувається набрякання матеріалу.

Фізико-механічний зв'язок припускає утримання води в невизначених співвідношеннях. Розрізняють її основні форми: структурна, зв'язок у мікрокапілярах, зв'язок у макрокапілярах, зв'язок змочування.

Структурний зв'язок виникає при утворенні гелю. Зв'язок слабкий. Мономолекулярний шар зв'язаний адсорбційно. У ньому вода міняє свої

властивості. Порушується випаровуванням, віджимом вологи, тиском, порушенням структури.

Зв'язок у мікро- і макрокапілярах утворюється при поглинанні води з вологого повітря і при безпосередньому контакті капілярів із вологою. Причиною виникнення даної форми зв'язку є капілярний тиск, обумовлений кривизною поверхні рідини в капілярах. За інтенсивністю – це слабкий зв'язок. Порушується випаровуванням, тиском більшим капілярного. Мономолекулярний шар коло стінок капілярів зв'язаний адсорбційно. Основна ж маса вологи в капілярах є вільною.

Зв'язок змочування характерний для непористих матеріалів, тому в даній роботі не розглядається.

Таким чином, існує вільна і зв'язана волога з різною інтенсивністю зв'язку. Зв'язана волога міняє свої електрофізичні властивості. Вона одержує властивості твердого пружного тіла з підвищеною щільністю і нездатна розчиняти розчинні речовини. Щільність зв'язаної вологи більша одиниці, її діелектрична проникність менша, ніж у вільної вологи.

## **1.2. Аналіз і порівняльна оцінка методів контролю вологості пористих харчових матеріалів**

Методи контролю вологості підрозділяються на прямі і непрямі.

В основі прямих методів лежить розподіл досліджуваного матеріалу на вологу і сухий залишок. При непрямих методах вологість матеріалу визначають за фізичними властивостями або величинами, функціонально пов'язаними із вологістю. До прямих методів відносяться: термогравіметричний і дистиляційні.

Серед прямих методів найбільше поширення одержав термогравіметричний – повітряно-теплове висушування проби матеріалу до постійної маси. Цей метод часто використовують в якості арбітражного для вологомірів непрямого визначення вмісту вологи. Його перевагою є простота. Діапазон виміру вологості 0...90%.

Основні причини похибок методу: обмін вологою із навколишнім середовищем, похибки зважування, вплив ступеня подрібненості проби на результат виміру.

Суттєвим недоліком термогравіметричного методу є тривалість виміру.

В основу дистиляційних методів покладене нагрівання зразка досліджуваної речовини або матеріалу в посудині з рідиною, що не розкладається при нагріванні і не змішується із вологою зразка. В якості такої рідини використовують зазвичай бензол, толуол, мінеральні масла. Пара води, що виділяється при нагріванні, разом з парою рідини піддаються відгону і, при проході через холодильник, конденсуються у вимірювальній посудині, де потім вимірюється обсяг або маса вологи в зразку. Максимальна межа виміру вмісту вологи 40%, час виміру близько 40 хв., абсолютна похибка 1%.

Апаратне оснащення дистиляційних методів більш громіздке і менш зручне в роботі, аніж термогравіметричних, тому вони не знайшли широкого застосування в промисловості.

Отже, розглянуті вище прямі методи визначення вологості пористих харчових матеріалів вимагають тривалого часу виміру і досить громіздкого і складного устаткування, але при цьому мають досить високу точність виміру, щоб за певних умов служити в якості лабораторних і зразкових методів.

Відомо [14], що вміст вологи в речовині або матеріалі визначає його фізичні властивості. Функціональний зв'язок цих властивостей із вмістом вологи є основою побудови різних типів вологомірів, що працюють за принципом непрямого визначення вологості матеріалів і речовин. Серед непрямих методів виміру вологості, застосовуваних у харчовій промисловості, найпоширенішими є електричні (кондуктометричний, діелектрометричний, НВЧ) і оптичні [12,24,77].

У кондуктометричному методі оцінка вмісту вологи відбувається за результатами виміру електричного опору (об'ємного або поверхневого). Кондуктометричний метод застосовується для визначення вологості в діапазоні від 2 до 30%. При вологості вище 30% метод має низьку чутливість. Головною перевагою цього методу є простота схеми і конструкції вимірювального приладу. Проте, вплив на результат виміру хімічного складу досліджуваної речовини, температури, щільності (пористості) обмежують область застосування цього методу [77,95,96].

Діелектрометричний метод заснований на вимірі діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат вологих матеріалів у широкому діапазоні частот. Основними характеристиками досліджуваного матеріалу при цьому є залежності діелектричної проникності і діелектричних втрат від вологості, частоти змінного поля, температури. Перевагами даного методу у порівнянні із кондуктометричним є: менша чутливість до хімічного складу і температури матеріалу, швидкодія і висока точність (похибка близько 0,5%). При використанні цього методу на вологісних, частотних і температурних характеристиках сильно позначається пористість матеріалу. Для усунення цього недоліку застосовують примусове ущільнення матеріалу у первинному перетворювачі [8,9,54]. На результат контролю вологості діелектрометричним методом впливають, окрім того, співвідношення кількості вологи різних станів і форм зв'язку, а також великі провідності.

Надвисокочастотні методи визначення вологості відрізняються гарною чутливістю, точністю, можливістю безконтактних вимірів. Принцип дії НВЧ вологомірів ґрунтується на визначенні вологості за відбитими або пропущеними через контрольовану речовину електромагнітними хвилями. В якості інформативного параметру використовується амплітуда, фаза, кут повороту площини поляризації лінійно-поляризованої плоскої електромагнітної хвилі. Основні різновиди цих методів – хвилевідний, резонаторний і метод вимірів у вільному просторі. Найбільше поширення одержав метод контролю вологості за поглинанням НВЧ енергії, що проходить через зразок, оскільки він має найбільшу точність і дає оцінку у всьому об'ємі досліджуваної проби. Його недолік полягає у двосторонньому розташуванні (відносно зразка проби) передавача і приймача, що збільшує габарити пристрою. До того ж при цьому пред'являються дуже жорсткі вимоги до



товщини досліджуваної проби матеріалу. Метод відбиття не знайшов широкого застосування через низьку точність контролю. Значним недоліком методу є залежність глибини проникнення електромагнітної хвилі в зразок від його параметрів. Фазові методи НВЧ вологометрії не знайшли широкого застосування через складність їхньої технічної реалізації і відсутність досить простих і точних фазообертачів в інтервалі  $0-360^{\circ}$ . До того ж результат контролю сильно залежить від гранулометричного складу і пористості матеріалу [43].

Крім розглянутих НВЧ методів, що використовують взаємодію вільних спрямованих електромагнітних хвиль із досліджуваним матеріалом зразка, окремо можна виділити резонаторний і хвилевідний методи. Тут досліджуваний зразок частково заповнює обсяг резонатора або хвилеводу, змінюючи параметри електромагнітних процесів у них. У першому випадку змінюється резонансна частота і амплітуда коливань у резонаторі, а в іншому - амплітуда і фаза хвилі у хвилеводі під впливом досліджуваного об'єкта. Цим методам властиві значною мірою недоліки методів, що використовують вільні хвилі. Але головним недоліком, що практично виключає їхнє широке застосування з метою контролю вологості пористих харчових матеріалів, є складність технічних рішень по розміщенню і видаленню досліджуваних зразків із порожнини резонатора або хвилеводу, які істотно впливають на результат контролю.

Серед оптичних методів найбільшу зацікавленість представляє метод інфрачервоної фотометрії (ІЧ-метод) [32,88,90,97]. В основу методу покладений вимір вибірного поглинання вологою ІЧ-випромінювання певної довжини хвилі, або відбитого поверхнею досліджуваної речовини чи матеріалу, потужності випромінювання, що проходить через речовину. ІЧ-методи можуть бути застосовані для широкого класу речовин, у тому числі і для пористих харчових матеріалів. Діапазон виміру вологості лежить у межах від 10 до 100%.

Перевагами ІЧ-методів є висока точність (абсолютна похибка – 0,05%, а також експресність і безконтактність контролю.

В якості недоліків ІЧ-методів можна назвати необхідність подрібнювання проби досліджуваного пористого матеріалу, сильну залежність від ступеня подрібнювання і вплив на результат виміру розсіювальних властивостей речовини.

Основні показники розглянутих методів виміру вологості пористих харчових матеріалів зведені в таблицю 1.1.

### **1.3. Вимоги до засобів контролю вологості пористих харчових матеріалів**

Пористі харчові матеріали, до яких відноситься хліб і булочні вироби, є дуже складними об'єктами дослідження вологості. Ця складність пояснюється наступними фізико-хімічними особливостями: пористий характер об'єкта, причому, пористість - величина випадкова і може бути різною навіть у виробах з однієї партії, наявність солей, нерівномірність вологості у всьому об'ємі, значна кількість зв'язаної вологи,

Ці особливості, а також те, що хлібобулочні вироби є харчовими продуктами, висувають особливі вимоги до засобів контролю їхньої вологості.

Таблиця 1.1

Порівняльні дані відомих методів контролю повної і зв'язаної вологи в пористих харчових матеріалах

Методи вимірювання	Повна або часткова вологість	Межі вимірювання	Похибка вимірювання	Переваги	Недоліки
2	3	4	5	6	7
Термогравіметричний	Повна	0-90%	±0,5%	Простога	Обмін вологою з навколишнім середовищем, вплив ступеня подрібнення на результат, значна тривалість процесу вимірювання (2 год. і більше) та значні енергозатрати
--//--	Зв'язана	0-25%	±0,5%	--//--	--//--
Дистиляційний	Повна	0-40%	±1%	Висока відтворюваність результату	Складність апаратури, що використовується, значна тривалість контролю (близько 40 хв.)

Продовження табл.1.1

Продовження табл.1.1						
2	3	4	5	6	7	№ п/п
Кондукто- метричний	Повна	2-30%	±1%	Проста	Сильна залежність результатів від пористості, нерівномірності розподілення вологи по всьому об'єму дослідного матеріалу, температури	1
Діелектро- метричний	Повна	0-90%	0,5...5%	Швидкодія, оцінювання вологості по всьому об'єму матеріала	Залежність результатів від пористості, температури зразка	1
Надвисоко- частотний	Повна	0-100%	±2%	Безконтактність контролю	Залежність результатів контролю від пористості, товщини зразка, складності дослідної апаратури	2
Іч- фотометричний	Повна	0-100%	до ±0,05%	Висока точність, експресність, безконтактність	Необхідність подрібнення зразка, сильна залежність від пористості	3

1	4	5	6	7
---	---	---	---	---

Одною із перших вимог є експресність контролю. Малий час визначення вологості хлібобулочних виробів дозволяє оперативно втручатися в хід технологічного процесу і, при потребі, корегувати його.

Немаловажним фактором є вірогідність і надійність контролю вологості, від цих параметрів у значному ступені залежать техніко-економічні показники підприємства, а також якість готової продукції [82,64].

Подальша модернізація процесів виробництва хлібобулочних виробів припускає автоматизацію технологічних операцій, що вимагає автоматизації і безперервності контролю різних показників виробництва, у тому числі і вологості. Вологоміри, разом із власними блоками індикації результатів вимірів, повинні мати інтерфейсні пристрої сполучення із керуючими комплексами на базі ЕОМ [71,91].

Наступна вимога – простота експлуатації і обслуговування. Ця вимога викликана тим, що контроль якості виробів на хлібозаводах здійснюють технологи хлібопекарського виробництва, які не мають достатніх навичок роботи зі складною радіовимірювальною апаратурою.

І, нарешті, конструкція, схемні рішення вологомірів повинні максимально забезпечити їхню безпечну експлуатацію, високі масо-габаритні характеристики і мале енергоспоживання.

Первинні перетворювачі вологомірів повинні забезпечити зручне введення в їхню робочу зону зразків досліджуваних пористих матеріалів. Найбільш в повній мірі цій вимозі відповідають перетворювачі планарного типу. Внутрішня структура вологомірів повинна забезпечити одержання інформації про повну вологість або, при необхідності, про її часткові значення (за змістом зв'язаної або вільної вологи).

#### **1.4. Постановка завдання досліджень**

Як видно з попереднього аналізу, контроль вологості є однією із найважливіших складових технологічного циклу виробництва хліба і хлібобулочних виробів.

Складність об'єкта дослідження (наявність значної кількості зв'язаної вологи, мінливість пористості, розмаїтість форм, значні діелектричні втрати) не дозволяють використовувати наявні нині в промисловості вологоміри і вологометричні установки для експресного контролю вологості хліба і хлібобулочних виробів. Основним методом, який широко використовується в практиці лабораторного аналізу, є метод термогравиметрії. Результати аналізів при цьому можуть бути відомі не раніше 5 годин після випікання хліба [94], найчастіше після того, як продукція реалізована в торговельній мережі, що не дозволяє вносити корективи в технологічний процес.

Відомі методи виміру вологості матеріалів з нестабільними втратами [8,101,111], але вони припускають ущільнення досліджуваних зразків і містять інерційні елементи в колах компенсації, які знижують точність виміру.

Наявні дані про вміст вільної і зв'язаної води в готових хлібобулочних виробках [27,76] говорять про те, що протягом тривалого часу співвідношення цих компонентів повного вмісту вологи змінюється незначно, тому з великим ступенем вірогідності можна калібрувати діелектрометричний вологомір за повним вологовмістом.

Основними заважальними факторами, що сильно впливають на результат виміру, є мінливість пористості і діелектричних втрат.

Таким чином, на основі вивчення структури об'єкта досліджень, його електрофізичних властивостей, необхідно розробити ефективні методи контролю повного вмісту вологи, які виключають вплив пористості і діелектричних втрат на результат, на основі отриманих методів розробити структури засобів контролю повного вмісту вологи в м'якушці хліба і хлібобулочних виробках, які виконують експресні виміри із похибкою, близькою до похибки стандартного методу.

## РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ

### 2.1. Фізичні процеси, що протікають при виробництві хліби

При взаємодії води з борошном відбувається інтенсивне її зв'язування. Причому, 45,5% зв'язаної води в тісті зв'язується крохмалем, 31,2% - білком, і 23,3% - пентозаном [31]. Тому вологовбирання борошна може кількісно характеризувати наявність у ній перерахованих основних компонентів і залежить також від складу борошна і крупноти перемолю. Відомо [31], що гранульований крохмаль може утримувати воду в тісті в кількості 50% своєї маси, роздрібнені ж зерна крохмалю можуть зв'язати води у два рази більше своєї маси.

При низькому вмісті води в борошні утворюється нестійка система, що реагує на найменшу зміну вологості (рис.2.1) [31].

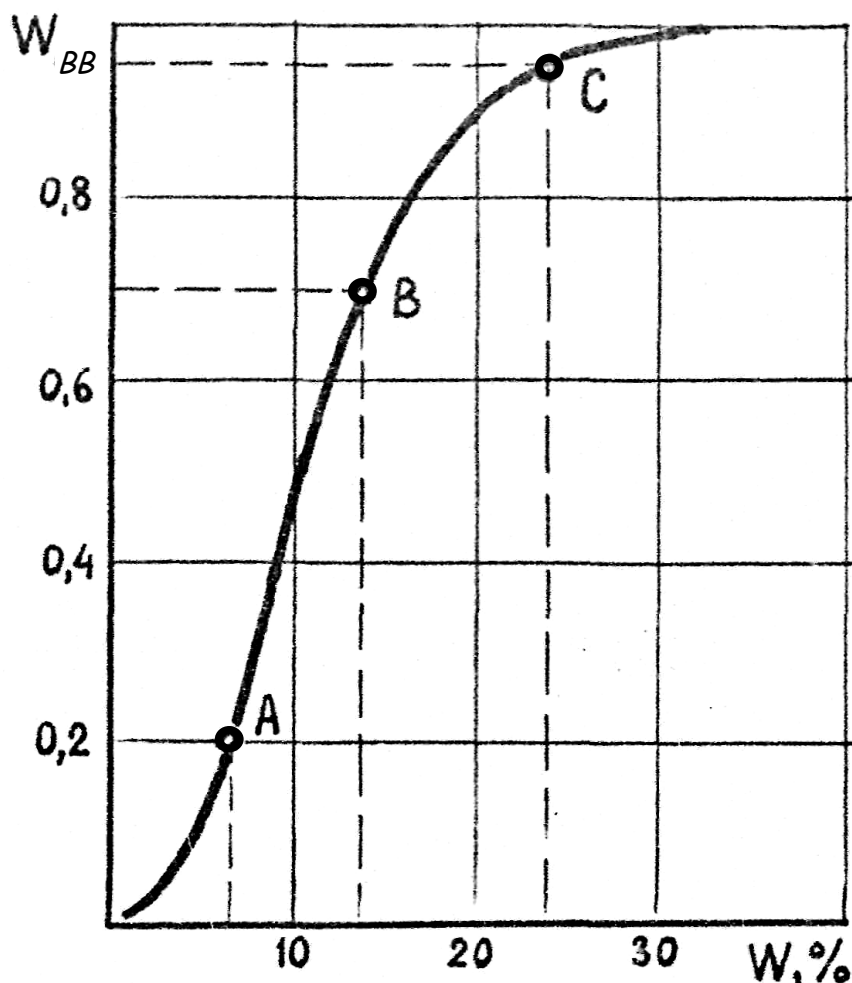


Рис.2.1. Залежність, яка характеризує систему повітря-вологий матеріал

При дуже низькому значенні вмісту води (обл. *A*,  $W = 6,5\%$ , відносна вологість повітря  $W_{\text{вв}} = 0,2$ ) вода міцно зв'язана в мономолекулярному шарі і характеризується великою теплою адсорбції. В області *B* ( $W_{\text{вв}} = 0,2 - 0,7$ ) до 14% води досить міцно зв'язана у вигляді другого мономолекулярного шару, але з'єднувальні сили тут набагато слабкіші, оскільки другий шар безпосередньо не стикається з матеріалом, тому щільність води зменшується. У наступних шарах щільність води ще більше зменшується, а ізотерма починає вирівнюватися. При повному вмісті води більше 14% область *C* представляє собою ділянку капілярної конденсації із наявністю частково вільної води. Проте у цій області  $W_{\text{вв}} = 0,7 - 0,9$  і лише при вмісті води вище 23% ізотерма наближається до значення  $W_{\text{вв}} = 1$ , що підтверджує наявність істинно вільної води [31,60,90]. Визначено [31], що максимальна кількість мономолекулярних шарів у борошні 5-6. Кількість зв'язаної води в борошні не залежить від того, зроблена вона із твердої або м'якої пшениці, а також від загального вмісту води [31,116].

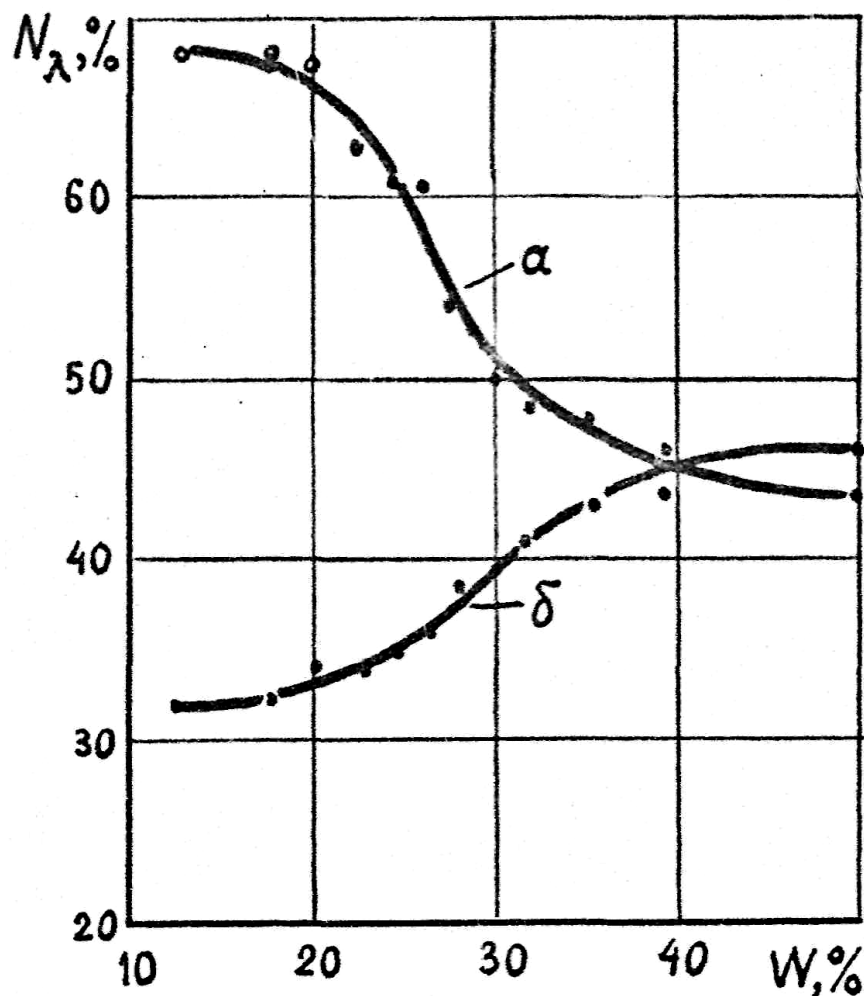


Рис.2.2. Характеристики системи при штучному її зволоженні:  
а – вільні ліпіди; б – зв'язані ліпіди

На ділянці між кінцем області капілярної конденсації (вміст води 20%,  $W_{\text{вв}} = 0,9$ ) і початком прояву фази вільної води при утворенні тіста мінімальної тягучості (вміст води 35%,  $W_{\text{вв}} = 1$ ) у системі борошно-тісто відбуваються необоротні процеси, у фізичній структурі і розподілі ліпідів [31].

При механічному перемішуванні тіста частина зв'язаної води вивільняється (рис.2.3).

Порівняння змін у вільних ліпідах при зволоженні без витрат механічної енергії (рис.2.2) з даними рис.2.3 свідчать, що зв'язування останніх відбувається в момент появи вільної води. Ці процеси (збільшення кількості вільної води і зв'язування ліпідів) протікають паралельно до досягнення вологості 35%. Зв'язування ліпідів припиняється, коли в тісті є достатня кількість води для його перемішування [31]. Рис.2.4 підтверджує залежність між витраченою енергією і вивільненою вологою у процесі утворення теста.

Готове тісто після операцій дозрівання і механічної обробки, у результаті яких вміст води і форми зв'язку води змінюються незначно, надходить на заключну стадію виробництва хлібних виробів – випікання. У процесі випікання усередині тістової заготовки протікають одночасно мікробіологічні, біохімічні, фізичні і колоїдні процеси [113-115].

Тістові заготовки прогриваються поступово, починаючи з поверхні, тому всі процеси, характерні для випікання хліба, відбуваються не одночасно у всій його масі, а пошарово – спочатку в зовнішніх, потім у внутрішніх шарах [23,26,67].

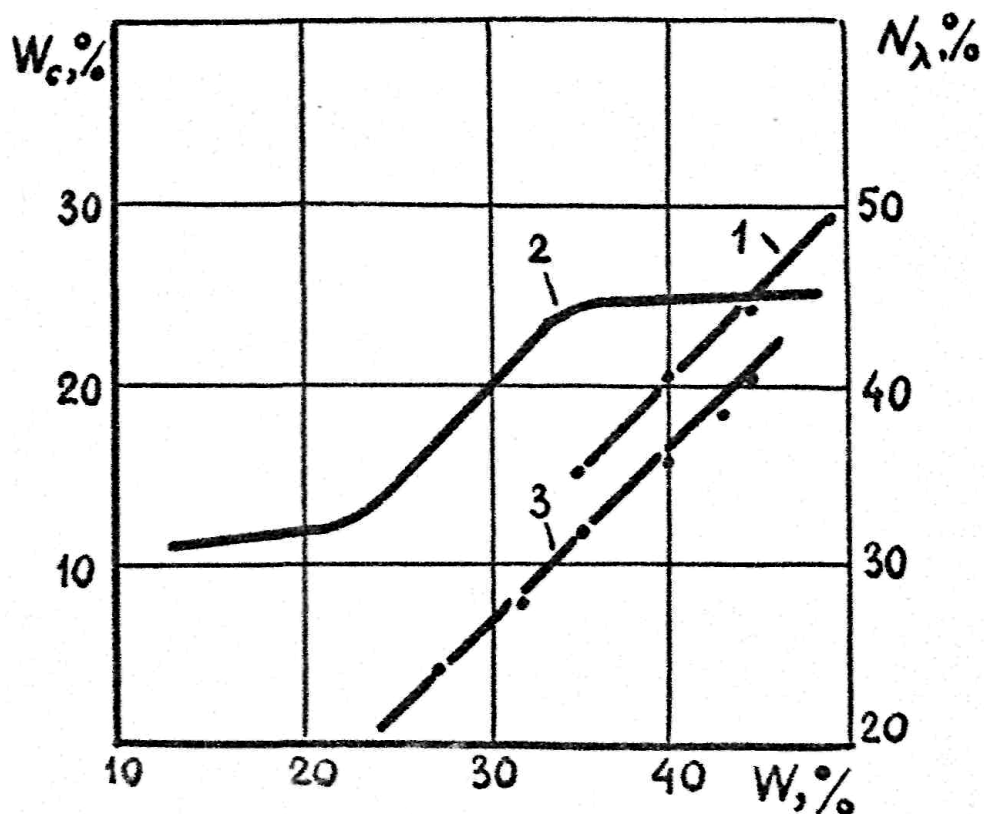




Рис.2.3. Процес вивільнення води у процесі механічного перемішування тіста:

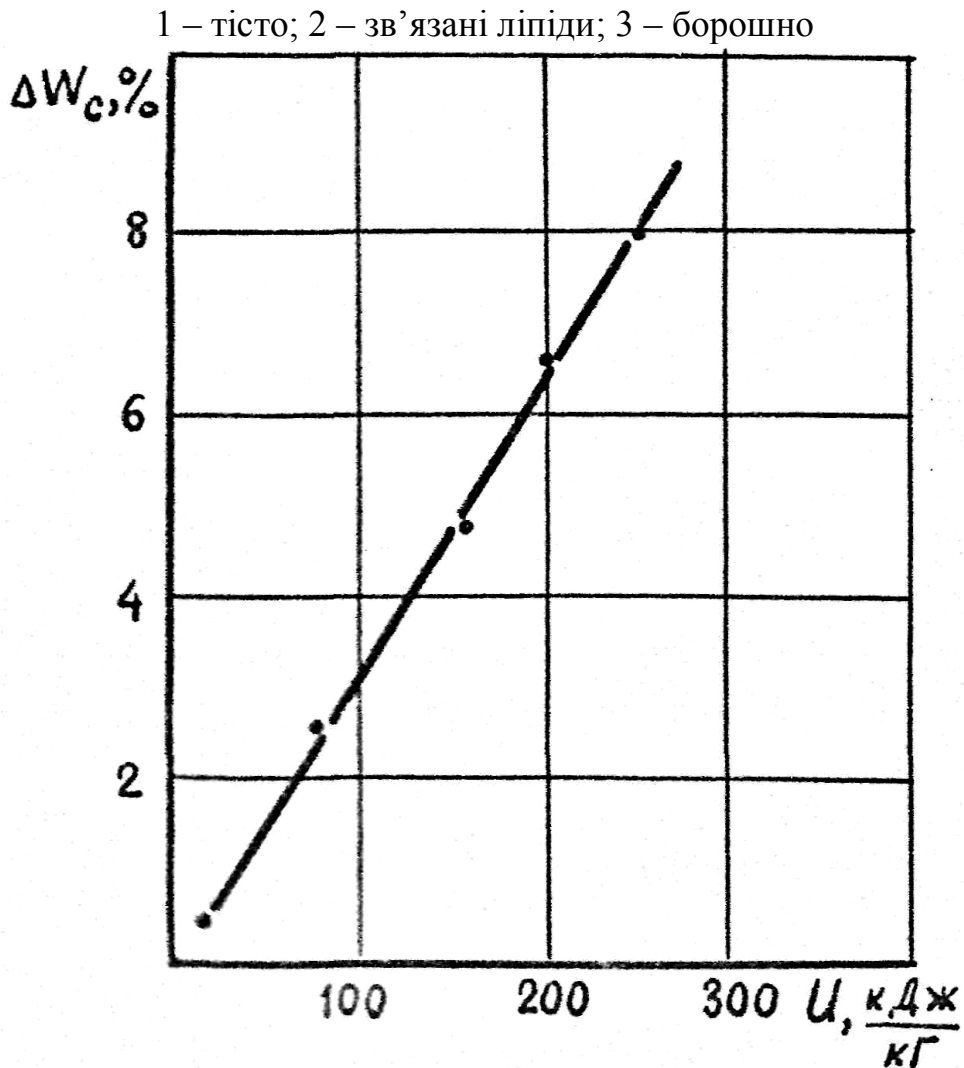


Рис.2.4. Залежність між витраченою енергією і вивільненою водою у процесі утворення тіста

Процес випікання починається утворенням шкоринки у результаті зневоднювання зовнішніх шарів тістової заготовки під впливом температури, яка у пекарній камері досягає 200-280<sup>0</sup>С [25,42].

При зневоднюванні шкоринки частина води (близько 50%) випаровується в навколишнє середовище, а частина переходить у м'якушку в результаті термовологопровідності під впливом температурного градієнта [67]. Вологість м'якушки в результаті переміщення води із шкоринки підвищується на 1,5...2,5%. Вологість шкоринки до кінця випікання становить усього 5-7%, тобто шкоринка практично зневоднюється.

У поверхневому шарі заготовки і у шкоринці відбуваються наступні процеси: клейстеризація крохмалю, денатурація білків і видалення води [5].

При випіканні всередині тістової заготовки знищується бродильна мікрофлора, змінюється активність ферментів, відбувається клейстеризація

крохмалю і теплова денатурація білків, змінюється вологість і температура внутрішніх шарів тіста – хліба [117].

Зміна стану крохмалю разом зі змінами білкових речовин є основним процесом, що перетворює тісто в хлібну м'якушку; відбуваються вони майже одночасно. Крохмальні зерна при температурі 55-60<sup>0</sup>С і вище клейстеризуються. У зернах крохмалю утворюються тріщини, у які проникає волога, від чого вони значно збільшуються в об'ємі. Під час клейстеризації крохмаль поглинає як вільну вологу тіста, так і вологу, виділену денатурованими білками. Клейстеризація крохмалю відбувається при малій кількості вологи (для повної клейстеризації вологи в тісті повинно бути в 2-3 рази більше). Через брак вологи клейстеризація крохмалю йде повільно і закінчується тільки при нагріванні центрального шару тіста-хліба до температури 96-98<sup>0</sup>С.

Зміна стану білкових речовин починається при температурі 50-70<sup>0</sup>С і закінчується при температурі близько 90<sup>0</sup>С. Білкові речовини в процесі випікання піддаються теплової денатурації. При цьому вони ущільнюються і виділяють вологу, поглинену ними при утворенні тіста. Денатуровані білки фіксують пористу структуру м'якушки і форму виробу. У виробі утвориться білковий каркас скріплений клейстеризованим крохмалем, у який вкраплені зерна набряклого крохмалю (рис.2.5).

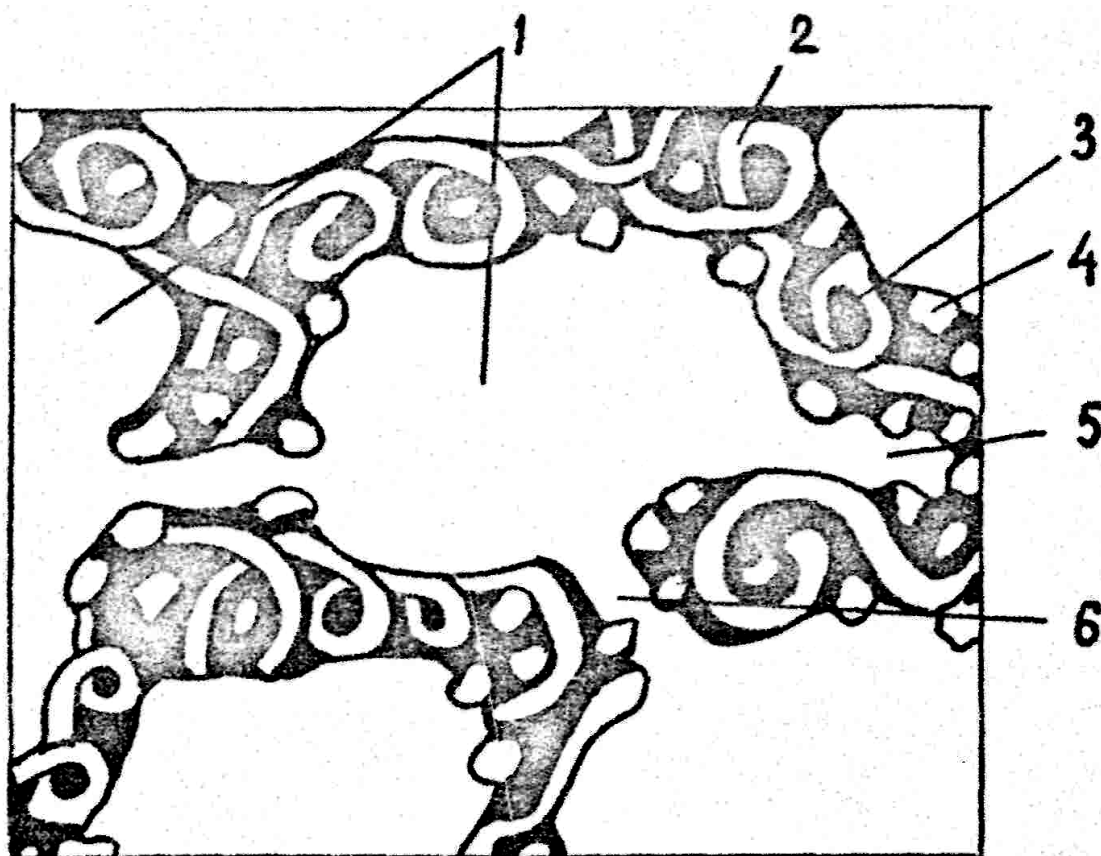


Рис.2.5. Структура хлібної м'якушки:

1 – пори; 2 – денатуровані глобули білка; 3 – клейстеризований крохмаль; 4 – набряклі зерна крохмалю; 5 – ненаскрізний капіляр; 6 – наскрізний капіляр

Процес вистужування хліба досліджений [54] за допомогою діелектрометричної перетворювальної комірки за різних температур навколишнього середовища (20<sup>0</sup>С, 25<sup>0</sup>С, 30<sup>0</sup>С, 35<sup>0</sup>С). Отримана крива залежності вимірюваної вологості від зниження температури готового хліба має чотири характерних ділянки (рис.2.6). На ділянці 1 різко зменшується вологість протягом короткого проміжку часу. При температурі 75-85<sup>0</sup>С її падіння вповільнюється (ділянка 2), потім вимірювана вологість росте (ділянка 3). На ділянці 4 її збільшення припиняється, вологість стабілізується, досягаючи проміжного значення між початковим і мінімальним (на ділянці 2).

З урахуванням того, що виміри проводились діелектрометричним *F*-метром, що реагує на вільну вологу, можна привести наступне пояснення цієї залежності. Ділянка 1 характеризується інтенсивним зв'язуванням води компонентами хліба при зниженні температури. Ділянка 2 характеризується квазірівноважним станом (при зниженні температури, зв'язування вільної води усередині м'якушки і поглинання води шкоринкою із навколишнього повітря). Ділянка 3 відбиває переміщення вільної води із центральної частини хліба до його периферійної області під впливом градієнта температури (кількість переданої вільної води перевищує кількість зв'язаної адсорбційно вологою). На ділянці 4 температура хліба стабілізується на рівні температури навколишнього середовища, температурний градієнт, під впливом якого відбувалося переміщення вільної води в м'якушці, відсутній, співвідношення вільної і зв'язаної води стабілізується.

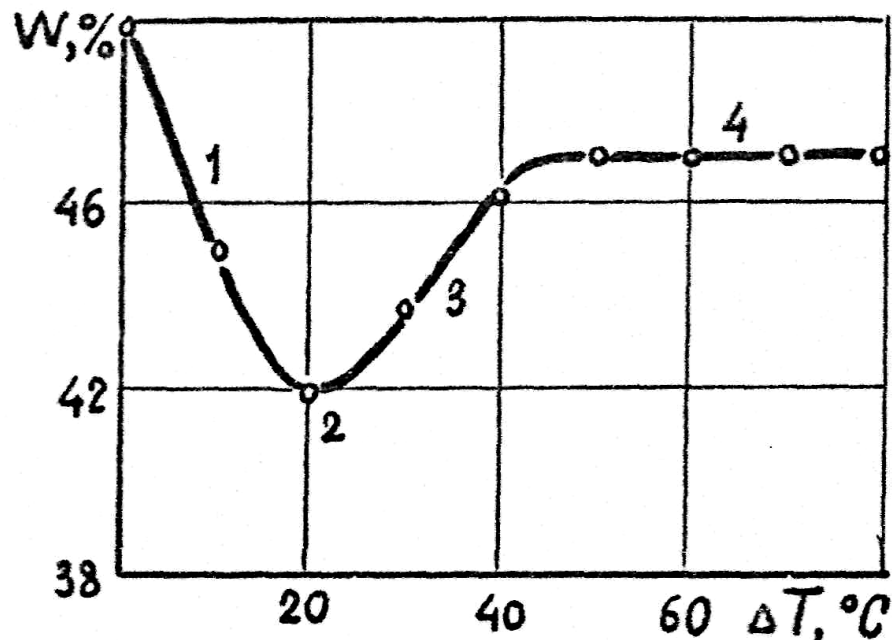


Рис.2.6. Залежність вимірюваної вологості від зниження температури готового хліба

## 2.2. Діелектричні властивості вологих капілярно-пористих харчових матеріалів

В залежності від будови молекул різні діелектрики поділяються на дві групи речовин: неполярні (інертні гази  $F_2$ ,  $CH_4$  і ін.) та полярні (вода, спирти). Під впливом зовнішнього електричного поля відбувається поляризація і тих і інших.

Всі види поляризації можна звести до двох: деформаційної і орієнтаційної.

При деформаційній поляризації заряди поляризованих мікрооб'єктів зміщуються тільки в напрямку прикладеного поля. Такий вид поляризації характерний для неполярних діелектриків.

При орієнтаційній поляризації заряди також зміщуються в напрямку, перпендикулярному прикладеному полю. Це відбувається внаслідок повороту існуючих хаотично постійних диполів, з яких складається речовина полярних діелектриків. Таким чином, орієнтаційна поляризація характерна для полярних діелектриків.

Деформаційна поляризація може бути електронною, атомною і міграційною. При електронній поляризації відбувається зсув електронної хмарки атома і іона відносно ядра. Зазвичай цей зсув на декілька порядків менший радіуса атома. Електронна поляризованість пропорційна об'єму електронної хмарки атома.

При атомній поляризації відбувається зсув атомів або іонів, що складають молекулу, відносно одного. Атомна поляризованість складає, зазвичай, 5-10% від електронної [17].

При міграційній поляризації дипольний момент утвориться внаслідок переміщення вільних іонів і електронів на обмежені відстані, які значно перевищують розміри молекул. При цьому одні доходять до електродів перетворювача, а інші ні, та й розряджаються на електродах також не всі. Причиною обмеженого переміщення зарядів є наявність у капілярно-пористих речовинах поверхонь розподілу, а також мала швидкість розряду іонів на електродах. Цей вид поляризації при наявності сильно провідних компонентів може бути переважним.

Особливу зацікавленість викликає орієнтаційна або дипольна поляризація, оскільки об'єктом контролю є вологі матеріали. Полярні діелектрики мають асиметричні молекули, центри додатних і від'ємних зарядів яких не збігаються. Такі молекули представляють собою постійний диполь. Під час відсутності зовнішнього електричного поля всі диполі знаходяться в хаотичному тепловому русі і сумарний дипольний момент дорівнює нулю. Під впливом зовнішнього електричного поля диполі орієнтуються в напрямку поля і діелектрик здобуває деякий дипольний момент. Ступінь орієнтації залежить від енергії прикладеного поля і енергії теплового руху диполів.

Повна поляризація капілярно-пористих колоїдних матеріалів  $\Pi$  складається з електронної  $\Pi_e$ , атомної  $\Pi_a$  і орієнтаційної  $\Pi_0$ :

$$\Pi = \Pi_e + \Pi_a + \Pi_0. \quad (2.1)$$

При цьому складові  $P_e$  і  $P_a$  виникають під час впливу на діелектрик електричного поля високої частоти, на більш низьких частотах

$$P \approx P_0. \quad (2.2)$$

Діелектричні властивості матеріалів широко використовуються для визначення багатьох їхніх фізичних параметрів. При цьому про стан досліджуваних об'єктів судять за їхніми діелектричною проникністю і тангенсом кута діелектричних втрат [45,90].

Відносна діелектрична проникність показує, у скільки разів збільшується вихідна ємність чутливого елемента при внесенні в його електродну систему досліджуваного матеріалу

$$\varepsilon = \frac{C_1}{C}, \quad (2.3)$$

де  $C$  – вихідна ємність перетворювача;

$C_1$  – ємність перетворювача з досліджуваним матеріалом.

Відомо [45], що відносна діелектрична проникність – комплексна величина, значення якої залежить від перерахованих раніше поляризаційних складових:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon'$  – дійсна частина відносної діелектричної проникності;

$\varepsilon''$  – уявна частина відносної діелектричної проникності.

Це говорить про те, що матеріал у перетворювачі набуває властивості не тільки реактивної, але й активної провідності. Під впливом змінної напруги в досліджуваному матеріалі, який розміщений в чутливому елементі, виникає струм

$$I = \frac{\dot{U}_m}{\underline{X}_{C1}} = \frac{\dot{U}_m}{\frac{1}{j\omega(\varepsilon C)}} = \dot{U}_m j\omega C \varepsilon = \dot{U}_m j\omega C (\varepsilon' - j\varepsilon'') = \dot{U}_m \omega C \varepsilon'' + j\dot{U}_m \omega C \varepsilon', \quad (2.5)$$

де  $\dot{U}_m$  – комплексна амплітуда змінної напруги, прикладеної до електродів чутливого елемента;

$\underline{X}_{C1}$  – комплексний опір чутливого елемента;

$\omega$  – кутова частота прикладеної напруги.

У виразі (2.5) перший доданок - струм активних втрат, що перебуває у фазі із прикладеною напругою. Цей струм викликає нагрівання матеріалу і обумовлений його активною провідністю:

$$G = \omega C \varepsilon''. \quad (2.6)$$

Другий доданок - це струм зсуву, що протікає в реактивній провідності ємнісного характеру:

$$Y = \omega C \varepsilon'. \quad (2.7)$$

Таким чином,  $\varepsilon'$  є коефіцієнтом, що характеризує ступінь збільшення ємності чутливого елемента під впливом вологи досліджуваного матеріалу, а  $\varepsilon''$  характеризує втрати в діелектрику.

Складової комплексної діелектричної проникності і тангенс кута діелектричних втрат зв'язані між собою наступною залежністю [17]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (2.8)$$

Модуль діелектричної проникності

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2}. \quad (2.9)$$

Використовуючи (2.8) і (2.9) можна знайти дійсну частину діелектричної проникності:

$$\begin{aligned} \varepsilon'' &= \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta; \\ \varepsilon &= \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta)^2} = \sqrt{(\varepsilon')^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}; \\ \varepsilon^2 &= (\varepsilon')^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \delta); \quad (\varepsilon')^2 = \frac{\varepsilon^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \\ \varepsilon' &= \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Дійсна і уявна частини діелектричної проникності полярних рідин, до яких відноситься і вода, залежать від частоти (рис.2.7) [90].

В області низьких частот постійні диполі вологи встигають рухатись за змінним полем. В області частот від  $f_1$  до  $f_2$  де  $\varepsilon'$  починає зменшуватися, диполі не встигають за полем. В області більш високих частот при  $f > f_2$  орієнтаційна поляризація зникає і залишається лише повільно змінна поляризація зсуву.

Для багатоконпонентних сумішей, якими є капілярно-пористі харчові матеріали, характер цих залежностей значно складніший, вони містять кілька дисперсійних ділянок. Як правило, такі залежності визначаються експериментальним шляхом.

Електричні параметри капілярно-пористих харчових матеріалів сильно залежать від вологості. За структурою їх можна в першому наближенні віднести до трикомпонентних сумішей, тобто сумішей сухої речовини, води і повітря. Ці три складові різко відрізняються одна від одної своїми діелектричними параметрами [35]. При відсутності вологи в зневодненому стані капілярно-пористі матеріали і рідкі неполярні і слабкополярні речовини мають дуже низьку діелектричну проникність, наприклад: для зернової маси вона дорівнює 2, для крохмалю – 10, для мінеральних і рослинних масел – 2-3, для тваринних жирів – 3-3,5 [90]. Для води діелектрична проникність приблизно дорівнює 80 (трохи більше або менше цього значення для різних температурних режимів). Таким чином, спостерігається велика відмінність діелектричної проникності води і сухої речовини [66,70,89].

Аналітичне визначення вологісних характеристик  $\varepsilon'(W)$  і  $\operatorname{tg}\delta(W)$  за параметрами сухого матеріалу, води і повітря представляє собою дуже складне завдання, особливо для твердих неоднорідних діелектриків. Типовими представниками таких діелектриків є капілярно-пористі харчові матеріали.

Вода, пов'язана з матеріалом хімічним зв'язком, а також кристалізаційна вода втрачає свої характерні діелектричні властивості [90]. Вплив води на діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат залежить також

від того, яким чином вона розміщена в ньому. Адсорбційно-зв'язана волога, волога дуже тонких капілярів має низьке значення діелектричної проникності (20 і менше). Це пояснюється тим, що рухливість диполів в значній мірі гальмуються силами молекулярного тяжіння.

Таким чином, відносна діелектрична проникність гігроскопічних капілярно-пористих матеріалів змінюється дуже незначно із зростанням процентного вмісту води, оскільки йде процес її адсорбційного зв'язування. Цей процес найчастіше визначає різні результати виміру вологості в різних матеріалах.

На противагу цьому в матеріалах з більшими порами і негігроскопічними речовинами відносна діелектрична проникність росте дуже швидко із збільшенням вмісту води. Перераховані особливості змушують враховувати особливості конкретного капілярно-пористого матеріалу при визначенні його вологості.

Відносна діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат містять інформацію про вологість і можуть служити мірою вологості. Проте більша імовірність досягається при використанні обох інформативних параметрів [56].

Вологісні характеристики матеріалу описуються рівняннями

$$\varepsilon'_W = \varepsilon'_{cm} + \varepsilon'(W), \quad (2.11)$$

$$tg\delta_W = tg\delta_{cm} + tg\delta(W), \quad (2.12)$$

де  $\varepsilon'_{cm}$  – відносна діелектрична проникність абсолютно сухого матеріалу;

$tg\delta_{cm}$  – тангенс кута діелектричних втрат абсолютно сухого матеріалу;

$\varepsilon'(W)$  – функціональна залежність відносної діелектричної проникності від вмісту води в матеріалі;

$tg\delta(W)$  – функціональна залежність тангенса кута діелектричних втрат від вмісту води в матеріалі.

Як правило, ці залежності носять нелінійний характер і можуть бути апроксимовані лінійною функцією тільки на дуже невеликих ділянках (при  $\Delta W = 5...10\%$ ). У більшості матеріалів  $\varepsilon'$  і  $tg\delta$  збільшуються із зростанням вологості швидше, ніж за лінійним законом.

Частотні характеристики залежать від неоднорідностей внутрішнього поля досліджуваних матеріалів, обумовлених розходженням електричних властивостей їхніх компонентів. Вплив частоти на електричні параметри неоднорідного діелектрика визначається її неоднокровим впливом на різні види поляризації в діелектрику. При підвищенні частоти втрати, пов'язані із внутрішньосаровою поляризацією, прямують до нуля. В області низьких частот у більшості матеріалів спостерігається значний ріст  $tg\delta$  і залежність  $tg\delta(f)$  при наскрізній провідності близька до гіперболічної – з підвищенням частоти  $tg\delta$  зменшується [17,90] (рис.2.8).

У більшості вологих матеріалів спостерігається плавне зменшення  $\varepsilon'$  [38].

Найважливішим з факторів, що впливають на характер частотних кривих, є вологість матеріалу, тому доцільно розглядати частотно-вологісні характеристики, тобто сімейства кривих  $\varepsilon'(f)$  і  $\text{tg}\delta(f)$  для різних значень вологості (рис.2.9, 2.10). Як видно з даних рисунків частотні залежності  $\varepsilon'(f)$  і  $\text{tg}\delta(f)$  зі збільшенням вологості мають більший кут нахилу. Як правило, при низьких вмістах вологи зміна частоти майже не впливає на  $\varepsilon'$  і  $\text{tg}\delta$ . При підвищенні частоти залежності  $\varepsilon'(f)$  і  $\text{tg}\delta(f)$  стають менш чутливими до вимірів вологості, тому необхідно використовувати ділянку характеристик між частотами  $f_1$  і  $f_2$ , що визначається експериментально для конкретного матеріалу.

### 2.3. Експериментальні дослідження діелектричних параметрів об'єкта контролю

Аналізуючи сімейство характеристик  $\varepsilon'(f)$  і  $\text{tg}\delta(f)$  для хліба з різною вологістю, можна відзначити, що нахил їх у значній мірі залежить від вологості. Значення  $\varepsilon'$  і  $\text{tg}\delta$  отримані шляхом дослідження зразків хліба, розміщених у ємнісний чутливий елемент, за допомогою аналізатора добротності ВМ-560. Повна вологість зразків хліба визначається арбітражним термогравіметричним методом. Як видно з рис.2.11 і 2.12 найбільша чутливість до повної вологості при задовільній лінійності характеристик проявляється в частотному діапазоні 1-5 МГц. В якості об'єкта досліджень був обраний хліб подовий і формовий, як капілярно-пористий матеріал із більшими втратами і нестабільною пористістю.

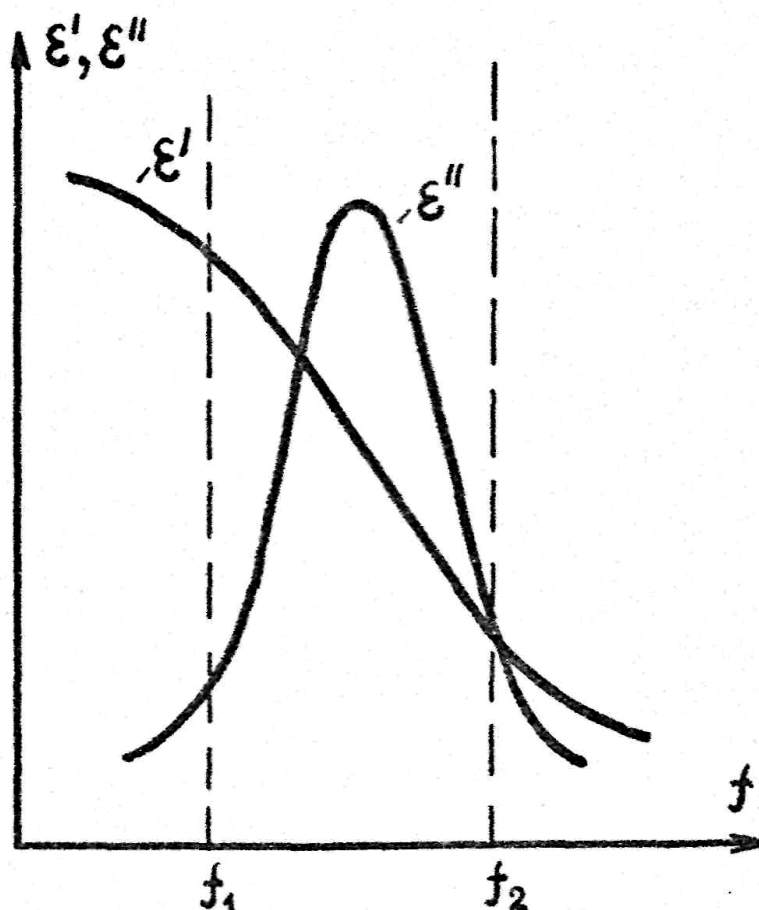




Рис.2.7. Частотні залежності дійсної і уявної частин відносної діелектричної проникності

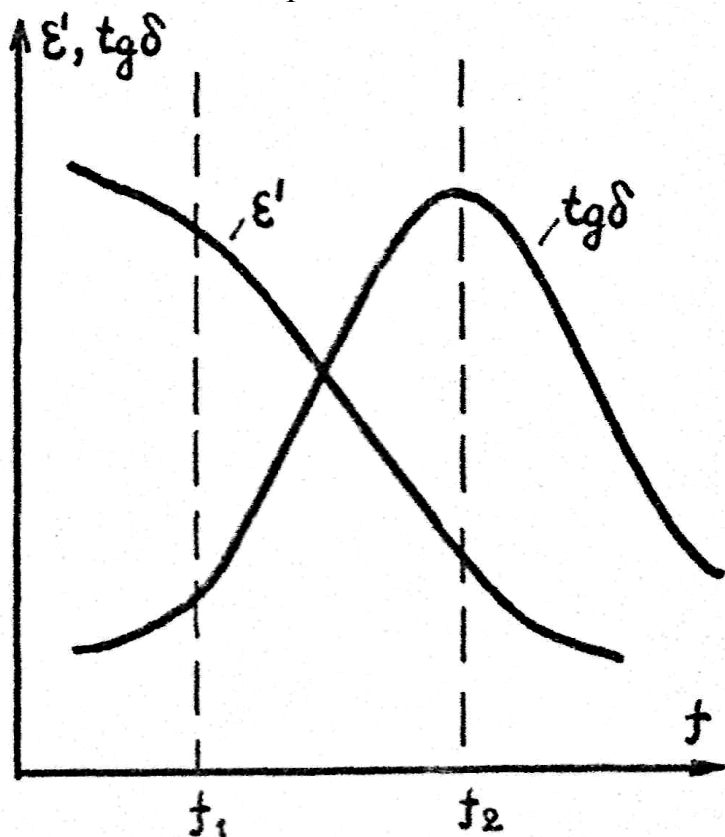


Рис.2.8. Частотні залежності дійсної частини відносної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат

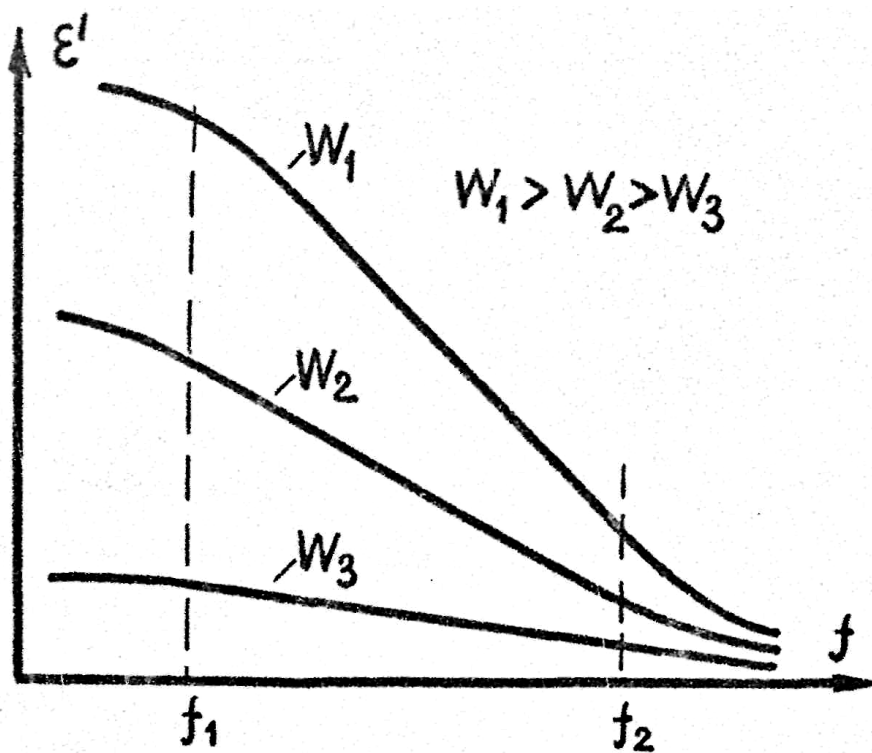


Рис.2.9. Частотні залежності дійсної частини відносної діелектричної проникності при різних вологостях капілярно-пористого матеріалу

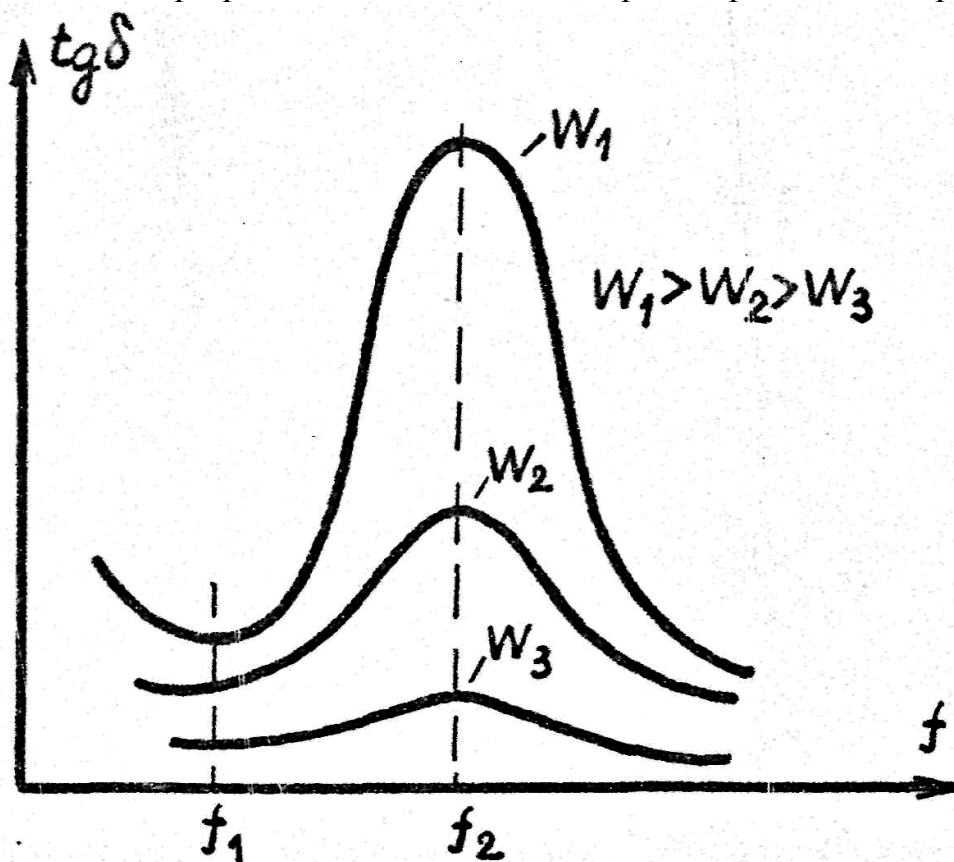


Рис.2.10. Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат при різних вологостях капілярно-пористого матеріалу

Вимірюючи додатково напругу на чутливому елементі і використовуючи вираз (2.7) і (2.10), можна визначити модуль ємнісної складової  $I_C$  його струму:

$$I_C = U\omega C\epsilon', \quad (2.13)$$

який пропорційний реактивній провідності  $b$ .

Температура готового хліба відразу після випікання становить 95-110<sup>0</sup>С і її зниження відбувається дуже повільно через поганий теплообмін між внутрішньою частиною і навколишнім середовищем. Поганий теплообмін пояснюється наявністю в хлібі сухої зневодненої шкоринки і пористого підшкоринкового шару, збідненого вологою. Підвищена температура, значення якої вимірюється ртутним лабораторним термометром, введеним у центральну частину хліба, впливає на діелектричні характеристики хлібної м'якушки, оскільки сприяє частковому вивільненню зв'язаної води.

Повне дослідження діелектричних властивостей м'якушки хліба неможливо без врахування його пористості, яка визначає ступінь просторового розподілу води і тому також у значній мірі впливає на діелектричні властивості хліба.

Пористість визначалася стандартним методом за вагою зразка постійного об'єму.

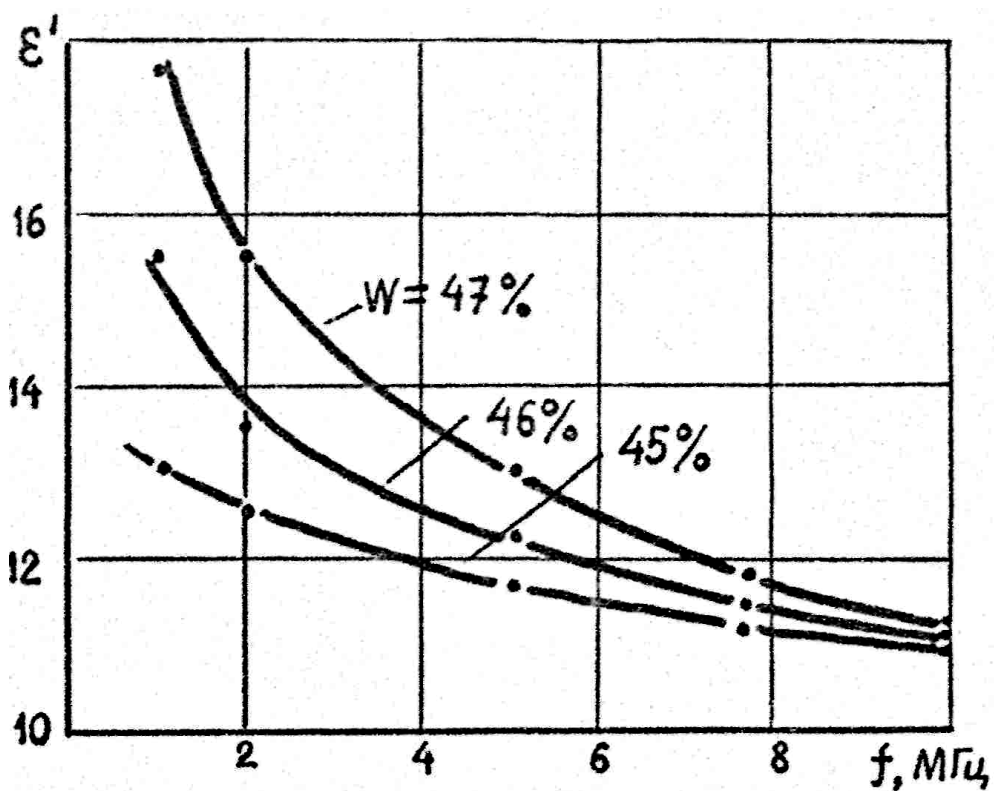


Рис.2.11. Знаходження частотних характеристик дійсної частини відносної діелектричної проникності дослідного зразка

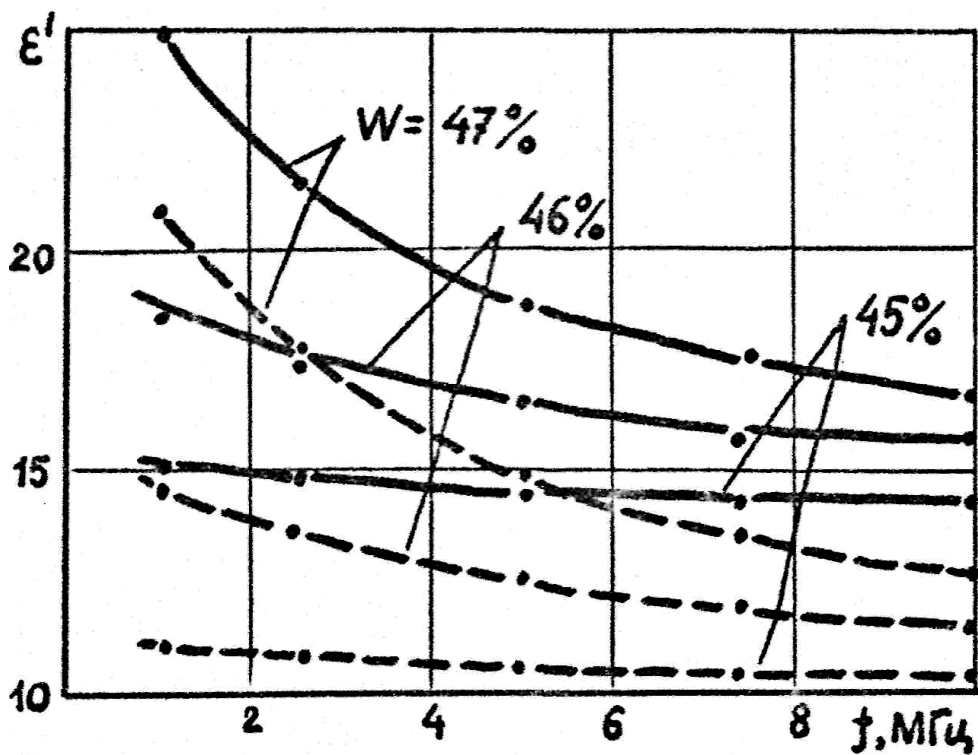


Рис. 2.12. Знаходження частотних характеристик дійсної частини відносної діелектричної проникності цільного дослідного зразка і його частини:

————— – цілий хліб;  
----- – половина хліба.

Досліджуючи сімейство характеристик  $\varepsilon'(f)$  при різній вологості цілого хліба і його половинки, можна зробити висновок, що відбувається паралельне перенесення характеристики по осі ординат донизу, а кут нахилу, характерний для даної вологості хліба, зберігається (рис.2.12).

Таким чином, кут нахилу залежності  $\varepsilon'(f)$  може бути інформативним параметром при контролі вологості хліба і булочних виробів (оскільки вони мають пористу структуру). Причому очевидно, що даний інформативний параметр інваріантний до мінливості об'єму і маси досліджуваного матеріалу [75].

Значні похибки при визначенні вологості капілярно-пористих речовин виникають через діелектричні втрати. Рис.2.13 і 2.15 ілюструють розходження залежностей  $\varepsilon(f)$  і  $\varepsilon'(f)$ . Залежність  $\varepsilon(f)$  має значну нелінійність, викликану діелектричними втратами, залежність  $\varepsilon'(f)$ , що характеризує струми зсуву, пропорційні вологості, є більше лінійною і кут її нахилу може бути використаний для визначення вологості.

На рис.2.15 також показані залежності  $I_C(f)$  при різних вологостях. Кут їхнього нахилу також змінюється зі зміною вологості досліджуваного матеріалу.

На рис.2.14 і 2.16 представлені частотні залежності  $tg\delta$  хліба подового і формового для різних значень повної вологості. У частотному діапазоні 1-5 МГц відбувається різке збільшення діелектричних втрат, обумовлених наявністю орієнтаційної поляризації. При подальшому збільшенні частоти втрати, пов'язані з орієнтацією диполів вологи зменшуються. Ці характеристики можуть бути використані для аналізу вологості, оскільки кут нахилу їх сильно залежить від вмісту вологи в хлібі.

Гарну чутливість перетворювача можна одержати, використовуючи залежність коефіцієнта діелектричних втрат  $\varepsilon' \cdot tg\delta$  від частоти (рис.2.17). Проте, при вологостях нижче 45% спостерігається значне збільшення нелінійності в робочому діапазоні. Особливу зацікавленість викликають залежності  $I_C$  і  $\varepsilon'$  хліба формового від частоти для різних значень вологості і пористості (рис.2.18). Тут наочно продемонстрована неможливість виміру вологості діелектрометричним методом на одній частоті, оскільки на результат сильно впливає нестабільна пористість хліба (чим вища пористість, тим нижча залежність при близьких значеннях вологості). На цих же характеристиках видно, що їх кут нахилу не залежить від пористості.

Рис.2.19 ілюструє вплив температури на  $tg\delta$  хлібної м'якушки при двох різних частотах. На частоті 1 МГц температурний вплив зменшується, а в діапазоні 15...30<sup>0</sup>С є незначним.

Температурний вплив на кут нахилу  $\alpha$  залежності  $\varepsilon'(f)$  в діапазоні 15...30<sup>0</sup>З можна вважати несуттєвим (рис.2.20).

Отримані експериментальні залежності дозволяють зробити висновок про можливість використання високочастотного діелектричного методу для контролю повної вологості капілярно-пористих матеріалів, до яких відноситься хліб і булочні вироби, незважаючи на твердження про незастосовність його для аналізу вологості хліба [72,73].

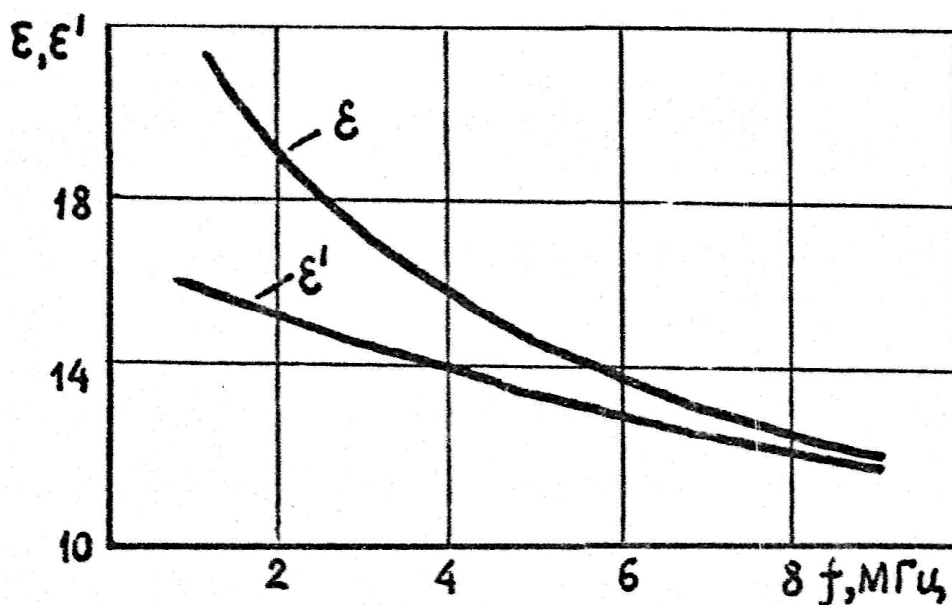


Рис.2.13. Розходження залежностей  $\varepsilon(f)$  і  $\varepsilon'(f)$

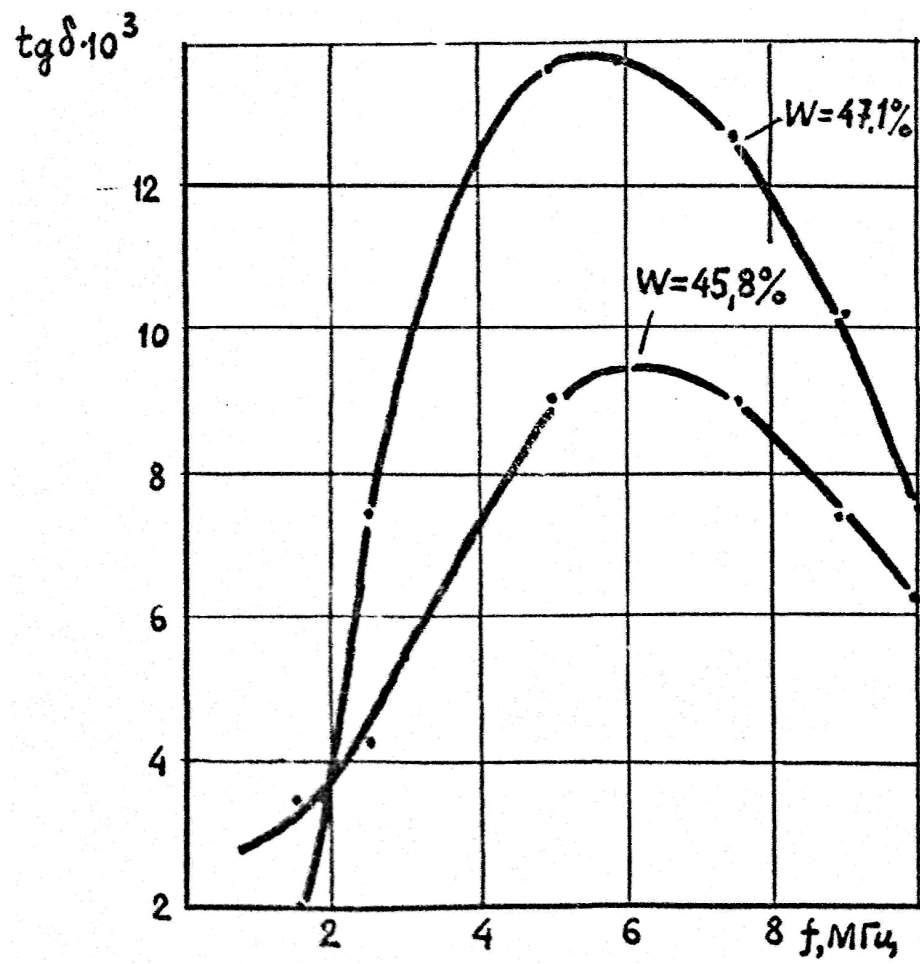


Рис.2.14. Частотні залежності  $\text{tg} \delta$  при різних вологостях

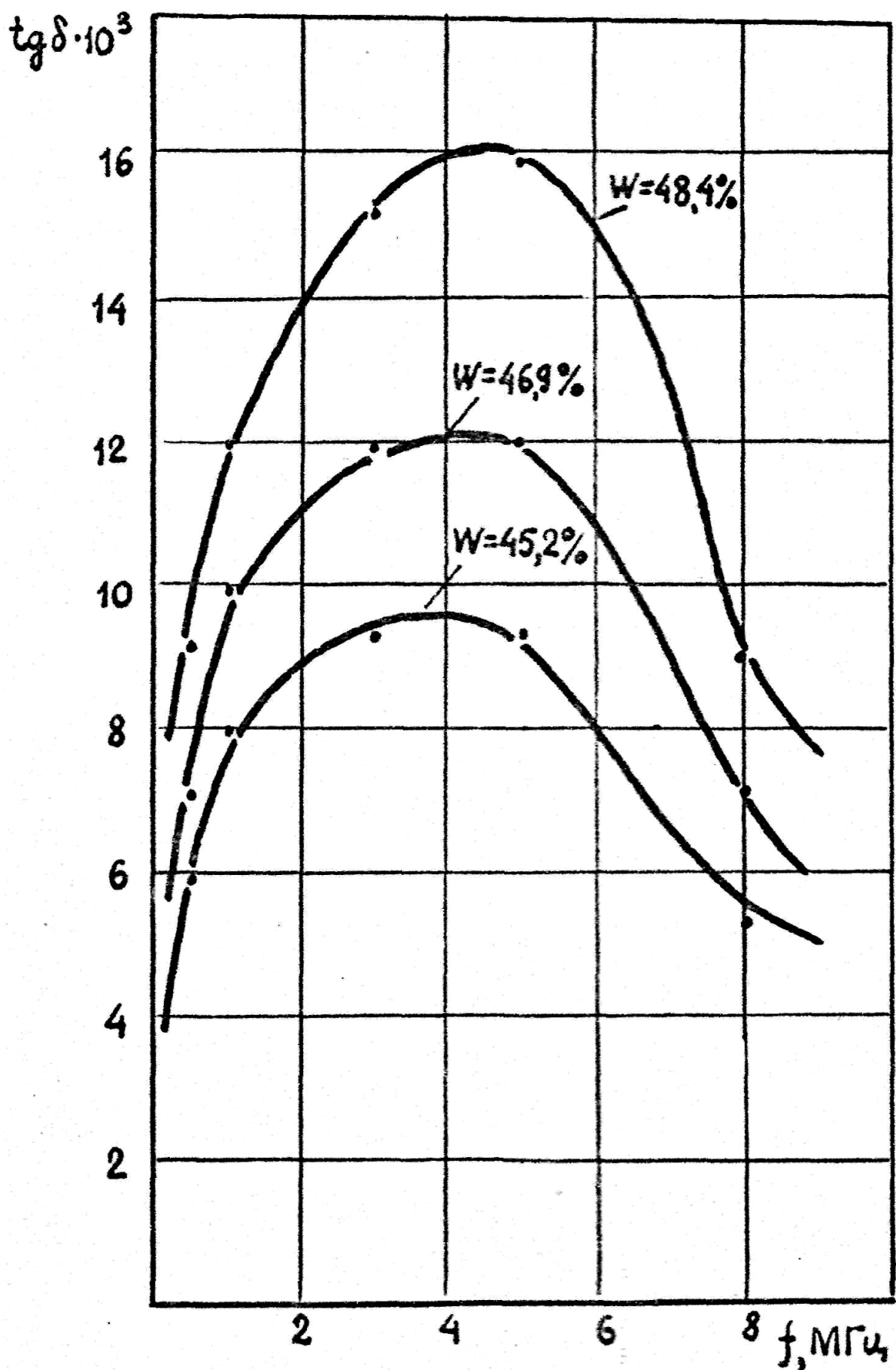


Рис.2.15. Частотні залежності  $\text{tg} \delta$  при різних вологостях

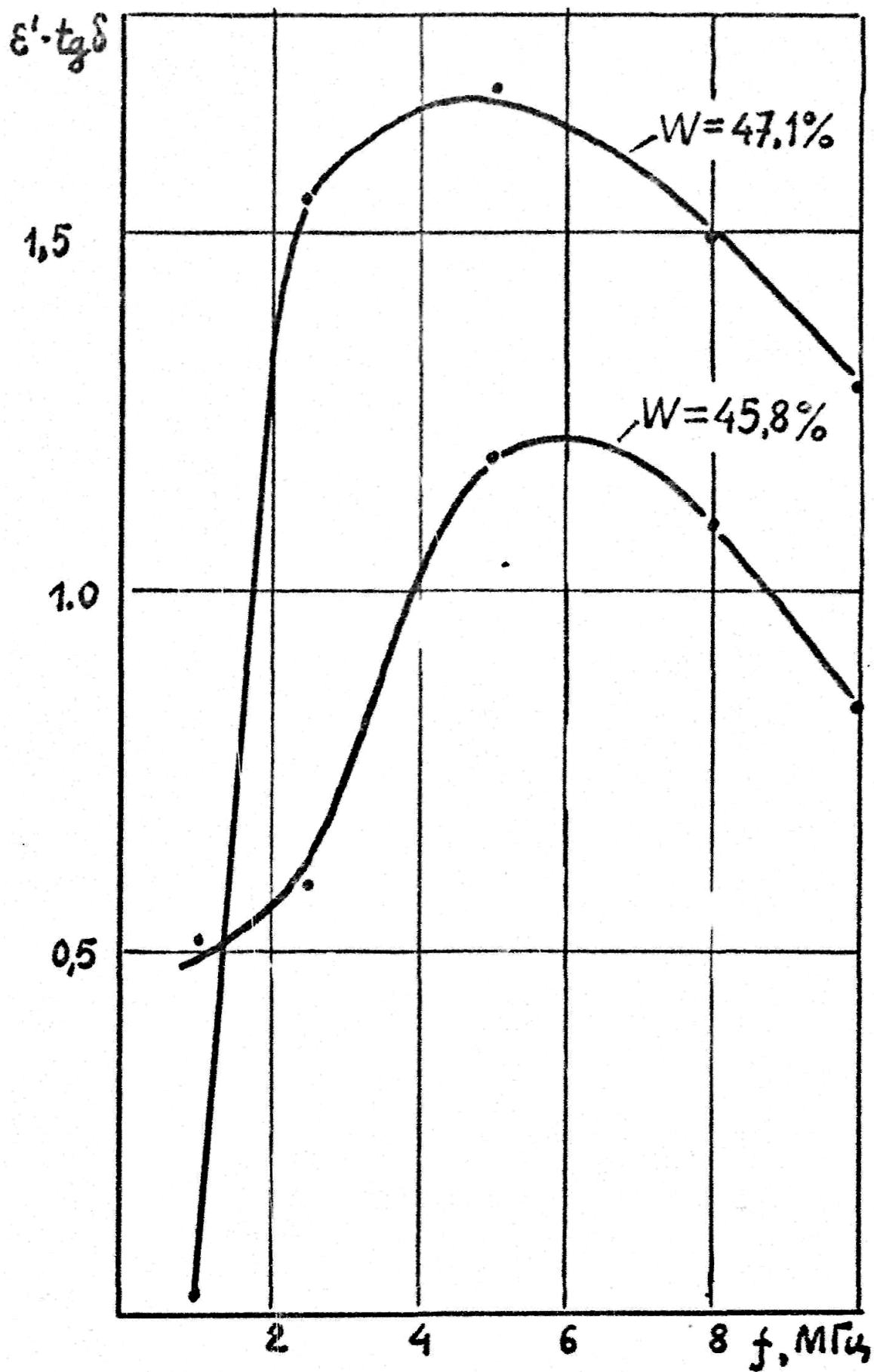


Рис.2.16. Порівняльні частотні залежності коефіцієнта втрат



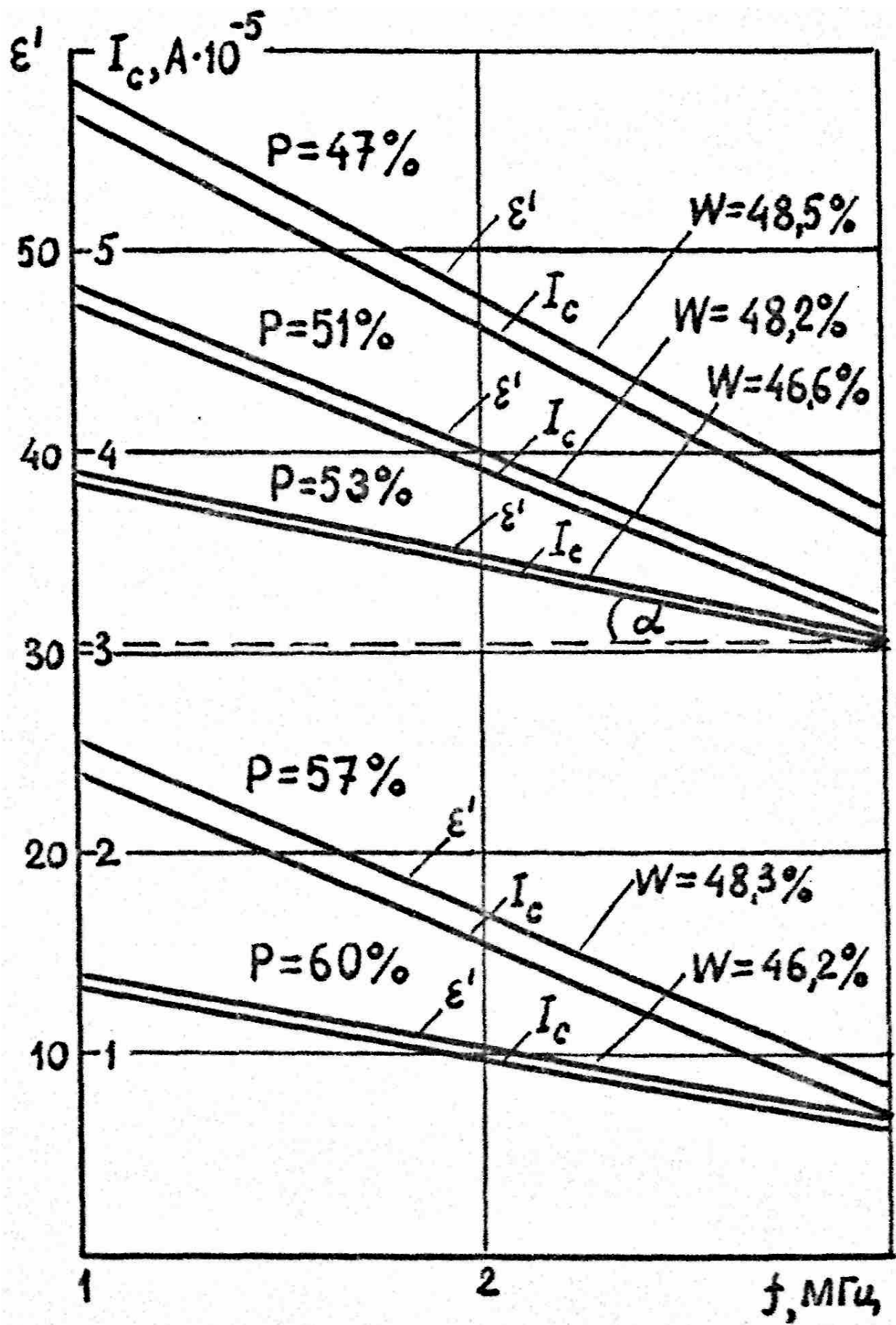


Рис.2.17. Порівняльні частотні залежності  $\epsilon'$  і  $I_c$

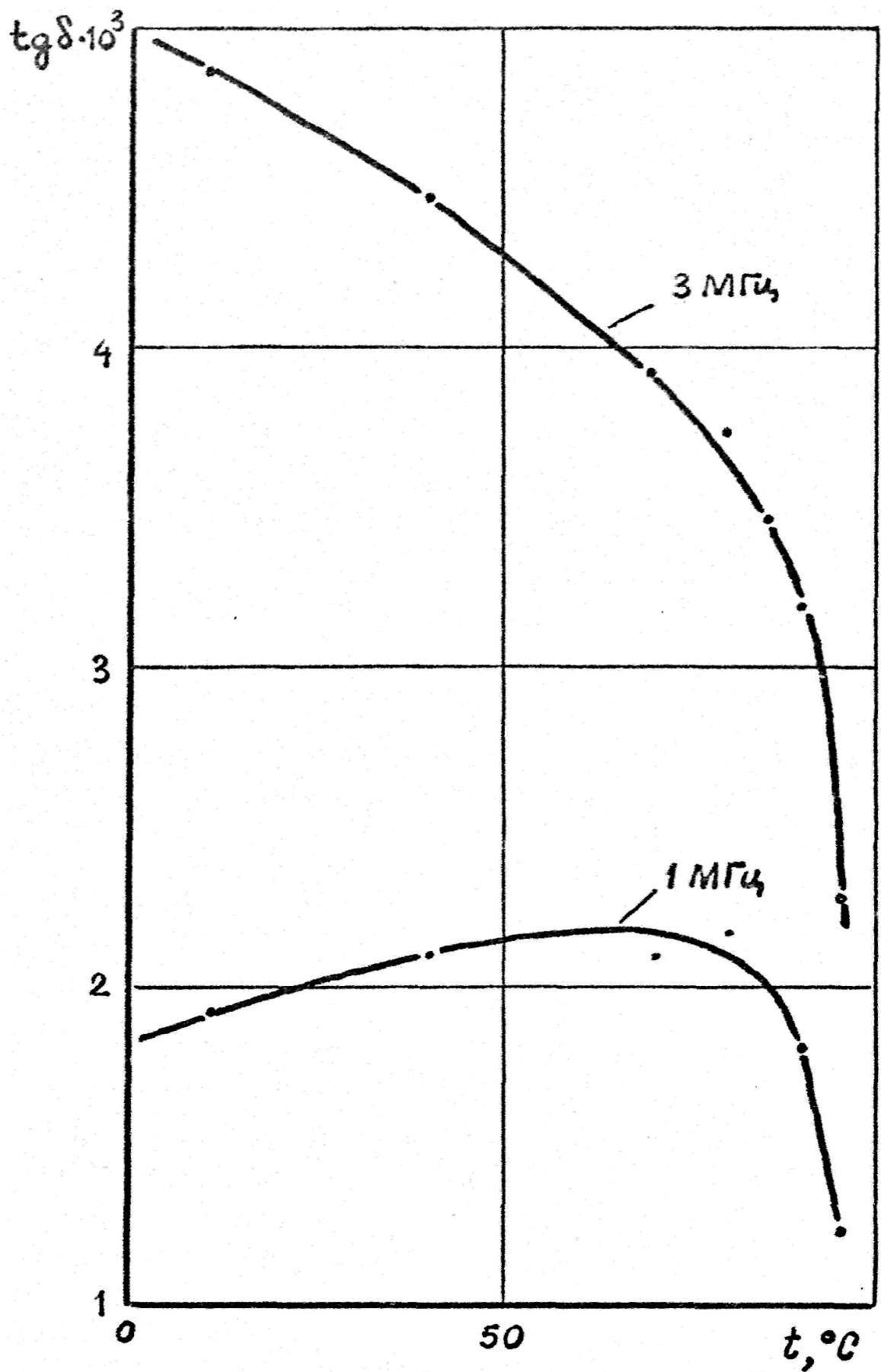


Рис.2.18. Температурні залежності тангенса кута діелектричних втрат капілярно-пористого матеріалу при різних частотах

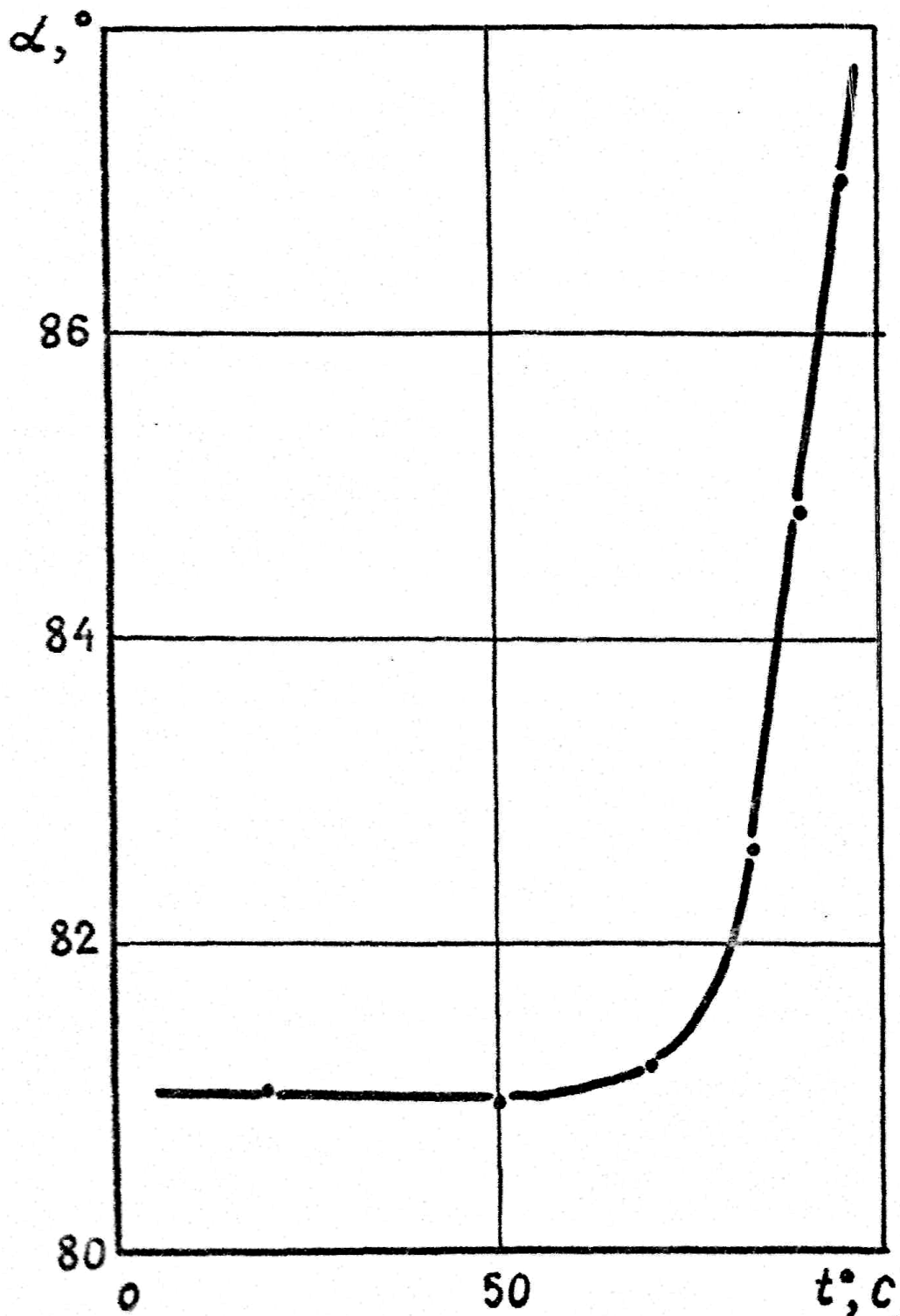


Рис.2.19. Температурна залежність кута нахилу  $\alpha$  залежності  $\varepsilon'(f)$

#### 2.4. Розробка і дослідження електрофізичної моделі об'єкта контролю

При впливі високочастотного електричного поля на досліджуваний матеріал у ньому виникають складні електрофізичні процеси, пов'язані із поляризаційними ефектами і явищем наскрізної провідності. Сумарний ефект цих процесів проявляється в збільшенні ємності чутливого елемента  $C_1$ , що характеризується значенням  $\varepsilon'$ . Сумарний струм, який протікає через елемент із

матеріалом буде комплексною величиною, оскільки складається із активних і реактивних складових [32].

Активні складові представляють собою струми втрат. Оскільки активні втрати в досліджуваному матеріалі складаються із втрат наскрізної провідності і діелектричних втрат, то і активна складова сумарного струму також буде складатися зі струму наскрізної провідності і струму діелектричних втрат. Діелектричні втрати у свою чергу залежать від поляризаційних процесів. Для капілярно-пористих вологих колоїдних матеріалів переважаючими є орієнтаційна і міграційна поляризації (для вільної вологи) та поляризація іонного і електронного зсуву (для адсорбційно-зв'язаної вологи).

Реактивні складові сумарного струму обумовлені перерахованими поляризаційними ефектами.

Таким чином, виходячи з вищевикладеного, приходимо до наступної еквівалентної схеми системи чутливий елемент - досліджуваний капілярно-пористий матеріал (рис.2.21), де  $C$  – вихідна ємність чутливого елемента;  $G_C$  – наскрізна провідність, обумовлена наявністю вільної вологи;  $g$  – провідність втрат при міграційній поляризації;  $C_M$  – ємність міграційної поляризації;  $g_{op}$  – провідність втрат при орієнтованій поляризації;  $C_{op}$  – ємність орієнтаційної поляризації;  $g_a$  – провідність втрат атомного і іонного зсуву;  $C_a$  – ємність атомного і іонного зсуву;  $g_e$  – провідність втрат електронного зсуву;  $C_e$  – ємність електронного зсуву;  $L$  – індуктивність електродів перетворювача;  $G$  – поверхнева провідність електродів перетворювача;  $G_{cm}$  – провідність сухого матеріалу;  $C_{cm}$  – ємність сухого матеріалу.

Дана еквівалентна схема ілюструє основні фізичні процеси в капілярно-пористому матеріалі, але практичного значення не має, оскільки нині неможливо розрахувати її елементи. Зважаючи на те, що індуктивний опір  $X_L$  електродів набагато менший ємнісного опору  $X_C$  чутливого елемента, а послідовна провідність  $G$  набагато менша суми паралельно увімкнених провідностей матеріалу, ними можна знехтувати і узагальнена еквівалентна схема прийме вид двополюсника із паралельним увімкненням еквівалентної провідності втрат і еквівалентної ємності (рис.2.22) [46].

При впливі на чутливий елемент (рис.2.22) змінною напругою  $U$  у нерозгалуженій частині кола виникає струм  $I$ . Перший закон Кірхгофа в комплексній формі для вузла  $a$

$$I = I_G + I_C.$$

Активний  $I_G$  і реактивний  $I_C$  струми чутливого елемента залежать від вологості розміщеного в ньому досліджуваного матеріалу.

Векторна діаграма узагальненої еквівалентної схеми показана на рис.2.23.

Струм втрат у матеріалі має сильну температурну залежність, тому використання його в якості інформативного параметра про наявність вологи недоцільно у вимірювальних системах, які працюють у температурному діапазоні.

Тому основним завданням при контролі вологості є завдання усунення похибки від мінливості діелектричних втрат. Це завдання є актуальним не тільки в хлібопекарській і харчовій промисловостях, але й інших, де необхідно

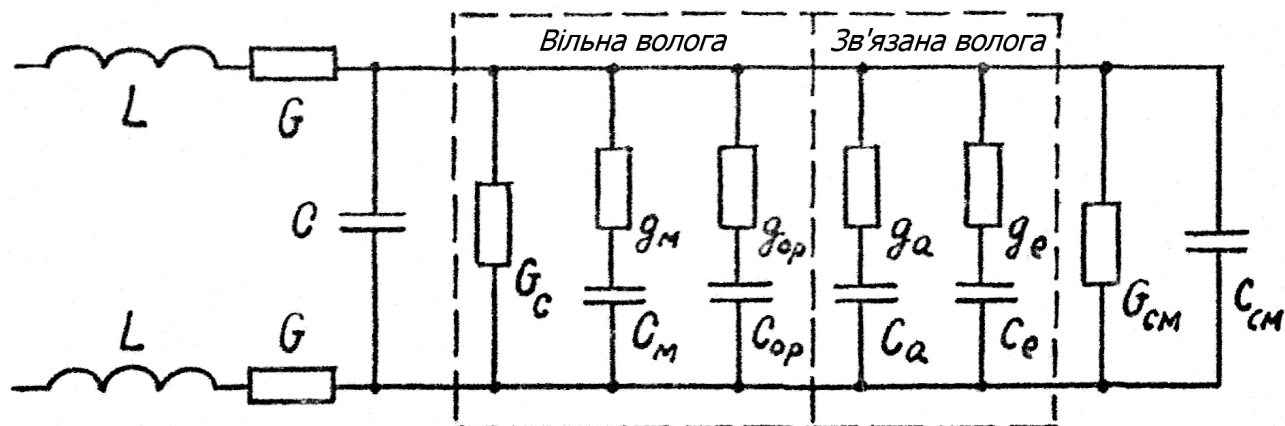


Рис.2.21. Деталізована еквівалентна схема вологого матеріалу

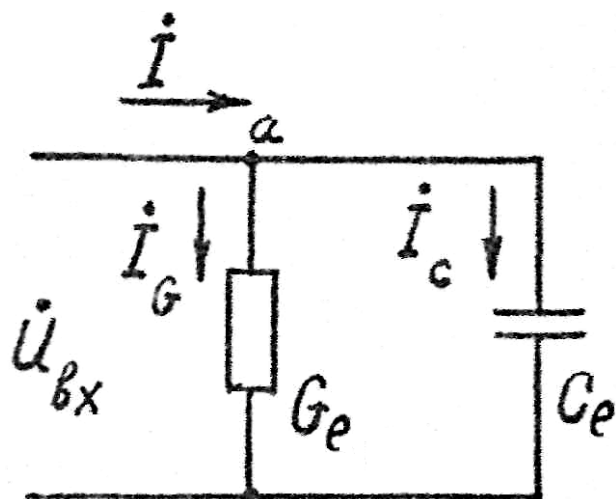


Рис.2.22. Узагальнена еквівалентна схема вологого матеріалу

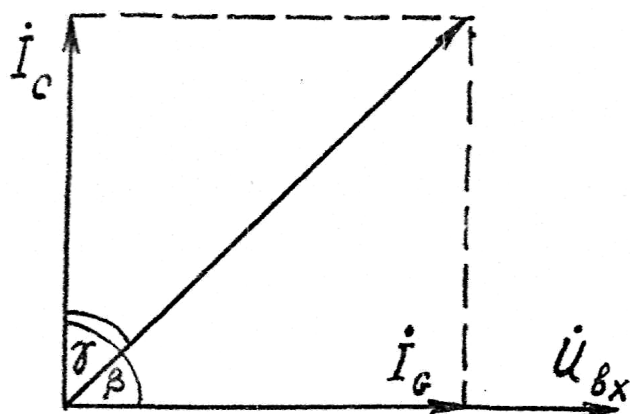


Рис.2.23. Векторна діаграма до рис.2.22

контролювати вологість у капілярно-пористих матеріалах з більшими втратами. Одним з можливих рішень цього завдання є спосіб визначення ємнісного складового струму перетворювача [29,112].

Апаратно виміряна відносна діелектрична проникність  $\epsilon$  системи (рис.2.22) є модулем комплексної діелектричної проникності  $\epsilon$  і, як видно з (2.9), залежить від  $\epsilon''$ , що, як було зазначено раніше, пропорційна втратам у матеріалі. Отже, використання  $\epsilon$  в якості інформативного параметру при контролі вологості пов'язане зі значними похибками. Щоб уникнути цього, необхідно визначати  $\epsilon'$ , котра залежить від вмісту води і набагато слабкіше пов'язана із заважальним температурним впливом та діелектричними втратами.

Аналіз отриманих результатів показує, що контроль вологості в капілярно-пористих колоїдних матеріалах з постійною масою, пористістю і

формою можуть бути виконані з достатньою точністю при використанні інформативних параметрів  $\varepsilon'$  і  $I_C$ . Проте у такому капілярно-пористому матеріалі як хліб і пористість, і форма, і маса є параметрами непостійними. При цьому виникає значна похибка від мінливості маси і пористості. Якщо масу окремого виду хлібобулочних виробів можна вважати постійною, то пористість може значно змінюватися і залежить від компонентів тіста і режимів технологічного процесу випікання хліба.

Аналізуючи рис.2.18 можна припустити, що незалежним від пористості параметром може бути кут нахилу  $\alpha_\varepsilon$  залежності  $\varepsilon'(f)$ . Використовуючи значення  $\varepsilon'$  на двох частотах  $f_1$  і  $f_2$ , можна записати:

$$\begin{aligned} \alpha_\varepsilon &= \arctg \frac{l_{1\varepsilon} - l_{2\varepsilon}}{l_{2f} - l_{1f}} = \arctg \frac{\frac{\varepsilon'_1}{m_\varepsilon} - \frac{\varepsilon'_2}{m_\varepsilon}}{\frac{\varepsilon'_2}{m_f} - \frac{\varepsilon'_1}{m_f}} = \arctg \frac{\frac{1}{m_\varepsilon}(\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2)}{\frac{1}{m_f}(f_2 - f_1)} = \\ &= \arctg \frac{m_f}{m_\varepsilon} \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{f_2 - f_1}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

де  $l_{1\varepsilon} = \frac{\varepsilon'_1}{m_\varepsilon}$  – масштабоване значення  $\varepsilon'$  на частоті  $f_1$ ;

$l_{2\varepsilon} = \frac{\varepsilon'_2}{m_\varepsilon}$  – масштабоване значення  $\varepsilon'$  на частоті  $f_2$ ;

$m_\varepsilon = 10 \text{ см}^{-1}$  – масштаб по осі  $\varepsilon'$ ;

$l_{1f} = \frac{f_1}{m_f}$  – масштабоване значення частоти  $f_1$ ;

$l_{2f} = \frac{f_2}{m_f}$  – масштабоване значення частоти  $f_2$ ;

$m_f = 1 \frac{\text{МГц}}{\text{см}}$  – масштаб по осі частот;

$\varepsilon'_1$  – значення відносної діелектричної проникності (дійсної частини) на частоті  $f_1$ ;

$\varepsilon'_2$  – значення відносної діелектричної проникності на частоті  $f_2$ .

Другим інформативним параметром може бути кут нахилу  $\alpha_I$  залежності  $I_C(f)$  (рис.2.15, 2.18). За аналогією з (2.14) можна записати:

$$\alpha_I = \arctg \frac{m_f}{m_I} \frac{I_{C1} - I_{C2}}{f_2 - f_1}, \quad (2.15)$$

де  $m_I = 1 \frac{\text{мкА}}{\text{см}}$  – масштаб по осі  $I_C$ ;

$I_{C1}$  – значення ємнісної складової струму чутливого елемента на частоті  $f_1$ ;

$I_{C2}$  – значення ємнісної складової струму чутливого елемента на частоті  $f_2$ .

Третім інформативним параметром, який заслуговує уваги, є  $tg\delta$ , оскільки в обраному частотному діапазоні виявляється значна залежність від вологості (рис.2.14, 2.16).

Таким чином, для виміру вологості хлібобулочних виробів доцільно вибрати діелектрометричний метод і отримані з його допомогою інформативні параметри  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_I$  і  $tg\delta$ .

## 2.5. Дослідження м'якушки хліба за допомогою повного факторного експерименту

У загальному випадку обрані інформативні параметри об'єкта контролю будуть залежати не тільки від вологості, але й від заважальних факторів, істотними з яких є температура навколишнього середовища і пористість.

Отже, кути нахилу  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_I$  залежностей  $\varepsilon'(f)$ ,  $I_C(f)$  і тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta$  будуть функціями змінних:

$$\alpha_I = f(x_1, x_2, x_3); \quad (2.16)$$

$$\alpha_\varepsilon = f(x_1, x_2, x_3); \quad (2.17)$$

$$tg\delta = f(x_1, x_2, x_3), \quad (2.18)$$

де  $x_1$  – вплив температури навколишнього середовища;

$x_2$  – вплив пористості хліба;

$x_3$  – вплив вологості хліба.

Із врахуванням сказаного складаємо таблицю факторів для дворівневого варіювання (дворівневе варіювання обране з міркувань обмеженості діапазону частот 1-3 МГц і діапазону вологостей 45-49%. На таких обмежених ділянках залежності  $\varepsilon'(f)$ ,  $\alpha(f)$  і  $tg\delta(f)$  практично лінійні) [36].

З врахуванням сказаного складаємо таблицю факторів і рівнів їхньої зміни в натуральних і кодованих значеннях (табл.2.1).

Таблиця 2.1.

Впливові фактори і рівні їх зміни

№ п/п	Фактор	Натуральне значення	Кодоване значення
1	Температура навколишнього середовища, °С	30	+1
		10	-1
2	Шпаруватість, %	60	+1
		40	-1
3	Вологість м'якушки, %	49	+1
		45	-1

У результаті маємо випадок трифакторного експерименту із дворівневою зміною  $q = 2$ , при якому одержимо рівняння регресії типу [36]:

$$a = A_0 \cdot x_0 + A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3; \quad (2.19)$$

$$b = B_0 \cdot x_0 + B_1 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + B_3 \cdot x_3; \quad (2.20)$$

$$c = C_0 \cdot x_0 + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3, \quad (2.21)$$

де  $a$  – параметр  $\alpha_I$ ;

$b$  – параметр  $\alpha_\varepsilon$ ;

$c$  – параметр  $tg\delta$ ;

$x_0$  – вплив фіктивного параметра;

$A_0, B_0, C_0$  – значення постійних складових рівнянь регресії (2.19), (2.20) і (2.21).

У таблиці 2.2 представлена матриця плану експерименту, у якій є код фіктивного параметра, що визначає значення постійних складових  $A_0, B_0$  і  $C_0$  рівнянь регресії.

При дворівневому експерименті кількість дослідів

$$n = 2^p, \quad (2.22)$$

де  $p$  – кількість факторів.

Для нашого випадку  $n = 2^3 = 8$ .

Реалізація плану експерименту має на увазі виконання всього 16 дослідів, коли кожен із 8-ми, представлених у таблиці 2.2 виконується двічі. При цьому виходить по два стовпця значень  $a, b$  і  $c$  (табл.2.3).

Таблиця 2.2.

Матриця плану експерименту

№ п/п	Код $x_0$	Код $x_1$	Код $x_2$	Код $x_3$
1	+1	-1	-1	-1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1
5	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1
7	+1	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1	+1



## Результати виконання плану експерименту

№ П/П	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$\bar{a}_i$	$\sigma^2(a_i)$
1	70,02	70,00	70,01	$2 \cdot 10^{-4}$
2	70,04	70,00	70,02	$8 \cdot 10^{-4}$
3	70,63	70,57	70,60	$18 \cdot 10^{-4}$
4	70,60	70,62	70,61	$2 \cdot 10^{-4}$
5	86,98	87,02	87,00	$10 \cdot 10^{-4}$
6	87,03	86,99	87,01	$10 \cdot 10^{-4}$
7	87,64	87,56	87,60	$30 \cdot 10^{-4}$
8	87,59	87,63	87,61	$10 \cdot 10^{-4}$
№ П/П	$b_{i1}$	$b_{i2}$	$\bar{b}_i$	$\sigma^2(b_i)$
1	70,01	69,99	70,00	$2 \cdot 10^{-4}$
2	70,03	69,99	70,01	$8 \cdot 10^{-4}$
3	70,62	70,56	70,59	$18 \cdot 10^{-4}$
4	70,59	70,61	70,60	$2 \cdot 10^{-4}$
5	86,97	87,01	86,99	$10 \cdot 10^{-4}$
6	87,02	86,98	87,00	$10 \cdot 10^{-4}$
7	87,63	87,55	87,59	$30 \cdot 10^{-4}$
8	87,58	87,62	87,60	$10 \cdot 10^{-4}$
№ П/П	$c_{i1}$	$c_{i2}$	$\bar{c}_i$	$\sigma^2(c_i)$
1	6,03	6,00	6,015	$4,5 \cdot 10^{-10}$
2	11,04	11,00	11,02	$8 \cdot 10^{-10}$
3	9,072	9,068	9,070	$0,1 \cdot 10^{-10}$
4	14,048	14,056	14,052	$0,3 \cdot 10^{-10}$
5	23,118	23,138	23,128	$2 \cdot 10^{-10}$
6	28,036	28,050	28,043	$1 \cdot 10^{-10}$
7	31,106	31,120	31,113	$1 \cdot 10^{-10}$
8	36,029	36,013	36,021	$2 \cdot 10^{-10}$

**2.6. Розроблення математичної моделі проби м'якушки хліба**

Використовуючи данні табл.2.3, визначимо значення коефіцієнтів рівнянь (2.19), (2.20) і (2.21), перевіримо однорідність дисперсії експерименту, дамо

статистичну оцінку значимості коефіцієнтів математичної моделі і перевіримо математичну модель на адекватність. Обчислення проведемо із використанням ЕОМ.

Для визначення коефіцієнтів рівнянь (2.19), (2.20) і (2.21) скористаємося відомим методом [2,39]. При цьому їхні значення будуть рівні:

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{0i} \cdot \bar{a}_i}{N} = 78,88; \quad B_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{0i} \cdot \bar{b}_i}{N} = 78,88; \quad C_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{0i} \cdot \bar{c}_i}{N} = 19,81 \cdot 10^{-3};$$

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{1i} \cdot \bar{a}_i}{N} = 0,005; \quad B_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{1i} \cdot \bar{b}_i}{N} = 0,005; \quad C_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{1i} \cdot \bar{c}_i}{N} = 2,46 \cdot 10^{-3};$$

$$A_2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{2i} \cdot \bar{a}_i}{N} = 0,3; \quad B_2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{2i} \cdot \bar{b}_i}{N} = 0,3; \quad C_2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{2i} \cdot \bar{c}_i}{N} = 2,76 \cdot 10^{-3};$$

$$A_3 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{3i} \cdot \bar{a}_i}{N} = 8,5; \quad B_3 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{3i} \cdot \bar{b}_i}{N} = 8,5; \quad C_3 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{3i} \cdot \bar{c}_i}{N} = 9,77 \cdot 10^{-3}.$$

При проведенні експериментів виміри значень функцій відгуків  $a$ ,  $b$  і  $c$  виробляються практично з однаковою точністю, тобто має місце випадок рівноточності відтворення дослідів. Це значить, що дисперсії функцій відгуків у кожному рядку матриці планування однорідні. Щоб переконатися в цьому проведемо перевірку відтворюваності дослідів. Оскільки число паралельних дослідів 2 в кожному рядку однакові, то для цього випадку застосуємо критерій Кохрена [2,39]:

$$G_{ke_a} = \frac{\sigma^2(a_i)_{\max}}{\sum_{i=1}^n \sigma^2(a_i)}, \quad (2.22)$$

$$G_{ke_b} = \frac{\sigma^2(b_i)_{\max}}{\sum_{i=1}^n \sigma^2(b_i)}, \quad (2.23)$$

$$G_{ke_c} = \frac{\sigma^2(c_i)_{\max}}{\sum_{i=1}^n \sigma^2(c_i)}, \quad (2.24)$$

де  $\sigma^2(a_i)$  – порядкова дисперсія інформативного параметра  $a$ ;

$\sigma^2(b_i)$  – порядкова дисперсія інформативного параметра  $b$ ;

$\sigma^2(c_i)$  – порядкова дисперсія інформативного параметра  $c$ .

Порядкові дисперсії  $\sigma^2(a_i)$ ,  $\sigma^2(b_i)$  і  $\sigma^2(c_i)$  для випадку двох паралельних дослідів можуть бути знайдені з виразів [36]:

$$\sigma^2(a_i) = a_{i1}^2 + a_{i2}^2 - 2\bar{a}_i^2, \quad (2.25)$$

$$\sigma^2(b_i) = b_{i1}^2 + b_{i2}^2 - 2\bar{b}_i^2, \quad (2.26)$$

$$\sigma^2(c_i) = c_{i1}^2 + c_{i2}^2 - 2\bar{c}_i^2, \quad (2.27)$$

де  $a_{i1}$  – значення інформаційного параметра  $a$  в  $i$ -ому рядку за першим паралельним дослідом;

$a_{i2}$  – значення інформативного параметра  $a$  в  $i$ -ому рядку за другим паралельним дослідом;

$b_{i1}$  – значення інформативного параметра  $b$  в  $i$ -ому рядку за першим паралельним дослідом;

$b_{i2}$  – значення інформативного параметра  $b$  в  $i$ -ому рядку за другим паралельним дослідом;

$c_{i1}$  – значення інформативного параметра  $c$  в  $i$ -ому рядку за першим паралельним дослідом;

$c_{i2}$  – значення інформативного параметра  $c$  в  $i$ -ому рядку за другим паралельним дослідом.

Експериментальні значення критерію Кохрена із врахуванням (2.25) (2.26) і (2.27) для обох інформативних параметрів

$$G_{ке_a} = 0,33; \quad G_{ке_b} = 0,33; \quad G_{ке_c} = 0,43.$$

Теоретичне значення критерія Кохрена для розглянутого випадку при рівні значимості  $\eta = 0,05$ , числі ступенів волі

$$k = q - 1 = 2 - 1 = 1$$

у числі рядків  $n = 8$  за таблицею [36] маємо:

$$G_{км_{abc}} = \left. \begin{array}{l} \eta = 0,05 \\ k = 1 \\ n = 8 \end{array} \right\} = 0,68.$$

Значення  $G_k$  менше  $G_{км}$ , тому припущення про однорідність дисперсій підтверджується при  $\eta = 0,05$  і двох паралельних дослідів цілком достатньо.

Виконаємо статистичну оцінку значимості коефіцієнтів математичних моделей (2.19), (2.20) і (2.21) з метою виключення другорядних факторів, що незначно впливають на досліджуваний параметр. Для цього скористаємося критерієм Ст'юдента [2,21,30,39]. Необхідні для цього статистичні дані зведені в таблицю 2.4.

Порівняння значень коефіцієнтів рівнянь (2.19), (2.20) і (2.21) зі значеннями половин відповідних їм довірчих інтервалів розкиду показали значимість їх усіх. Тому рівняння (2.19), (2.20) і (2.21) остаточно можна переписати в наступному виді:

$$a = 78,88 + 0,005x_1 + 0,3x_2 + 8,5x_3, \quad (2.28)$$

$$b = 78,88 + 0,005x_1 + 0,3x_2 + 8,5x_3, \quad (2.29)$$

$$c = (19,82 + 2,46x_1 + 2,74x_2 + 9,75x_3) \cdot 10^{-3}, \quad (2.30)$$

Аналіз рис.2.24 і 2.25 показує, що всі три параметри  $\alpha_\varepsilon$ ,  $\alpha_I$  і  $tg\delta$  є однаковою мірою інформативними щодо вологості. Проте  $tg\delta$  виявляє значну залежність від температури навколишнього середовища і пористості, тоді як  $\alpha_\varepsilon$  і  $\alpha_I$  практично не залежать від цих параметрів.

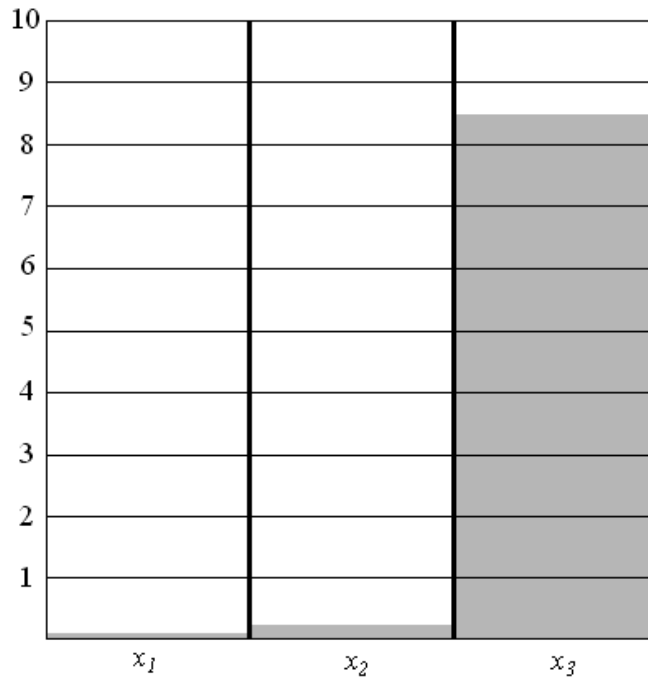


Рис.2.24. Порівняльна діаграма значимості коефіцієнтів математичної моделі (2.28 і 2.29)

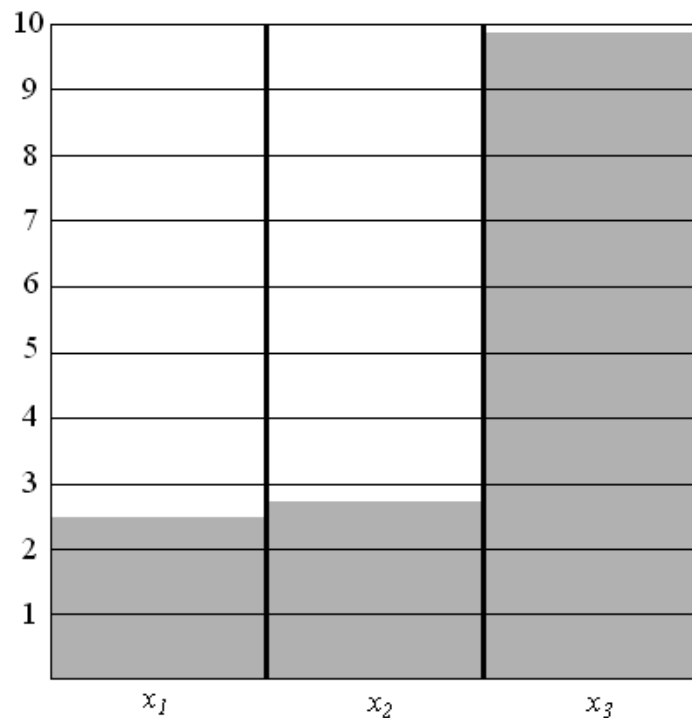


Рис.2.25. Порівняльна діаграма значимості коефіцієнтів математичної моделі (2.30)

Таблиця встановлення значущості коефіцієнтів рівнянь регресії  
(2.19), (2.20) та (2.21)

Коефіцієнт $A_i$	Числове значення коефіцієн- та $A_i$	$n' = nq$	Середнє квадратич- не від- хилення $\sigma(A_i)$	Значення напів- інтервала розкиду коефіцієн- та $\delta = \sigma(A_i) \times$ $\times t(\eta, \kappa_2)$	Порівняння
$A_0$	78,88	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
$A_1$	0,005	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
$A_2$	0,30	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
$A_3$	8,50	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
Коефіцієнт $B_i$	Числове значення коефіцієн- та $B_i$	$n' = nq$	Середнє квадратич- не від- хилення $\sigma(B_i)$	Значення напів- інтервала розкиду коефіцієн- та $\delta = \sigma(B_i) \times$ $\times t(\eta, \kappa_2)$	Порівняння
$B_0$	78,88	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
$B_1$	0,005	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
$B_2$	0,30	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
$B_3$	8,50	16	$2,81 \cdot 10^{-4}$	$5,99 \cdot 10^{-4}$	Значущий
Коефіцієнт $A_i$	Числове значення коефіцієн- та $A_i$	$n' = nq$	Середнє квадратич- не від- хилення $\sigma(A_i)$	Значення напів- інтервала розкиду коефіцієн- та $\delta = \sigma(A_i) \times$ $\times t(\eta, \kappa_2)$	Порівняння
$C_0$	$19,82 \cdot 10^{-3}$	16	$0,56 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-10}$	Значущий
$C_1$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	16	$0,56 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-10}$	Значущий
$C_2$	$2,74 \cdot 10^{-3}$	16	$0,56 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-10}$	Значущий
$C_3$	$9,75 \cdot 10^{-3}$	16	$0,56 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-10}$	Значущий

Таблиця 2.5.

Таблиця встановлення адекватності математичної моделі

№ П/П	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$A_0x_0$	$A_1x_1$	$A_2x_2$	$A_3x_3$	$a_{ij}$
1	+1	-1	-1	-1	78,075	-0,005	-0,2975	-8,4975	70,0075
2	+1	+1	-1	-1	78,8075	+0,005	+0,2975	+8,4975	70,013
3	+1	-1	+1	-1	78,8075	-0,005	-0,2975	-8,4975	70,6025
4	+1	+1	+1	-1	78,8075	+0,005	+0,2975	+8,4975	70,6125
5	+1	-1	-1	+1	78,8075	-0,005	-0,2975	-8,4975	87,0025
6	+1	+1	-1	+1	78,8075	+0,005	+0,2975	+8,4975	87,0125
7	+1	-1	+1	+1	78,8075	-0,005	-0,2975	-8,4975	87,5975
8	+1	+1	+1	+1	78,8075	+0,005	+0,2975	+8,4975	87,6075

Таблиця 2.6.

Таблиця встановлення адекватності математичної моделі

№ П/П	$a_{ij} - \bar{a}_{ei}$	$a_{ij} - a_{eli}$	$a_{ij} - a_{e2i}$	$(a_{ij} - \bar{a}_{ei})^2$	$(a_{ij} - a_{eli})^2$	$(a_{ij} - a_{e2i})^2$
1	-0,0025	-0,0125	0,0075	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$1,5625 \cdot 10^{-4}$	$5,625 \cdot 10^{-5}$
2	-0,007	-0,027	0,013	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$7,29 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$
3	0,0025	-0,0275	0,0325	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$7,5625 \cdot 10^{-4}$	$1,05625 \cdot 10^{-3}$
4	0,0025	0,0125	-0,0075	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$1,5625 \cdot 10^{-4}$	$5,625 \cdot 10^{-5}$
5	0,0025	0,0225	-0,0175	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$5,0625 \cdot 10^{-4}$	$3,0625 \cdot 10^{-4}$
6	0,0025	-0,0175	0,0225	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$3,0625 \cdot 10^{-4}$	$5,0625 \cdot 10^{-4}$
7	-0,0025	-0,0425	0,0375	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$1,8063 \cdot 10^{-3}$	$1,40625 \cdot 10^{-3}$
8	-0,025	0,0175	-0,0225	$6,25 \cdot 10^{-6}$	$3,0625 \cdot 10^{-4}$	$5,0625 \cdot 10^{-4}$

Виходячи із цього можна остаточно визначитися, що інформативними параметрами однаковою мірою можуть служити і  $\alpha_\varepsilon$ , і  $\alpha_I$ , а математичною моделлю може бути і рівняння (2.28), і рівняння (2.29). Оскільки вони практично однакові, можна провести перевірку кожного з них на адекватність (відповідність об'єкту контролю), використовуючи критерій Фішера [2,13,15,21,30,39,40] при заданому рівні значимості  $\eta = 0,05$ . Перевіримо рівняння (2.28). Всі необхідні для цього дані зведені в таблиці 2.5 і 2.6.

Експериментальне значення критерію Фішера береться рівним відношенню дисперсії адекватності (залишкової дисперсії) до загальної дослідної дисперсії (дисперсії відтворюваності):

$$F_e = \frac{\sigma^2(a)_{\text{зал}}}{\sigma^2(a)} = \frac{q \sum_{i=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_{ei})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} - a_{eij})^2} = 0,011,$$

де  $a_{ij}$  – розрахункові порядкові значення функції відгуку;  
 $\bar{a}_{ei}$  – експериментальні порядкові значення функції відгуку;  
 $a_{eij}$  – приватні експериментальні значення функції відгуку;  
 $d = 4$  – число значущих коефіцієнтів моделі;  
 $\kappa_1 = n - d$  – число ступенів волі залишкової дисперсії;  
 $q$  – кількість паралельних дослідів.

Розрахунок  $F_e$  проведений на ЕОМ.

Теоретичне значення критерію Фішера [2,10,16,21,29,39,40] при  $\eta = 0,05$ ,  $\kappa_1 = n - d = 4$ ,  $\kappa_2 = n' - 1 = 15$  становить:

$$F_{\text{теор}} = \left. \begin{array}{l} \eta = 0,05 \\ \kappa_1 = 4 \\ \kappa_2 = 15 \end{array} \right\} = 3,1.$$

Оскільки  $F_e = 0,11 < F_{\text{теор}} = 3,1$  можна вважати, що отримане рівняння регресії (2.28) є математичною моделлю, що є адекватною об'єкту контролю із імовірністю, рівною 0,95, аналогічне твердження можна застосувати і до виразу (2.29).

## 2.7. Вибір і обґрунтування способу реалізації діелектрометричного методу виміру вологості хліба

Частково обраний діелектрометричний метод контролю вологості досить широко використовується для визначення вмісту води різних матеріалів (із переважним вмістом вільної води). Цей метод реалізований у великій кількості пристроїв [4,15,33,44]. Оскільки хліб є капілярно-пористим колоїдним матеріалом, у якому значна частина води перебуває у зв'язаному стані, контроль вологості у цьому випадку пов'язаний із певними складностями.

Інформативними параметрами об'єкта контролю є кути нахилу залежностей  $\varepsilon'(f)$  і  $I_C(f)$ . Значення діелектричної проникності змінюється в діапазоні частот і визначається на частотах, нижчих  $10^5$  Гц, в основному, орієнтаційною поляризацією диполів вільної води. Цей частотний діапазон неефективний, оскільки дозволяє одержувати інформацію про вміст у хлібі тільки вільної води. У діапазоні  $10^5$ - $10^8$  Гц орієнтаційна дипольна

поляризація зменшується (за рахунок інерційності макродиполів), але збільшується поляризація електронного і іонного зсуву, яка характерна для адсорбційно-зв'язаної вологи. У цьому діапазоні можна одержати рівнозначну інформацію про вміст вільної і зв'язаної вологи. Діапазон НВЧ (понад  $10^8$  Гц) характерний відсутністю дипольної поляризації і наявністю переважно деформаційної поляризації всіх складових, що входять у структуру хліба.

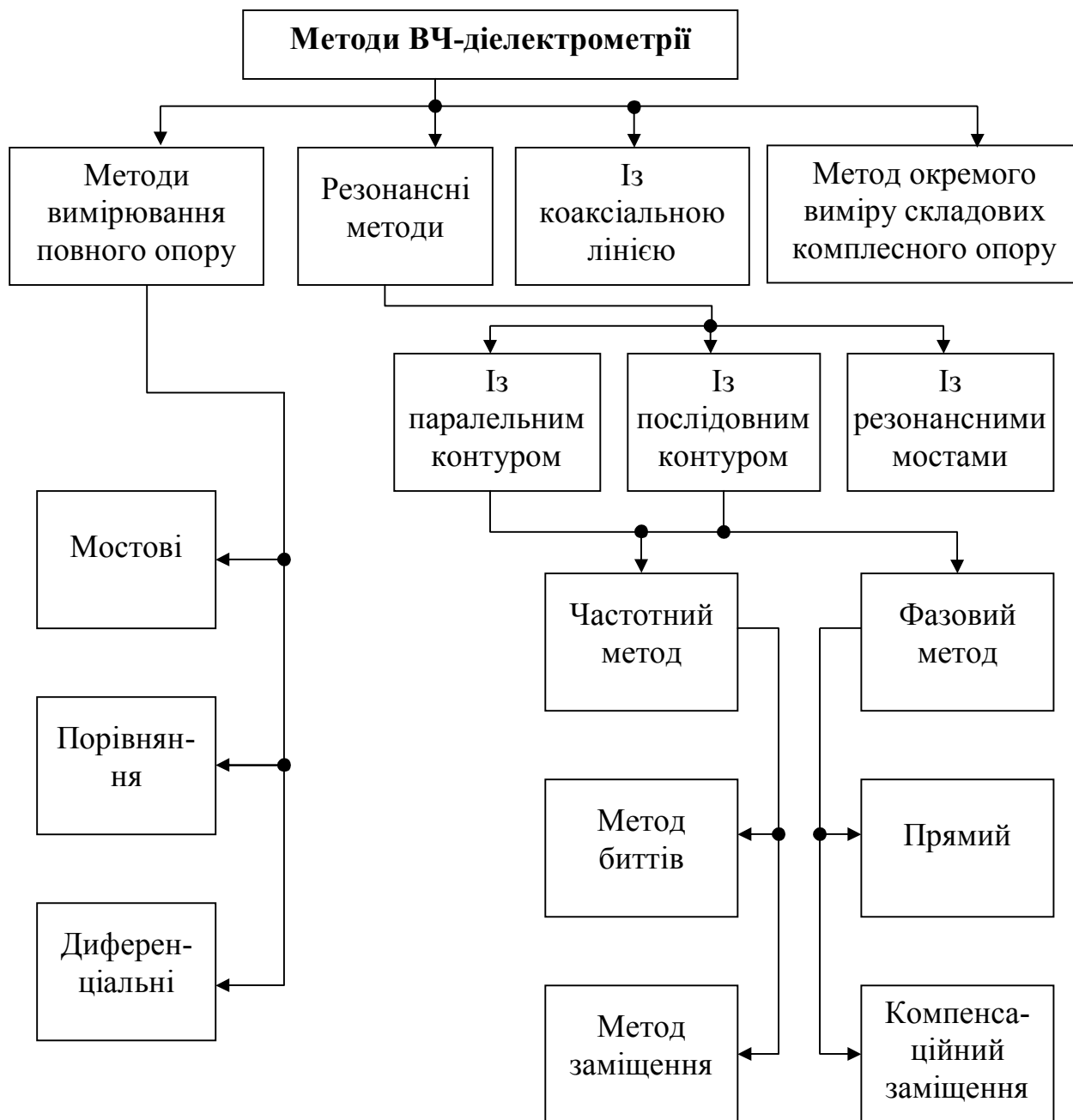


Рис.2.26. Класифікація діелектрометричних методів

Найбільш оптимальним є діапазон 105-108 Гц, із якого експериментально виділені робочі частоти 1 МГц і 3 МГц. Класифікація методів, які використовуються у цьому діапазоні, представлена на рис.2.26. З них найбільш придатними для визначення інформативного параметра  $\alpha_\epsilon$  є резонансні і



методи вимірювання складових комплексного опору. Серед резонансних методів самими перспективними є: амплітудні, частотні і фазові. Дуже часто використовуються комбінації цих методів. У всіх цих випадках ємнісний чутливий елемент є конденсатором резонансної коливальної системи, значення вологості якого залежить від вмісту вологи поміщеного в його електричне поле досліджуваного матеріалу [64,80,85,85,98].

Проте, резонансні методи рекомендується використовувати при вологостях, значення яких не перевищує 40-45%, оскільки при більше високому вмісту вологи добротність вимірювального перетворювача дуже низька і визначення моменту резонансу пов'язане із великими труднощами. Неточність визначення моменту резонансу призводить до значної інструментальної похибки.

При вологостях, що перевищують 45%, необхідно використовувати амплітудно-фазовий метод виміру [57,112] з інформативним параметром  $\alpha_I$  у тій же частотному діапазоні, що і для  $\alpha_\varepsilon$ . Амплітудно-фазовий метод непридатний для матеріалів із низькою вологістю, оскільки при цьому вимір малих фазових кутів призводить до значних похибок. Для хліба і булочних виробів рекомендується також застосувати метод роздільного виміру складових комплексного опору [56].

При оцінці повної вологості в м'якушці хлібобулочних виробів, матеріалі, який має значну мінливість діелектричних втрат, для перекриття діапазону контрольованих вологостей 37-49% необхідно використовувати і високочастотний резонансний діелектрометричний метод заміщення, і високочастотний діелектрометричний амплітудно-фазовий метод і метод роздільного виміру складових комплексного опору.

Суть резонансного методу заміщення полягає в наступному. Генератор стандартних сигналів I типу Г4-102 навантажений на послідовний коливальний контур  $L, C_0 + C_\partial$  (рис.2.27). Електронний вольтметр 2 типу ВЗ-39 підключений до ємнісного давача  $C_\partial$ . Конструкція давача зображена на рис.2.28.

З виходу генератора сигнал із частотою  $f_1 = 1$  МГц і  $f_2 = 3$  МГц та напругою 0,1 В надходить у послідовний коливальний контур. За допомогою зразкового конденсатора  $C$  контур і в першому, і в другому випадку налаштовується в резонанс. За шкалою зразкового конденсатора зчитуються значення його ємності  $C_{o1}$  і  $C_{o2}$  на частотах  $f_1$  і  $f_2$ , а зі шкали вольтметра зчитуються значення напруг  $U_1$  і  $U_2$ .

Попередньо розрізаний хліб розміщується м'якушкою на електроди ємнісного чутливого елемента (давача). Ємність  $C_\partial$ , при цьому збільшується, що призводить до розстроювання контура.

За допомогою  $C_0$  знову відбувається налаштування контура в резонанс на тих же частотах  $f_1$  і  $f_2$  і зчитуються значення  $U_{1x}$ ,  $U_{2x}$ ,  $C_{01x}$ ,  $C_{02x}$ . Маючи отримані дані і використовуючи вираз (2.14), можна визначити кут нахилу  $\alpha_\varepsilon$  залежності  $\varepsilon'(f)$ , який пропорційний вологості.

Суть амплітудно-фазового методу полягає в тому, щоб визначити струм  $I_C$  (рис.2.23), який не залежить від діелектричних втрат і пропорційний вологості [57,112].

При застосуванні методу роздільного виміру складових комплексного опору застосовується інтегральний інформативний характер – коефіцієнт відносного приросту уявної складової ємнісного елемента.

Таким чином, для покриття діапазону вологостей всього асортименту хлібобулочних виробів (37-49%) необхідно використовувати і високочастотний резонансний діелектрометричний метод заміщення і високочастотний діелектрометричний амплітудно-фазовий метод.

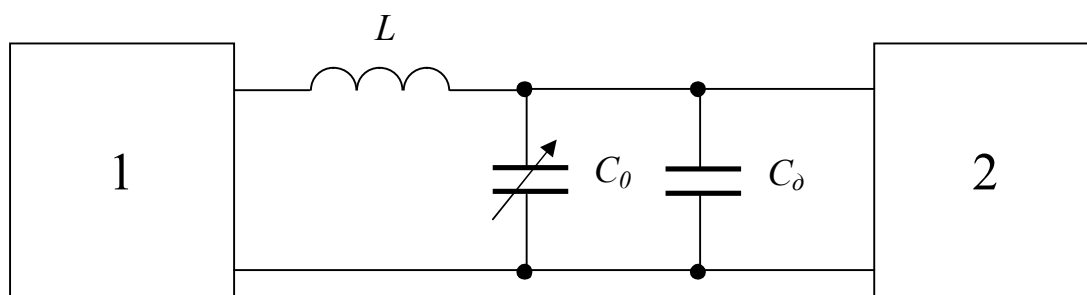


Рис.2.27.

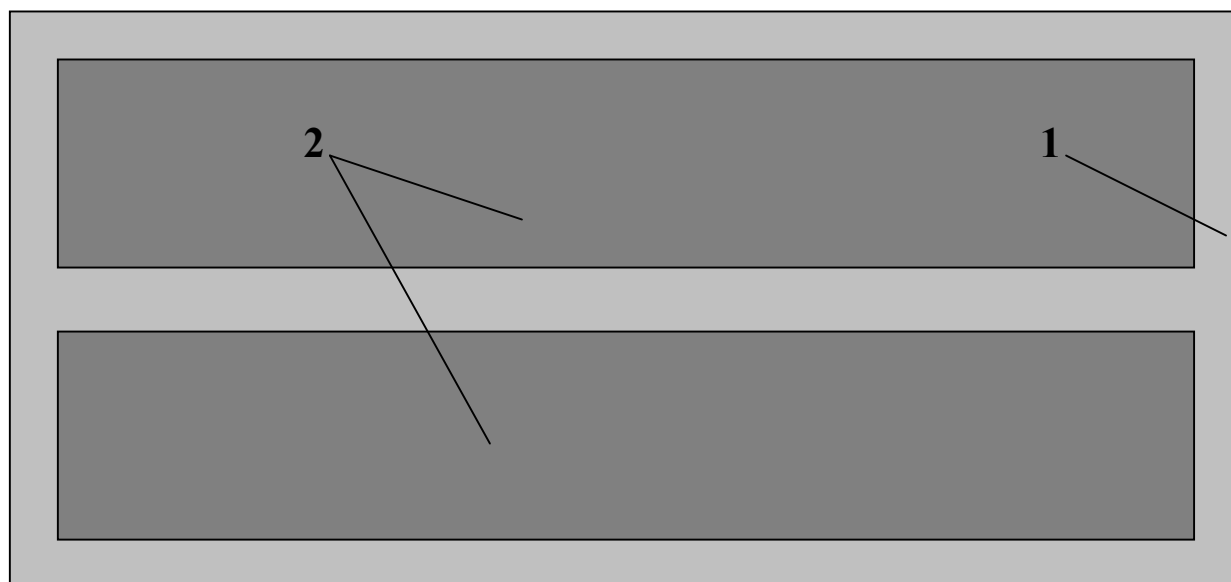


Рис.2.28. Конструкція чутливого елемента:  
1 - основа (склотекстоліт); 2 - електроди

### РОЗДІЛ 3.

## РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУР ВОЛОГОМІРІВ, ВИБІР ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

### 3.1. Ємнісна комірка – чутливий елемент високочастотних вологомірів

Конструкції і розміри ємнісних комірок досить різноманітні [92] і залежать від об'єкта досліджень і умов експерименту [3,28,53].

Широке поширення одержала комірка, що складається з однакових плоских електродів круглої або прямокутної форми, між якими щільно затиснутий зразок матеріалу (плоскопаралельний чутливий елемент). Така конструкція зручна для сипких і рідких матеріалів, оскільки при їхньому дослідженні легко виконується умова

$$H \ll D_M, \quad (3.1)$$

де  $H$  – відстань між електродами;

$D$  – максимальний розмір електрода.

При виконанні умови (3.1) ємність чутливого елемента:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{H}, \quad (3.2)$$

де  $\varepsilon_0$  – відносна діелектрична проникність вакууму;

$S$  – площа електродів.

При невиконанні умови (3.1) необхідно враховувати крайові поля електродів. При цьому ємність чутливого елемента:

$$C' = C + C_k = \varepsilon_0 \frac{S}{H} + C_k, \quad (3.3)$$

де  $C_k$  – крайова ємність.

При внесенні в міжелектродний простір досліджуваного матеріалу ємність збільшується

$$C_M = \left( \varepsilon_0 \frac{S}{H} + C_k \right) \varepsilon_M, \quad (3.4)$$

де  $\varepsilon_M$  – відносна діелектрична проникність досліджуваного матеріалу.

Для дослідження м'якушки хліба набагато зручніше використовувати планарний ємнісний чутливий елемент (рис.2.29), виготовлений у вигляді смужок на твердій основі шляхом травлення фольгованого склопластику [61,100, 102-108].

Приблизно робоча ємність такого чутливого елемента може бути знайдена за формулою [17]:

$$C \approx \varepsilon_0 \frac{l}{\pi} \ln 4 \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (3.5)$$

де  $l$  – довжина одного стрічкового електрода;

$Z_2$  – половина відстані між зовнішніми краями електродів;

$Z_1$  – половина відстані між внутрішніми краями електродів (рис.3.1).

Електричне поле планарного чутливого елемента неоднорідне і має відносно велику напруженість тільки поблизу проміжку між електродами. Напруженість поля  $E$  вздовж осі симетрії чутливого елемента визначається [17] (рис.3.2):

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{y^2}{Z_1^2}\right)\left(1 + \frac{y^2}{Z_2^2}\right)}}, \quad (3.6)$$

де  $E_0$  – напруженість поля в площині електродів;  
 $y$  – відстань від точки виміру до електродів.

Експериментальна залежність чутливості ємнісного елемента у всьому наделектродному об'ємі в залежності від відстані до його поверхні показана на рис.3.3. Закон її зміни збігається із законом зміни залежності  $E(y)$ , але швидкість зменшення набагато більша і на відстані одного сантиметра від поверхні чутливість зменшується в 5 разів відносно чутливості на поверхні електродів.

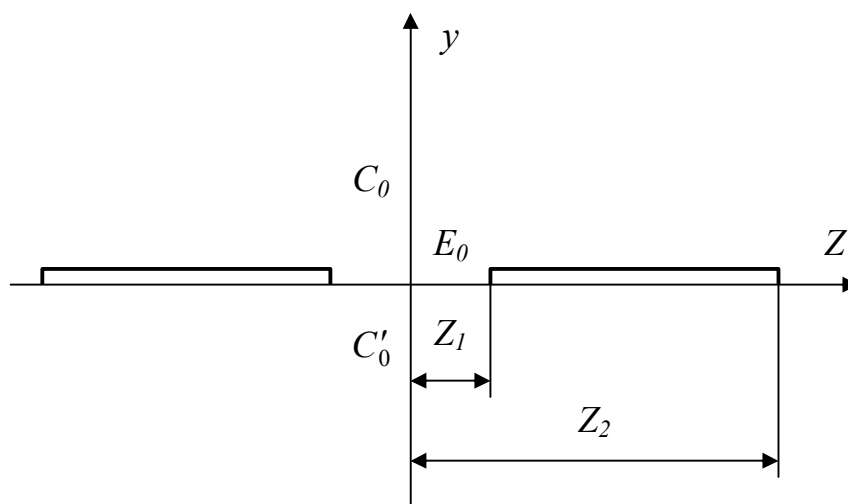


Рис.3.1. До розрахунку робочої ємності планарного ємнісного чутливого елемента

Ця залежність отримана шляхом вимірювання діелектричної проникності водяної призми з висотою 5 мм і площею основи, рівної площі чутливого елемента, яка зміщувалася перпендикулярно площині чутливого елемента догори із дискретністю 5 мм.

Неоднорідність електричного поля викликає найбільшу чутливість ємнісного елемента тільки до властивостей найближчих шарів контрольованого матеріалу, що має контакт з ємнісним елементом. Тому повітряний проміжок між електродами перетворювача і плоскою поверхнею контрольованого матеріалу дає більшу похибку виміру. При контролі матеріалу із нерівною поверхнею така похибка особливо велика і для деякого зменшення її можна на робочій поверхні електродів встановити опори, площа яких повинна бути на

два порядки меншою площі електродів, і висота – на порядок більшою, ніж максимальна висота виступів на контрольованій поверхні [109] (рис.3.4). Така конструкція забезпечує однакову середню товщину повітряного зазору між досліджуваним матеріалом і поверхнею ємнісного чутливого елемента.

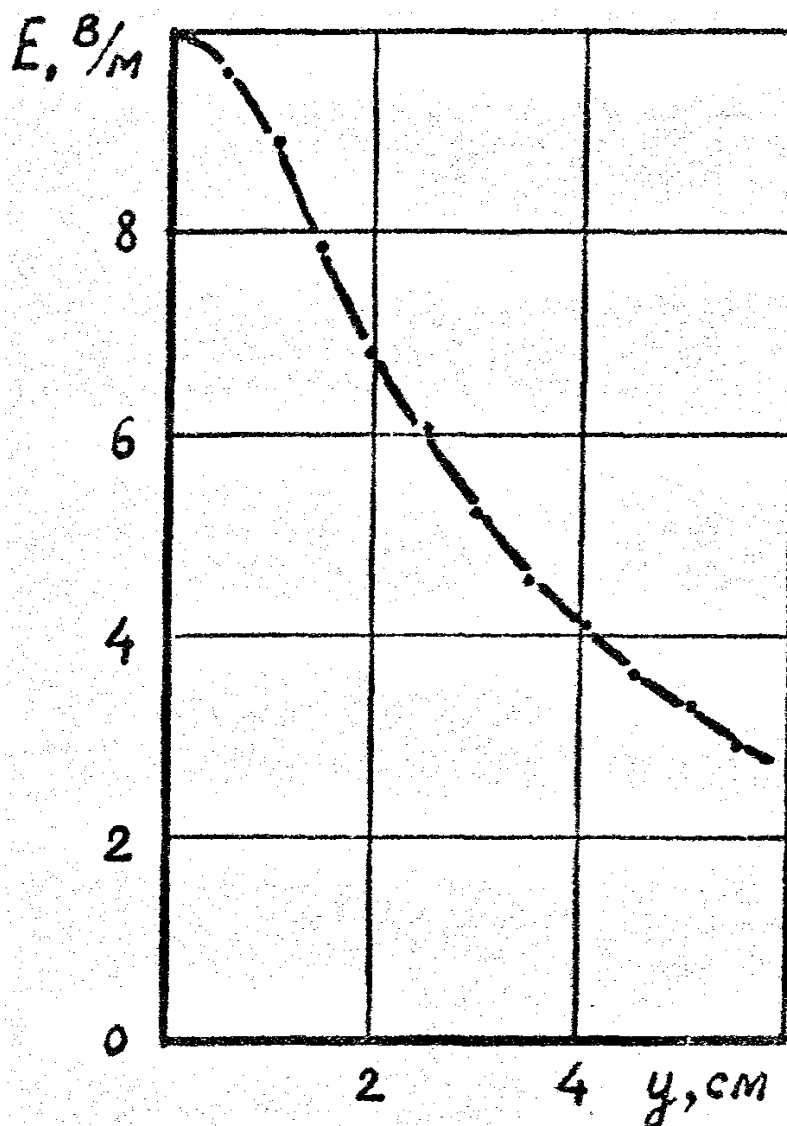


Рис.3.2. Напруженість поля  $E$  уздовж осі симетрії чутливого елемента

### 3.2. Вибір інформативних параметрів сигналу вимірювального перетворювача

3.2.1. Резонансний метод заміщення. Чутливим елементом вимірювального перетворювача є ємнісний давач  $C_0$ , який разом із котушкою індуктивності  $L$  утворить послідовний коливальний контур, що є пасивним чотиріполюсником і виконує роль навантаження генератора вхідної напруги (рис.3.5).

Оскільки чотиріполюсник є послідовним коливальним контуром, що працює в режимі резонансу, і його вихідна напруга знімається з конденсатора  $C_0$ , то буде справедливим наступне співвідношення:

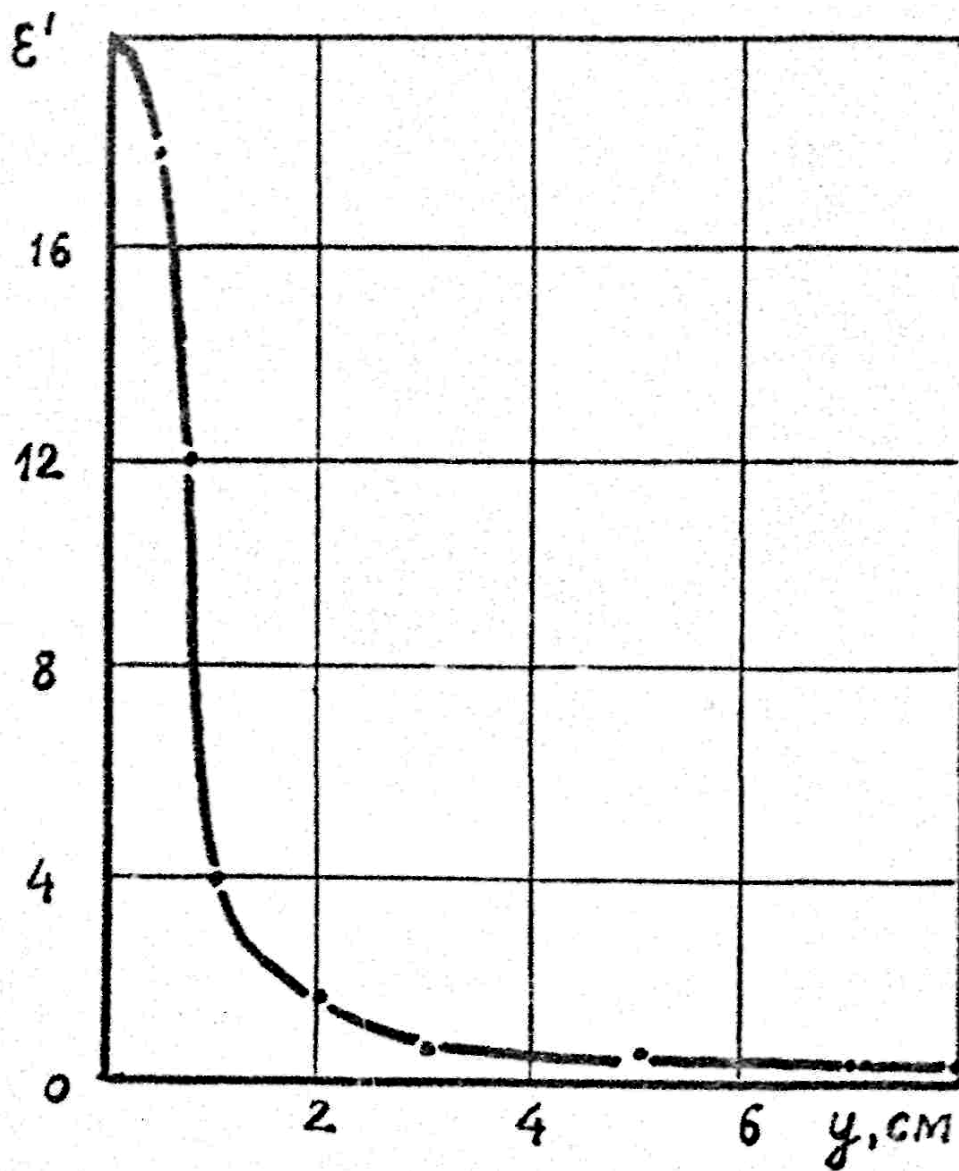


Рис.3.3. Залежність чутливості планарного ємнісного давача

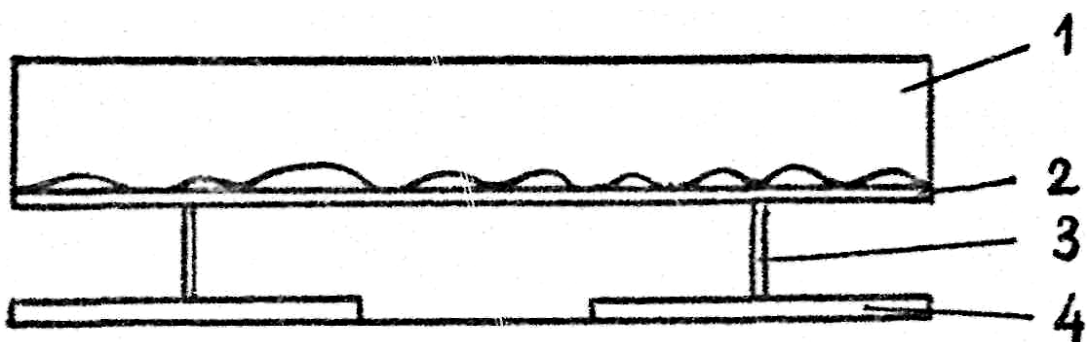


Рис.3.4. Один із варіантів конструкції ємнісного планарного давача:  
 1 - досліджуваний матеріал; 2 - діелектрична основа; 3 - опора; 4 - електрод

$$\dot{U}_{вих} = Q \dot{U}_{вх} e^{-j\frac{\pi}{2}}, \quad (3.7)$$

де  $Q$  – добротність контура.

Допустимо, що вхідна напруга має нульовий фазовий зсув

$$\dot{U}_{вх} = U_{вх} e^{j0}, \quad (3.8)$$

то модуль вихідної напруги в момент резонансу буде дорівнювати:

$$U_{вих} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C_d}}}{R} U_{вх}, \quad (3.9)$$

де  $R$  – еквівалентний опір діелектричних втрат досліджуваного матеріалу.



Рис.3.5. Структура резонансного вологоміра

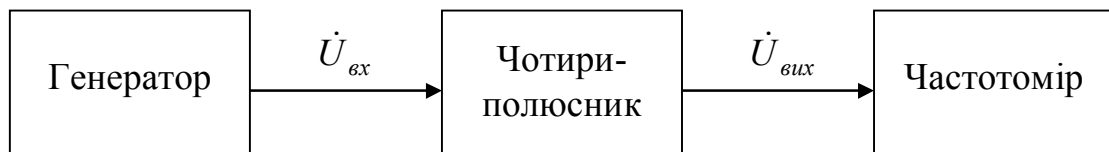


Рис.3.6. Структура вологоміра  $F$ -метра

Таким чином, взаємодія досліджуваного матеріалу з електричним полем конденсатора  $C_d$  еквівалентна збільшенню ємності  $C_d$  і збільшенню втрат, що призводить до зменшення добротності  $Q$ , а, значить, до зменшення  $U_{вих}$ . Оскільки добротність контура і  $tg\delta$  матеріалу величини взаємозалежні, то можна сказати, що  $U_{вих}$  залежить від тангенса кута діелектричних втрат досліджуваного матеріалу. Раніше було доведено, що інформативний параметр  $tg\delta$  сильно залежить від пористості і температури навколишнього середовища, тому непридатний для оцінки вологості м'якушки хліба. Отже, можна зробити висновок, що амплітудний метод у даному конкретному випадку самостійно не може бути використаний.

Частотний метод реалізується за схемами, показаних на рис.3.6 і 3.7.

Тут використаний двосекційний зразковий конденсатор, у якого

$$C_{01} = C_{02}. \quad (3.10)$$

$C_{01}$  використовується у вимірювальному контурі, а  $C_{02}$  входить у коливальну систему додаткового автогенератора  $\Gamma_2$ . При налаштуванні вимірювального контуру за допомогою  $C_{01}$  на частоту генератора  $\Gamma_1$  відбувається синхронна зміна ємності  $C_{02}$ , причому у всьому діапазоні регулювання дотримується

рівність (3.10). Частота  $f_{1\delta}$  додаткового генератора при налаштуванні вимірювального контуру в резонанс із порожнім чутливим елементом буде дорівнювати

$$f_{1\delta} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_{02\Pi}}}, \quad (3.11)$$

де  $L_2$  – індуктивність коливального контуру додаткового генератора;  
 $C$  – ємність другої секції зразкового конденсатора при настроюванні вимірювального контуру в резонанс із порожнім чутливим елементом.

Після завантаження ємнісного чутливого елемента  $C_\delta$  досліджуваним матеріалом його ємність збільшиться на деяке значення  $\Delta C_\delta$ . При настроюванні вимірювального контуру в резонанс у цьому випадку необхідно зменшити  $C_{01}$  на  $\Delta C_\delta$ . Отже, при цьому  $C_{02}$  також зменшиться на  $\Delta C_\delta$ .

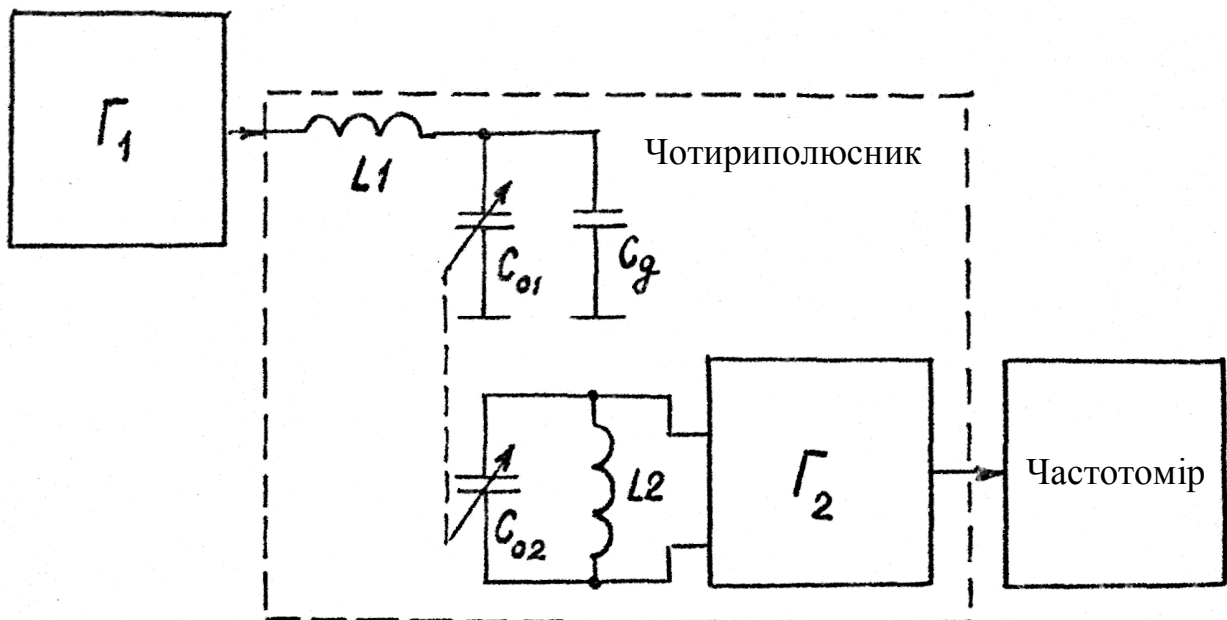


Рис.3.7. Структура  $F$ -метра із допоміжним генератором

При цьому частота додаткового генератора також зміниться

$$f_{2\delta} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2(C_{02\Pi} - \Delta C_\delta)}}, \quad (3.12)$$

де  $C_{02\Pi} - \Delta C_\delta = C_{02M}$  – значення ємності другої секції зразкового конденсатора при налаштуванні вимірювального контуру в резонанс, коли ємнісний чутливий елемент взаємодіє з досліджуваним матеріалом.

Діелектрична проникність досліджуваного матеріалу в цьому випадку буде дорівнювати:

$$\epsilon_M = \frac{C_1}{C_\delta} = \frac{(C_{02\Pi} - C_{02M}) + C_\delta}{C_\delta}. \quad (3.13)$$

Використовуючи вираз (3.11) і (3.12) можна записати:



$$C_{02\Pi} = \frac{1}{4\pi^2 L_2 f_{10}^2}, \quad (3.14)$$

$$C_{02M} = \frac{1}{4\pi^2 L_2 f_{20}^2}. \quad (3.15)$$

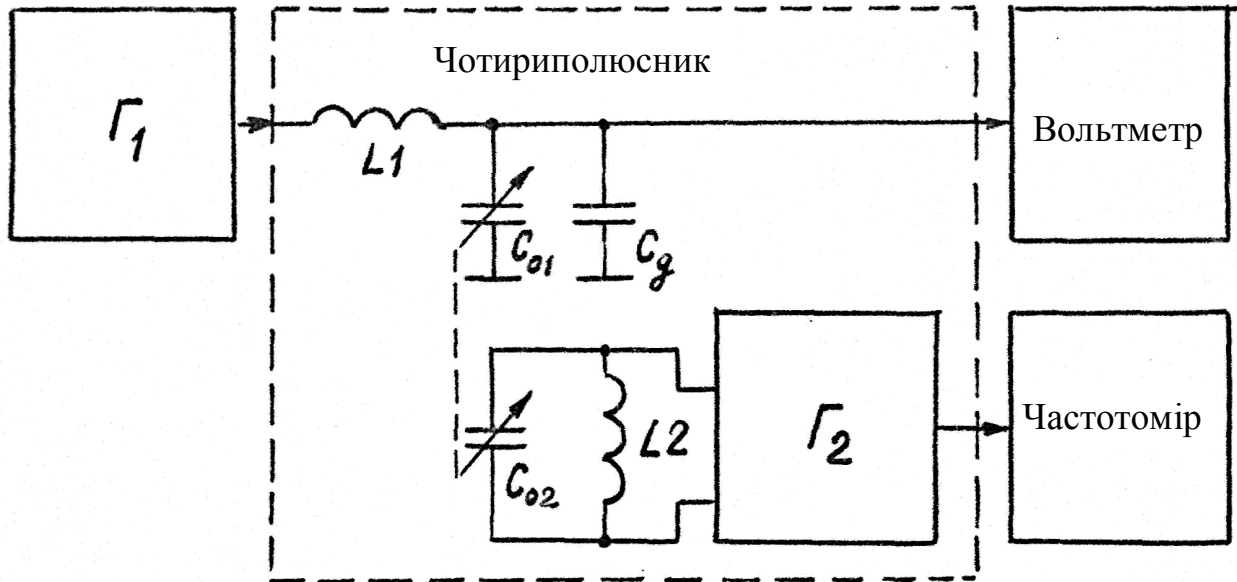


Рис.3.8. Структурна схема для визначення інформативних параметрів первинного перетворювача

Підставляючи (3.14) і (3.15) у вираз (3.13), одержимо:

$$\varepsilon_M = \frac{f_{20}^2 - f_{10}^2}{4\pi^2 L_2 C_0 f_{20}^2 f_{10}^2} + 1. \quad (3.16)$$

Таким чином, вимірюючи в схемі (рис.3.9) частоту частотоміром, можна визначити по формулі (3.16) модуль діелектричної проникності досліджуваного матеріалу.

Оскільки вимірювальний контур працює в режимі резонансу, його вихідна напруга не одержує додатковий фазовий зсув, тому використовувати фазовий метод виміру в цьому випадку досить важко.

Інформативним параметром об'єкта дослідження є кут  $\alpha_\varepsilon$  залежності  $\varepsilon'(f)$ , для визначення якого необхідно мати значення  $\varepsilon'$  і  $\text{tg}\delta$  на двох частотах  $f_1$  і  $f_2$ .

При постійному значенні вхідної напруги  $U_{\text{вх}} = 1\text{В}$  тангенс кута діелектричних втрат досліджуваного матеріалу можна визначити з наступного виразу:

$$\text{tg}\delta_M = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих.М}}} - \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих.П}}} = \frac{1}{U_{\text{вих.М}}} - \frac{1}{U_{\text{вих.П}}}, \quad (3.17)$$

де  $U_{вих.П}$  – резонансне значення вихідної напруги первинного вимірювального перетворювача із порожнім чутливим елементом;

$U_{вих.М}$  – резонансне значення вихідної напруги первинного вимірювального перетворювача, із чутливим елементом, заповненим досліджуваним матеріалом.

У зв'язку із цим інформативними параметрами вимірювального перетворювача є вихідна напруга і вихідні частоти  $f_1$  і  $f_2$ , а структурна схема їхнього одержання буде мати вигляд, показаний на рис.3.8.

3.2.2. Високочастотний амплітудно-фазовий метод. На рис.3.10 показана узагальнена еквівалентна схема вимірювального перетворювача, що містить зразковий елемент  $Z_0$  і ємнісний чутливий елемент, що включає еквівалентну провідність втрат  $G_e$  і еквівалентну ємність  $C_e$ . В якості зразкового елемента можуть бути використані: резистор опором  $R_0$  (рис.3.11,а), конденсатор ємністю  $C_0$  (рис.3.11,б), котушка з індуктивністю  $L_0$  (рис.3.11,в).

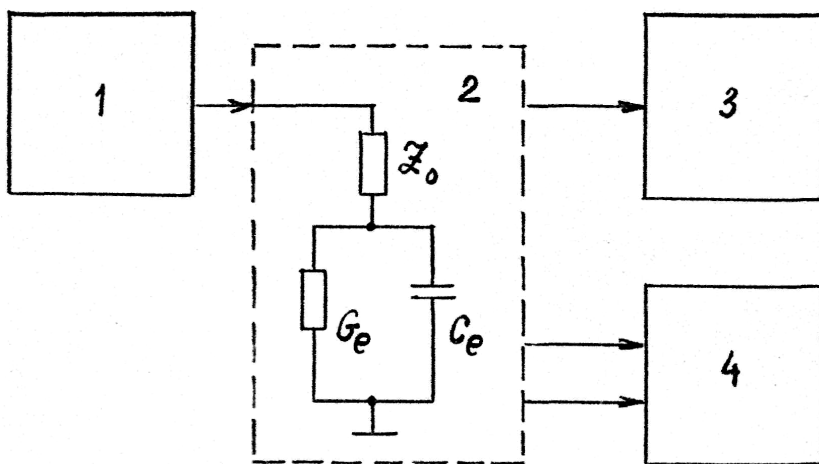


Рис.3.9. Узагальнена структура вологоміра м'якушки хліба

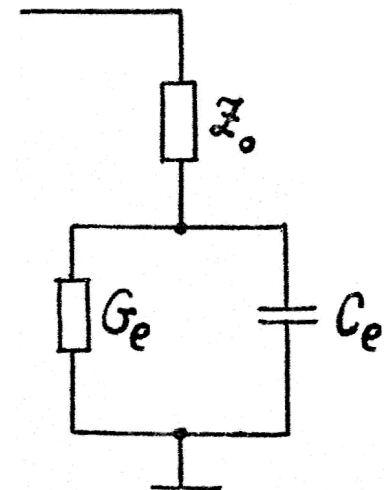


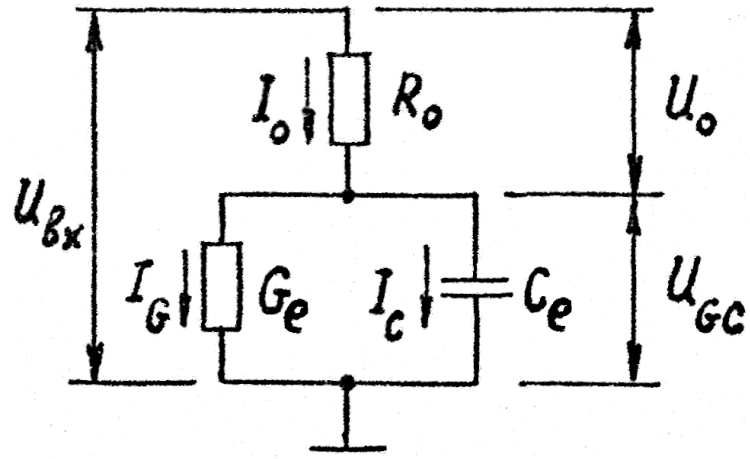
Рис.3.10. Еквівалентна схема первинного перетворювача

Розглянемо варіант використання в якості зразкового елемента резистора  $R_0$  (рис.3.11,а).

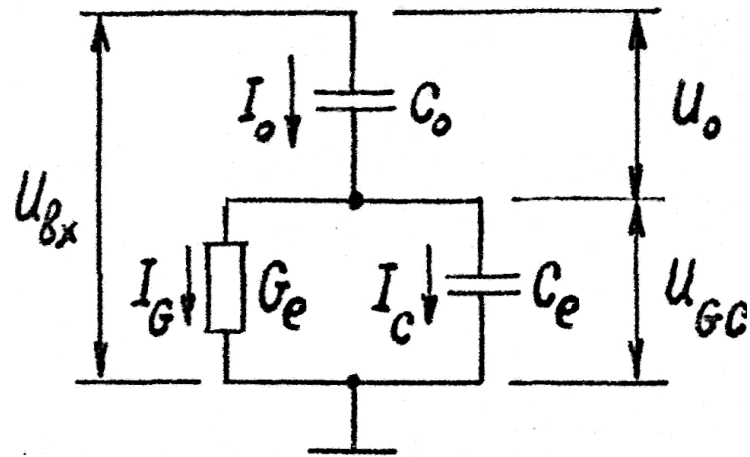
Вхідна напруга створює в зразковому елементі струм:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_0 &= \frac{\dot{U}_{ex}}{R_0 + \frac{-jX_C R}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{\frac{R_0(R - jX_C) - jX_C R}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{\frac{R_0 R - jX_C(R + R_0)}{R - jX_C}} = \\
 &= \frac{\dot{U}_{ex} \sqrt{R^2 + X_C^2} \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_C(R - R_0)}{R_0 R} - \arctg \frac{X_C}{R} \right) \right]}{\sqrt{R_0^2 R^2 + X_C^2 (R + R_0)^2}}. \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

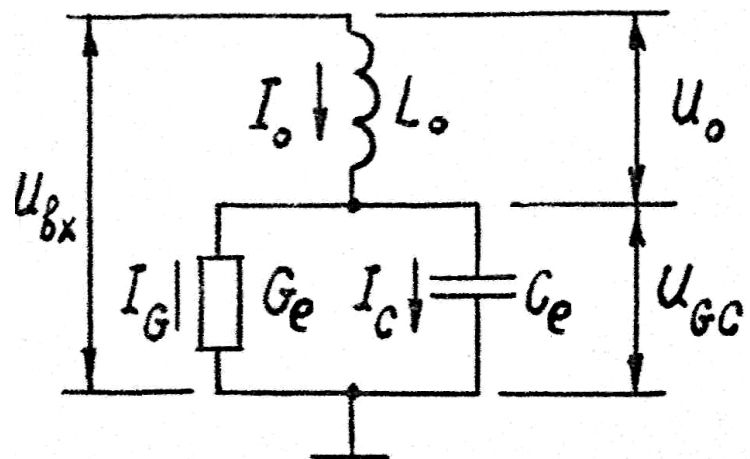
Напруга на зразковому елементі:



a)



б)



в)

Рис.3.11. Варіанти застосування зразкового елемента у первинному перетворювачі

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 R_0 = \frac{\dot{U}_{ex} R_0 \sqrt{R^2 + X_C^2} \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_C (R - R_0)}{R_0 R} - \arctg \frac{X_C}{R} \right) \right]}{\sqrt{R_0^2 R^2 + X_C^2 (R + R_0)^2}}. \quad (3.19)$$

Напряга на чутливому елементі:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{RC} &= \dot{I}_0 \frac{-jX_C R}{R - jX_C} = \frac{\dot{U}_{ex} \frac{-jX_C R}{R - jX_C}}{R_0 + \frac{-jX_C R}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex} (-jX_C R)}{R_0 (R - jX_C) - jX_C R} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} R X_C \exp \left( -j \frac{\pi}{2} \right)}{\sqrt{R_0^2 R^2 + X_C^2 (R_0 + R)^2} \exp \left( -j \arctg \frac{X_C (R_0 + R)}{R_0 R} \right)} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} R X_C \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_C (R_0 + R)}{R_0 R} \right) - \frac{\pi}{2} \right]}{\sqrt{R_0^2 R^2 + X_C^2 (R_0 + R)^2}}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Фазовий зсув між напругами  $\dot{U}_0$  і  $\dot{U}_{RC}$ :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{X_C}{R}. \quad (3.21)$$

Струм, що протікає в ємнісному колі чутливого елемента, дорівнює:

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_{RC}}{-jX_C} = \frac{\dot{U}_{ex} R X_C \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_C (R_0 + R)}{R_0 R} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \exp \left( j \frac{\pi}{2} \right)}{X_C \sqrt{R_0^2 R^2 + X_C^2 (R_0 + R)^2}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} R \exp \left( j \arctg \frac{X_C (R_0 + R)}{R_0 R} \right)}{\sqrt{R_0^2 R^2 + X_C^2 (R_0 + R)^2}}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Використовуючи в якості зразкового елемента конденсатор (рис.3.11,б), знаходимо  $\dot{U}_0$ ,  $\dot{U}_{RC}$ ,  $\dot{I}_C$ ,  $\varphi$ .

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{\dot{U}_{ex} (-jX_{C_0})}{-jX_{C_0} + \frac{-jX_C R}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{1 + \frac{-jX_C R}{(R - jX_C)(-jX_{C_0})}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{\frac{RX_{C_0} - jX_{C_0} X_C + X_C R}{RX_{C_0} - jX_{C_0} X_C}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} X_{C_0} (R - jX_C)}{R(X_{C_0} + X_C) - jX_{C_0} X_C} = \frac{\dot{U}_{ex} X_{C_0} \sqrt{R^2 + X_C^2} e^{-j \arctg \frac{X_C}{R}}}{\sqrt{R^2 (X_{C_0} + X_C)^2 + X_{C_0}^2 X_C^2} e^{-j \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)}}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{\dot{U}_{ex} X_{C_0} \sqrt{R^2 + X_C^2} \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)} - \arctg \frac{X_C}{R} \right) \right]}{\sqrt{R^2 (X_{C_0} + X_C)^2 + X_{C_0}^2 X_C^2}}. \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{RC} &= \frac{\dot{U}_{ex} \frac{-jX_C R}{R - jX_C}}{-jX_{C_0} + \frac{-jX_C R}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{1 + \frac{-jX_{C_0}}{-jX_C R}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{1 + \frac{X_{C_0} (R - jX_C)}{X_C R}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} X_C R}{X_C R + X_{C_0} R - jX_{C_0} X_C} = \frac{\dot{U}_{ex} X_C R}{R(X_C + X_{C_0}) - jX_{C_0} X_C} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} X_C R \exp \left( j \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)} \right)}{\sqrt{R^2 (X_{C_0} + X_C)^2 + X_{C_0}^2 X_C^2}}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_{RC}}{-jX_C} = \frac{\dot{U}_{ex} X_C R \exp \left( j \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)} \right)}{\sqrt{R^2 (X_{C_0} + X_C)^2 + X_{C_0}^2 X_C^2} X_C \exp \left( -j \frac{\pi}{2} \right)} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} R \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)} + \frac{\pi}{2} \right) \right]}{\sqrt{R^2 (X_{C_0} + X_C)^2 + X_{C_0}^2 X_C^2}}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)} - \arctg \frac{X_C}{R} - \arctg \frac{X_{C_0} X_C}{R(X_{C_0} + X_C)} = -\arctg \frac{X_C}{R}. \quad (3.26)$$

Використовуємо в якості зразкового елемента котушку індуктивності  $L_0$  (рис.3.11,в) і знаходимо  $\dot{U}_0$ ,  $\dot{U}_{RC}$ ,  $\dot{I}_C$ ,  $\varphi$ .

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \frac{\dot{U}_{ex} \cdot jX_L}{jX_L + \frac{-jX_C}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex} X_L \sqrt{R^2 + X_C^2} \exp \left( -j \arctg \frac{X_C}{R} \right)}{\sqrt{R^2 (X_L - X_C)^2 + X_L^2 X_C^2} \exp \left( -j \arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L - X_C)} \right)} = \\ &= \frac{\dot{U}_{ex} X_L \sqrt{R^2 + X_C^2} \exp \left[ j \left( \arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L - X_C)} - \arctg \frac{X_C}{R} \right) \right]}{\sqrt{R^2 (X_L - X_C)^2 + X_L^2 X_C^2}}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{RC} &= \frac{\dot{U}_{ex} \frac{-jX_C R}{R - jX_C}}{jX_L + \frac{-jX_C R}{R - jX_C}} = \frac{\dot{U}_{ex}}{1 + \frac{jX_L(R - jX_C)}{-jX_C R}} = \frac{\dot{U}_{ex} X_C R}{-X_C R + X_L R - jX_C X_L} = \\
&= \frac{\dot{U}_{ex} X_C R}{R(X_L - X_C) - jX_C X_L} = \frac{\dot{U}_{ex} X_C R}{\sqrt{R^2(X_L - X_C)^2 + X_L^2 X_C^2} e^{-j \arctg \frac{X_L - X_C}{R(X_L - X_C)}}} = \\
&= \frac{\dot{U}_{ex} X_C R \exp\left(j \arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L - X_C)}\right)}{\sqrt{R^2(X_L - X_C)^2 + X_L^2 X_C^2}}. \tag{3.28}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_{RC}}{-jX_C} = \frac{\dot{U}_{ex} X_C R \exp\left(j \arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L - X_C)}\right)}{\sqrt{R^2(X_L - X_C)^2 + X_L^2 X_C^2} \exp\left(-j \frac{\pi}{2}\right)} = \\
&= \frac{\dot{U}_{ex} R \exp\left[j\left(\arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L - X_C)} + \frac{\pi}{2}\right)\right]}{\sqrt{R^2(X_L - X_C)^2 + X_L^2 X_C^2}}. \tag{3.29}
\end{aligned}$$

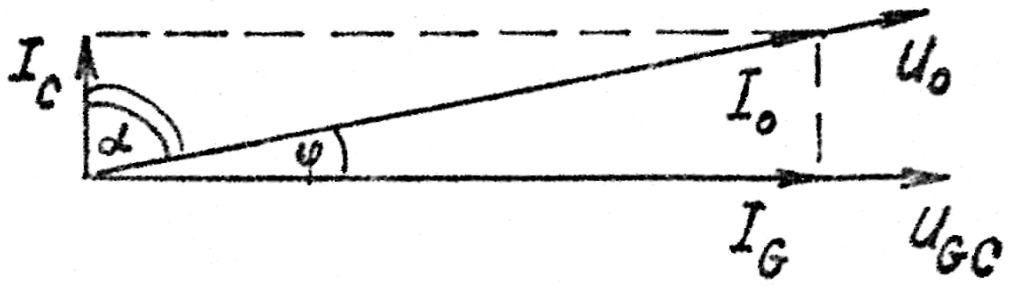
$$\varphi = \arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L + X_C)} - \arctg \frac{X_C}{R} - \arctg \frac{X_L X_C}{R(X_L + X_C)} = -\arctg \frac{X_C}{R}. \tag{3.30}$$

З виразів (3.22), (3.25), (3.29) видно, що для всіх трьох випадків струм  $\dot{I}_C$  залежить від опору втрат, оскільки від цього опору залежить напруга  $\dot{U}_{RC}$ . Причому, від опору втрат залежить як модуль, так і фаза ємнісного струму чутливого елемента. Щоб уникнути цієї залежності необхідно стабілізувати  $|\dot{U}_{RC}|$  відомим способом [110], регулюючи  $|\dot{U}_{ex}|$  вимірювати  $|\dot{I}_C|$ .

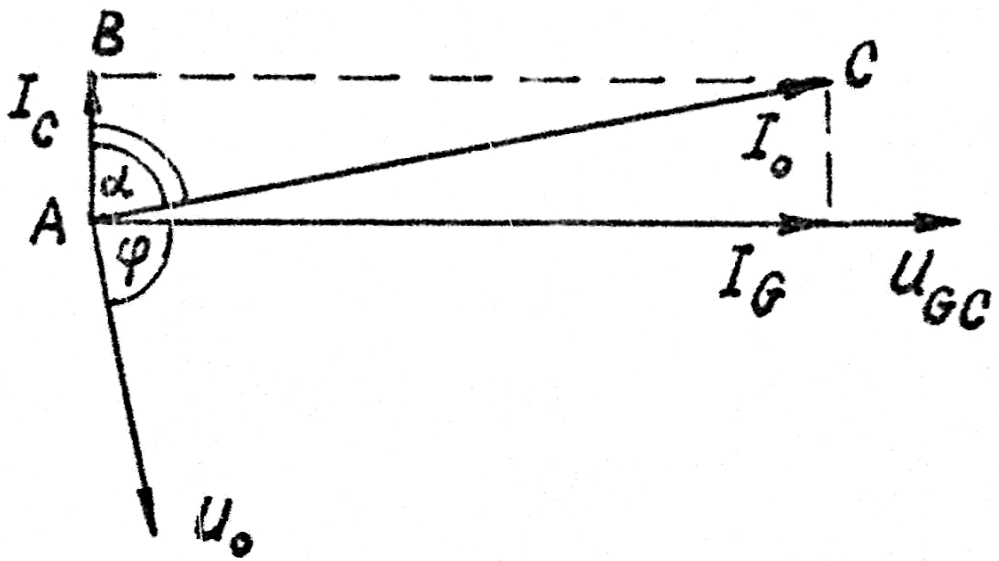
Більш наочно спосіб виміру вологості за ємнісним струмом чутливого елемента можна представити із використанням векторних діаграм (рис.3.12) [57,112].

Розглянемо випадок використання в якості зразкового елемента конденсатор  $C_0$  (рис.3.11,б; 3,12,б).

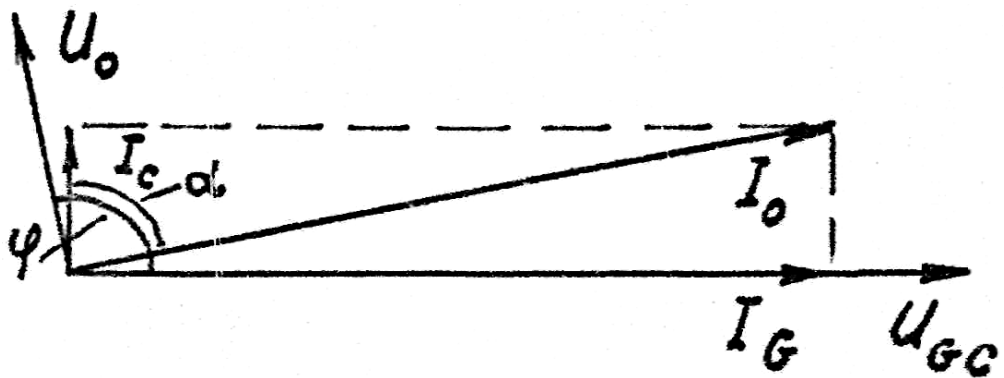
Ємнісний струм  $\dot{I}_C$  випереджає напругу  $\dot{U}_{GC}$  чутливого елемента на кут  $90^\circ$ , струм втрат  $\dot{I}_G$  збігається по фазі з напругою  $\dot{U}_{GC}$ . Струм  $\dot{I}_0$ , що протікає через зразковий конденсатор  $C_0$ , є геометричною сумою векторів струмів  $\dot{I}_C$  і  $\dot{I}_G$ . Як видно з рис.3.12,б, напруга  $\dot{U}_0$ , струми  $\dot{I}_0$ ,  $\dot{I}_G$ , фазовий зсув  $\varphi$  між  $\dot{U}_0$  і  $\dot{U}_{GC}$  залежать від втрат. Не залежить від втрат тільки ємнісний струм  $|\dot{I}_C|$  за умови сталості напруги  $|\dot{U}_{GC}|$ . Із трикутника ABC знаходимо:



a)



б)



в)

Рис.3.12. Векторні діаграми первинного перетворювача для різних варіантів зразкового елемента

$$|\dot{I}_C| = |\dot{I}_0| \cos \alpha, \quad (3.31)$$

де  $\alpha$  – фазовий зсув між струмами  $\dot{I}_C$  і  $\dot{I}_0$ .

Визначимо модуль струму  $\dot{I}_0$ :

$$I_0 = \frac{U_0}{X_{C_0}}, \quad (3.32)$$

де  $U_0$  – модуль напруги на зразковому конденсаторі;

$X_{C_0}$  – модуль реактивного опору зразкового конденсатора.

Таким чином, з врахуванням (3.32) вираз (3.31) приймає наступний вид:

$$I_C = \frac{U_0}{X_{C_0}} \cos \alpha, \quad (3.33)$$

де  $I_C$  – модуль струму  $\dot{I}_C$ .

З рис.3.12,б видно, що  $\alpha = \varphi$ , тому остаточно:

$$I_C = \frac{U_0}{X_{C_0}} \cos \varphi = U_0 \omega C_0 \cos \varphi, \quad (3.34)$$

де  $\omega$  – кутова частота прикладеного до вимірювального ланцюга змінної напруги;

$C_0$  – ємність зразкового конденсатора;

$\varphi$  – фазовий зсув між напругами  $\dot{U}_0$  і  $\dot{U}_{GC}$ .

Оскільки  $|\dot{U}_{GC}| = const$ , струм  $I_C$  не залежить від опору втрат, а тільки від ємнісного опору  $X_C$  чутливого елемента, тому може служити мірою вмісту вологи в досліджуваному матеріалі.

Аналогічно пояснюються варіанти методу з використанням в якості зразкових елементів резистора (рис.3.11,а і 3.12,а) і котушки індуктивності (рис.3.11,в і 3.12,в). Розрахункові співвідношення для струму  $I_C$  при цьому будуть мати вигляд:

а) зразковий елемент - резистор з опором  $R_0$

$$I_C = \frac{U_0}{R_0} \sin \varphi; \quad (3.35)$$

б) зразковий елемент – котушка з індуктивністю  $L_0$

$$I_C = \left| -\frac{U_0}{\omega L_0} \cos \varphi \right|. \quad (3.36)$$

Даний метод можна реалізувати в такий спосіб. Пробу матеріалу поміщають у чутливий елемент, що разом із включеним послідовно зразковим елементом утворить вимірювальний перетворювач 2 (рис.3.9). На вхід вимірювального перетворювача подають змінну високочастотну напругу від



генератора 1 і, виконуючи умову  $|\dot{U}_{GC}| = const$ , вимірюють фазометром 4 фазовий зсув  $\varphi$ , а вольтметром 3 – напругу  $\dot{U}_0$ . За вимірними значеннями  $\varphi$  і  $|\dot{U}_0|$ , використовуючи один із виразів (3.34), (3.35), (3.36) (залежно від виду зразкового елемента), знаходять ємнісну складову струму чутливого елемента, значення якої може бути проградуєвано у відсотках вологості.

Таким чином, інформативними параметрами вимірювального перетворювача при амплітудно-фазовому методі виміру вологості є фазовий зсув  $\varphi$  і напруга  $|\dot{U}_0|$ .

Недоліком амплітудно-фазового методу є складність реалізації умови  $|\dot{U}_{GC}| = const$ .

Якщо зміна діелектричних втрат викликає одночасно зміну напруг  $\dot{U}_0$  і  $\dot{U}_{GC}$ , то приблизне їх відношення може не залежати від даного заважального фактора.

Перевіримо це припущення на прикладі схеми з резистивним зразковим елементом (рис.3.11,а). Для спрощення позначимо чутливий елемент комплексним опором  $\underline{Z}$ .

Під впливом  $\dot{U}_{ex}$  у послідовному колі  $R_0$  і  $\underline{Z}$  виникає струм, що створює на  $R_0$  напругу  $\dot{U}_0$ , а на  $\underline{Z}$  напругу  $\dot{U}_Z$ :

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{ex} R_0}{R_0 + \underline{Z}}, \quad (3.37)$$

$$\dot{U}_Z = \frac{\dot{U}_{ex} \underline{Z}}{R_0 + \underline{Z}}. \quad (3.38)$$

Знаходимо відношення цих напруг:

$$\frac{\dot{U}_Z}{\dot{U}_0} = \frac{\dot{U}_{ex} \underline{Z}}{R_0 + \underline{Z}} \frac{R_0 + \underline{Z}}{\dot{U}_{ex} R_0} = \frac{\underline{Z}}{R_0} = \frac{|\underline{Z}| \exp\left(j \arctg \frac{\text{Im}\{\underline{Z}\}}{\text{Re}\{\underline{Z}\}}\right)}{R_0}. \quad (3.39)$$

Скориставшись виразом (3.39) можна записати наступні рівняння:

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\{\underline{Z}\}}{\text{Re}\{\underline{Z}\}}, \quad (3.40)$$

$$\frac{|\dot{U}_Z|}{|\dot{U}_0|} = \frac{|\underline{Z}|}{R_0} = \frac{\sqrt{(\text{Im}\{\underline{Z}\})^2 + (\text{Re}\{\underline{Z}\})^2}}{R_0}. \quad (3.41)$$

Комплексний опір чутливого елемента:

$$\underline{Z} = \frac{-jX_C R}{R - jX_C} = \frac{RX_C \exp\left(-j \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{R^2 + X_C^2} \exp\left(-j \arctg \frac{X_C}{R}\right)}. \quad (3.42)$$

Відношення модулів напруги на зразковому і чутливому елементах:

$$A = \frac{|\dot{U}_{RC}|}{|\dot{U}_0|} = \frac{|Z|}{R_0} = \frac{RX_C}{R_0 \sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{R}{R_0 \sqrt{1 + \frac{R^2}{X_C^2}}}. \quad (3.43)$$

З виразу (3.42) знаходимо:

$$\varphi = \arctg \frac{X_C}{R} - \frac{\pi}{2} = -\arctg \frac{R}{X_C}. \quad (3.44)$$

Звідси

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{R}{X_C}. \quad (3.45)$$

Вираз (3.43) з врахуванням (3.45) приймає наступний вид:

$$A = \frac{R}{R_0 \sqrt{R^2 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{R}{R_0 \sqrt{1 + \frac{1}{\cos^2 \varphi}}}. \quad (3.46)$$

З виразу (3.46) визначаємо опір втрат досліджуваного матеріалу:

$$R = \frac{AR_0}{\cos \varphi}. \quad (3.47)$$

Використовуючи (3.45) і (3.47) одержимо розрахункове співвідношення для ємнісної складової комплексного опору досліджуваного матеріалу:

$$X_C = -\frac{R}{\operatorname{tg} \varphi} = -\frac{AR_0}{\cos \varphi \operatorname{tg} \varphi} = -\frac{AR_0}{\cos \varphi \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}} = -\frac{AR_0}{\sin \varphi}. \quad (3.48)$$

Таким чином, вимірявши відношення напруг на чутливому елементі і зразковому резисторі, а також фазовий зсув між ними, можна, використовуючи вираз (3.47) і (3.48), визначити реактивну складову комплексного опору досліджуваного матеріалу, що залежить від вологості.

Даний метод може бути використаний не тільки для аналізу вологості, але й для аналізу діелектричних параметрів різних речовин.

### 3.3. Контроль вологості капілярно-пористих матеріалів з великим вмістом вільної води

Експериментальні дослідження вологого зразка хліба показали, що його активний опір  $R_{np}$  знаходиться в межах 15-20 кОм та значними є діелектричні втрати, тому для аналізу доцільно використати еквівалентну схему первинного перетворювача з послідовним ввімкненням діелектричних втрат (рис.3.13,а). Векторна діаграма цієї схеми показана на рис.3.13,б.

Кут  $\alpha$  між струмами  $\dot{I}_{np}$  і  $\dot{I}$  знаходиться за виразом

$$\alpha = 180^\circ - \arccos \frac{U_3^2 + U_{чЕ}^2 - U_\Gamma^2}{2 \cdot U_3 \cdot U_{чЕ}}, \quad (3.49)$$

струм  $I$  – за виразом

$$I = \frac{U_3}{R_3} \quad (3.50)$$

При цьому уявна складова струму досліджуваного зразка матеріалу, яка пропорційна його вологості і не залежить від нестабільних діелектричних втрат, знаходиться з виразу

$$I_y = I \cdot \sin \alpha = \frac{U_3}{R_3} \cdot \sin \alpha = \frac{U_3}{R_3} \cdot \sin \left( 180^\circ - \arccos \frac{U_3^2 + U_{\text{ЧЕ}}^2 - U_\Gamma^2}{2 \cdot U_3 \cdot U_{\text{ЧЕ}}} \right). \quad (3.51)$$

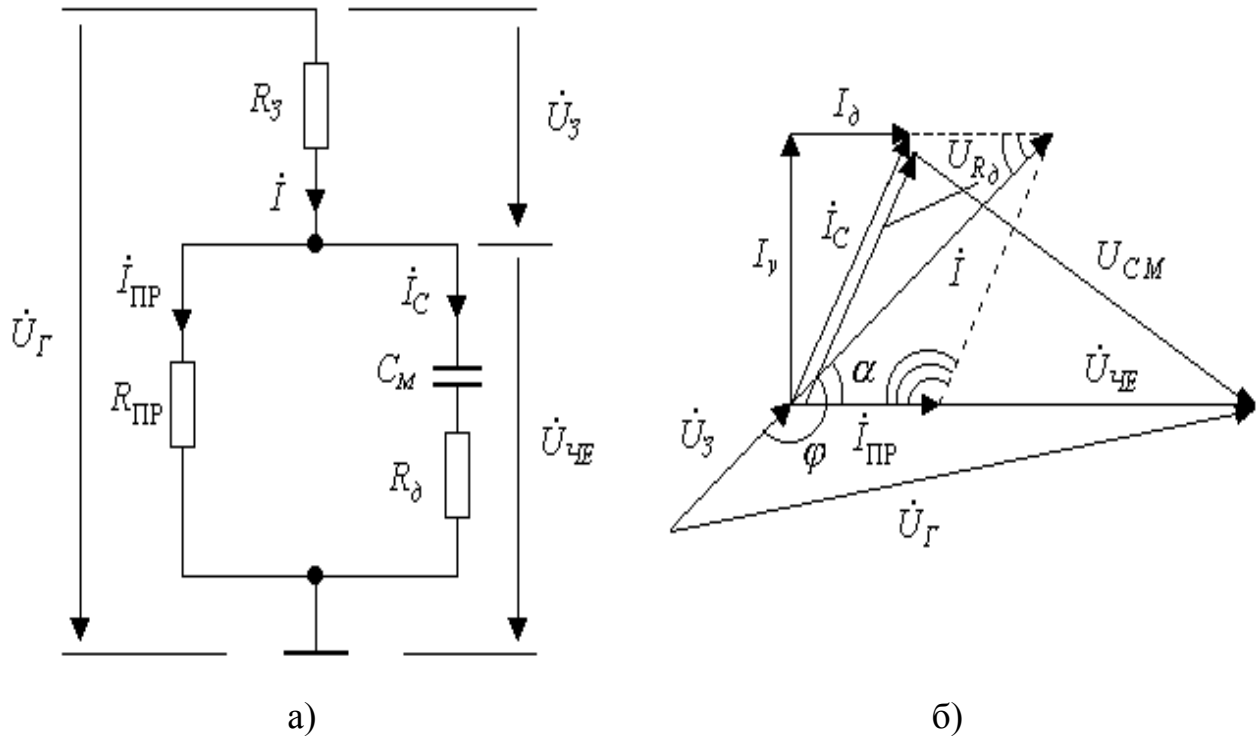


Рис.3.13. Еквівалентна схема та векторна діаграма ПП із м'якушкою хліба

Від нестабільної пористості можна захиститись, застосувавши в якості інформативного параметра коефіцієнт відносного приросту уявної складової ємнісного струму зразка

$$K_2 = \frac{100 \cdot (I_{y_1} - I_{y_2})}{I_{y_1} + I_{y_2}}, \quad (3.52)$$

де  $I_{y_1}$  – уявна складова ємнісного струму зразка на частоті  $\omega_1$ ;

$I_{y_2}$  – уявна складова ємнісного струму зразка на частоті  $\omega_2$ .

Вираз (3.52) може бути використаний для побудови приладу контролю вологості зі значним вмістом вільної води.

Експериментальна перевірка методу і його порівняння з аналогом (діелектрометричним методом повної провідності) дала такі результати (вологість хліба 47,4%):

- діелектричний метод повної провідності -  $\Delta W = 3,6\%$ ;
- діелектрометричний метод визначення вологості капілярно – пористих матеріалів з великим вмістом вільної води -  $\Delta W = 0,09\%$

### 3.4. Розробка алгоритмів виміру

Процес визначення кута  $\alpha_\varepsilon$  залежності  $\varepsilon'(f)$  припускає знаходження  $\varepsilon'$  на частотах  $f_1$  і  $f_2$  в обраному діапазоні при порожньому і заповненому чутливому елементі. Для цього вимірювальний перетворювач вводиться в режим резонансу і послідовно вимірюються резонансні значення вихідної напруги порожнього і заповненого чутливого елемента  $U_{вих.П}$  і  $U_{вих.М}$ , а також частоти додаткового автогенератора  $f_{Д.П}$  і  $f_{Д.М}$ . За допомогою обмірюваних параметрів, використовуючи вираз (3.16), (3.17), (2.10) і (2.14), можна визначити  $\alpha_\varepsilon$ .

Виходячи із цього послідовність вимірювальних і допоміжних операцій буде наступною:

- під'єднання до первинного вимірювального перетворювача вхідної напруги із частотою  $f_1$ ;
- налаштування первинного вимірювального перетворювача в резонанс при порожньому чутливому елементі;
- вимір вихідної напруги первинного вимірювального перетворювача при порожньому чутливому елементі ;
- під'єднання до первинного вимірювального перетворювача вхідної напруги із частотою  $f_2$ ;
- налаштування первинного вимірювального перетворювача (у резонанс) при порожньому чутливому елементі;
- вимір вихідної напруги первинного вимірювального перетворювача при порожньому чутливому елементі;
- вимір частоти напруги додаткового генератора при порожньому чутливому елементі;
- розміщення об'єкта дослідження на ємнісному чутливому елементі;
- під'єднання до первинного вимірювального перетворювача вхідної напруги із частотою  $f_1$ ;
- налаштування первинного вимірювального перетворювача в резонанс при заповненому датчику;
- вимір вихідної напруги первинного вимірювального перетворювача при заповненому чутливому елементі;
- вимір частоти напруги додаткового генератора при заповненому чутливому елементі;
- обчислення проміжних величин і кута нахилу  $\alpha_\varepsilon$  залежності  $\varepsilon'(f)$ .

Аналізуючи всю сукупність вимірювальних і допоміжних операцій можна помітити, що в ній існує кілька повторюваних вимірювальних циклів:

- під'єднання до вимірювального перетворювача вхідної напруги;
- налаштування вимірювального перетворювача в резонанс;

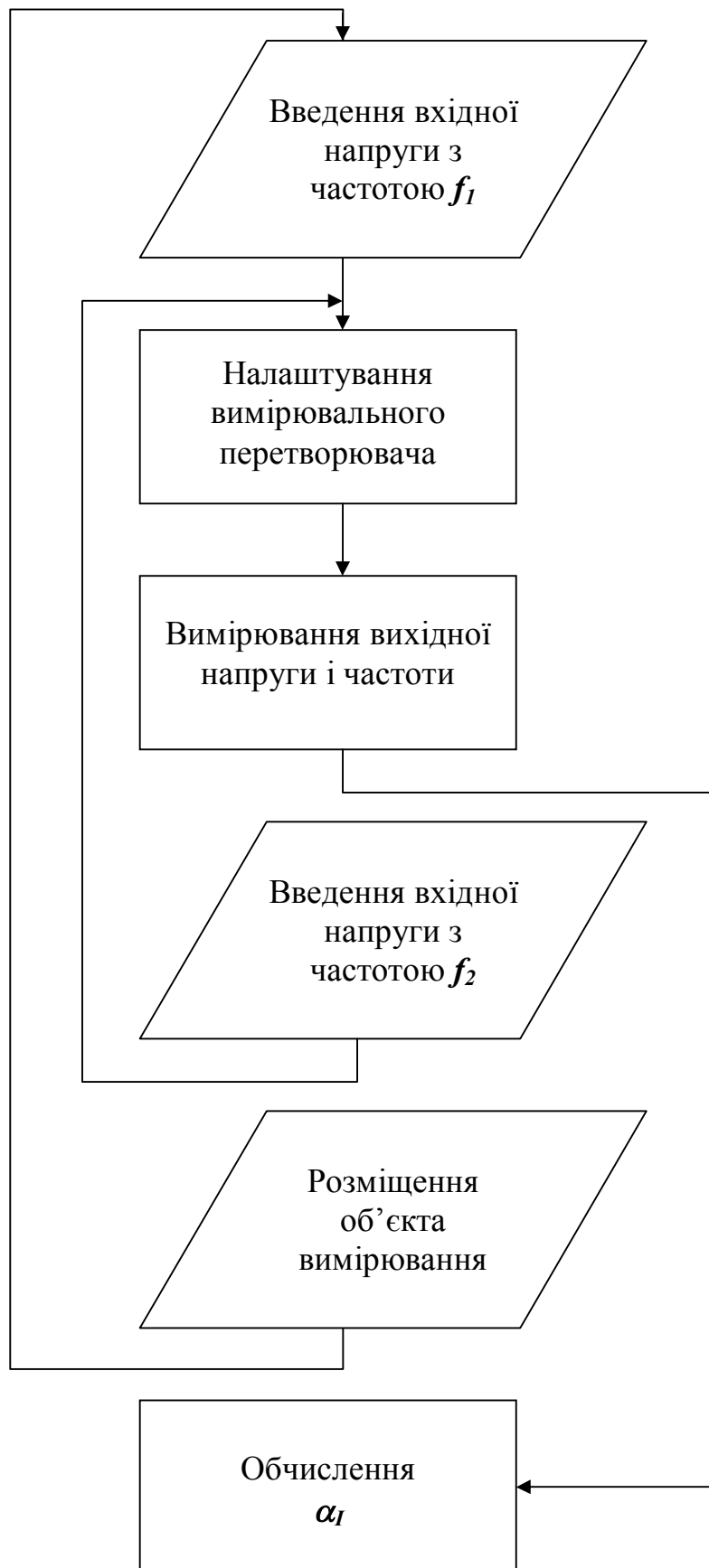


Рис. 3.14. Блок-схема алгоритма реалізації резонансного методу

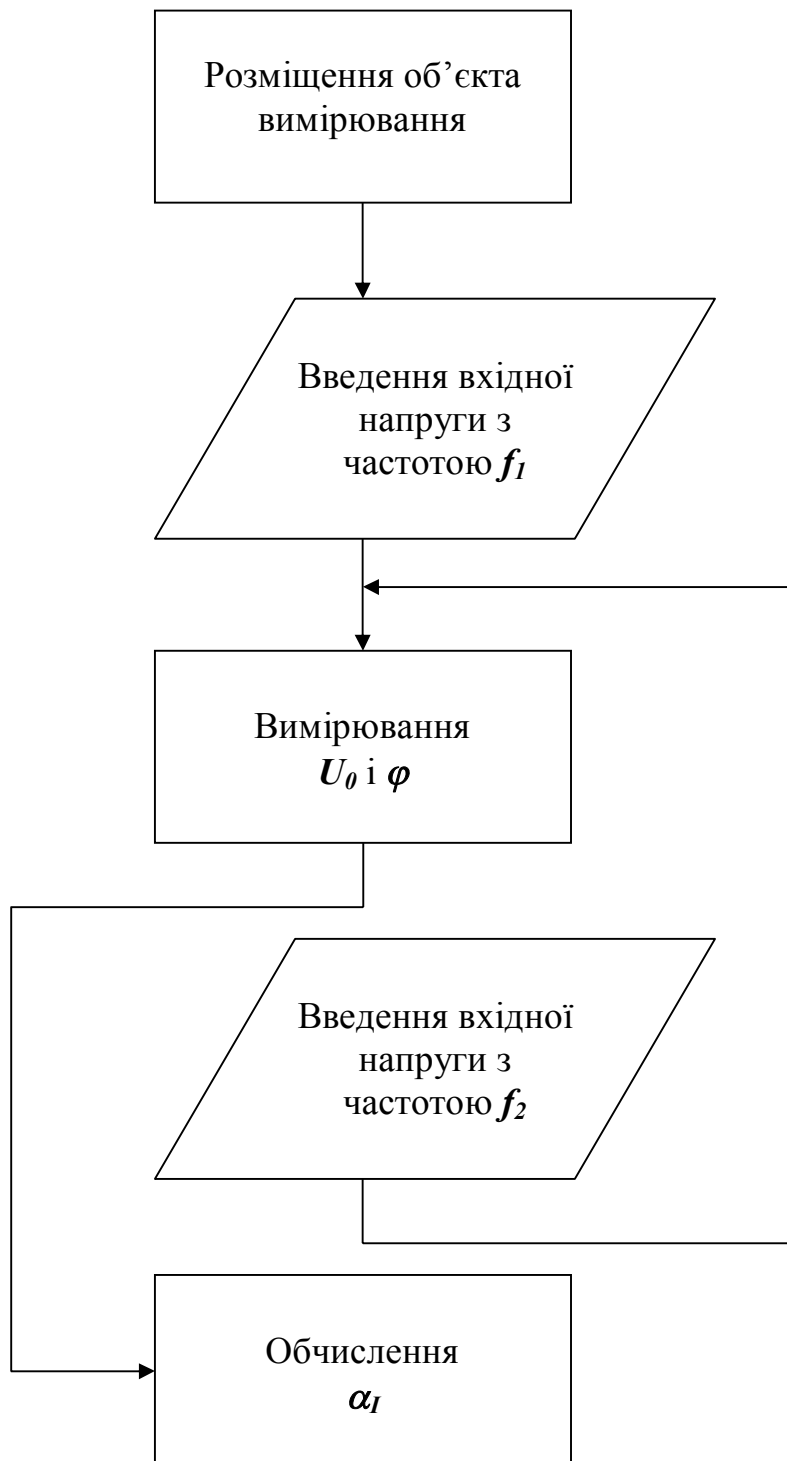


Рис. 3.15. Блок-схема алгоритма реалізації амплітудно-фазового методу

- вимір вихідної напруги вимірювального перетворювача;
- вимір частоти додаткового генератора.

З врахуванням усього цього, блок-схема алгоритму виміру буде мати вигляд, показаний на рис.3.14.

Знаходження  $\alpha_I$  також припускає використання двох частот  $f_1$  і  $f_2$  і визначення на цих частотах ємнісної складової струму чутливого елемента  $I_C$ .

Проте при використанні амплітудно-фазового методу алгоритм виміру значно спрощується, оскільки виключаються операції настроювання в резонанс.

Виходячи із цього послідовність операцій буде наступною:

- розміщення на чутливому елементі об'єкта досліджень;
- під'єднання до вимірювального перетворювача вхідної напруги із частотою  $f_1$ ;
- вимір напруги  $U_{01}$  і фазового зсув  $\varphi_1$ ;
- під'єднання до вимірювального перетворювача вхідної напруги із частотою  $f_2$ ;
- вимір напруги  $U_{02}$  і фазового зсув  $\varphi_2$ .

З врахуванням цього, блок-схема алгоритму виміру буде мати вигляд, представлений на рис.3.16.

Контроль дослідних зразків доцільно здійснювати з використанням коефіцієнта відносного приросту струму дійсної ємності матеріалу  $K_I$ .

Процес визначення коефіцієнта відносного приросту струму дійсної ємності матеріалу  $K_I$  передбачає знаходження вказаного струму на частотах  $f_1$  і  $f_2$ , які знаходяться експериментально. При цьому визначаються напруги на виході генератора  $U_G$ , на зразковому та чутливому елементах ( $U_3$  та  $U_{чЕ}$  відповідно). За допомогою отриманих параметрів, використавши вираз

$$K_I = \frac{100 \cdot (I_{M_1} - I_{M_2})}{I_{M_1} + I_{M_2}} = \frac{100 \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{U_{31}}{R_3} \cos \beta_1 \right) - U_{чЕ1} \omega_1 C_0 \right] - \left[ \left( \frac{U_{32}}{R_3} \cos \beta_2 \right) - U_{чЕ2} \omega_2 C_0 \right] \right\}}{\left[ \left( \frac{U_{31}}{R_3} \cos \beta_1 \right) - U_{чЕ1} \omega_1 C_0 \right] + \left[ \left( \frac{U_{32}}{R_3} \cos \beta_2 \right) - U_{чЕ2} \omega_2 C_0 \right]}, \quad (3.53)$$

де  $\omega_1$  і  $\omega_2$  – перша та друга робочі радіочастоти генератора;

$U_{31}$ ,  $U_{Г1}$ ,  $U_{чЕ1}$  – напруги зразкового елемента, генератора і чутливого елемента відповідно на частоті  $\omega_1$ ;

$U_{32}$ ,  $U_{Г2}$ ,  $U_{чЕ2}$  – напруги зразкового елемента, генератора і чутливого елемента відповідно на частоті  $\omega_2$

можна визначити  $K_I$ .

Отже, послідовність контрольних та допоміжних операцій буде такою:

1. Увімкнення приладу контролю вологості та витримка часу для практичного завершення перехідних процесів.
2. Встановлення градуювальних коефіцієнтів.
3. Встановлення параметрів схеми для першого контролю.
4. Витримка часу для завершення перехідних процесів.
5. Встановлення і контроль амплітуди  $U_G$ .
6. Контроль “нуля”.
7. Контроль амплітуди  $U_{чЕ1}$  на першій частоті  $f_1$ .
8. Встановлення параметрів схеми для другого контролю.

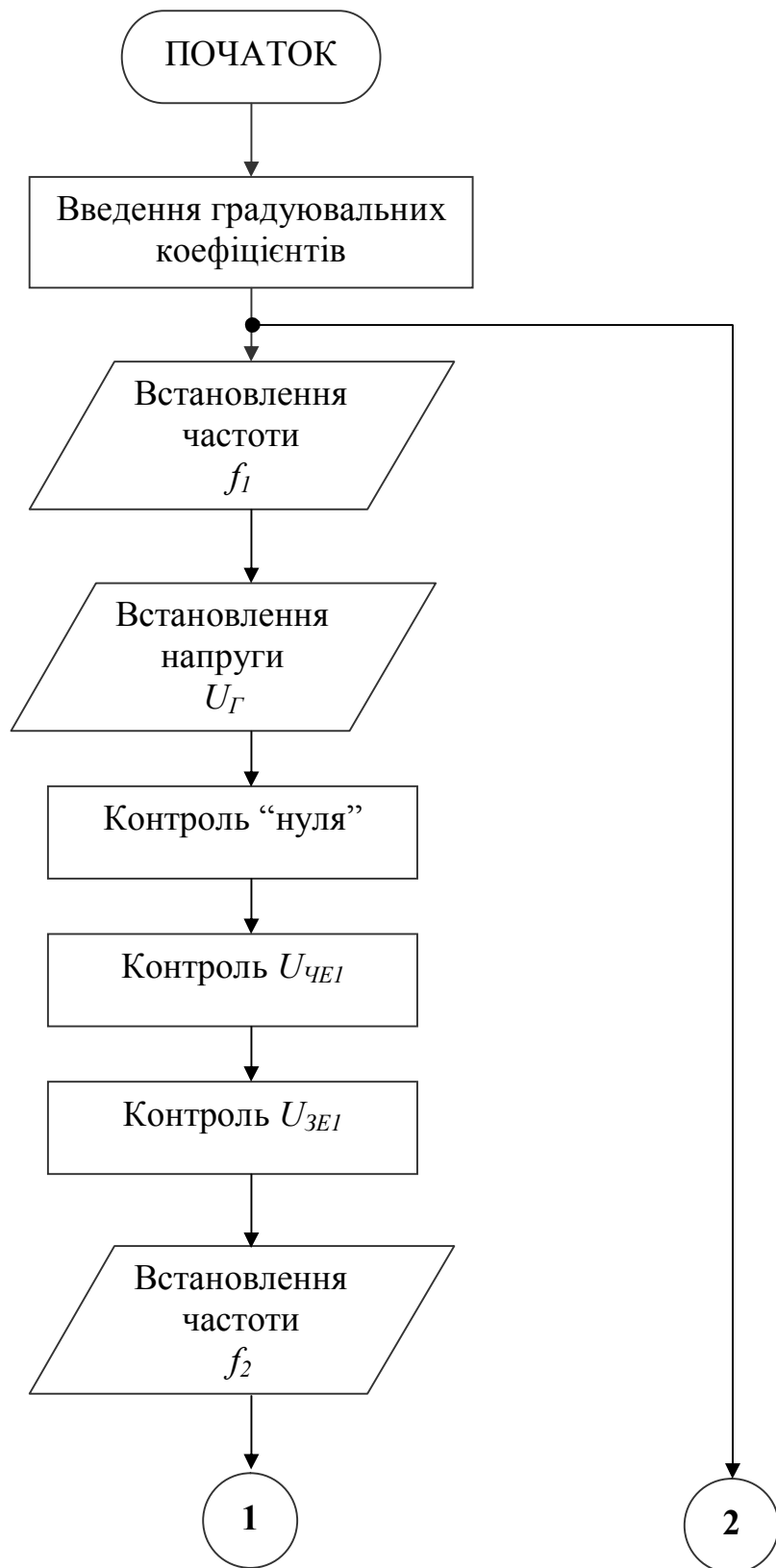


Рис.3.16. Структурна схема алгоритму контролю повної вологості хліба



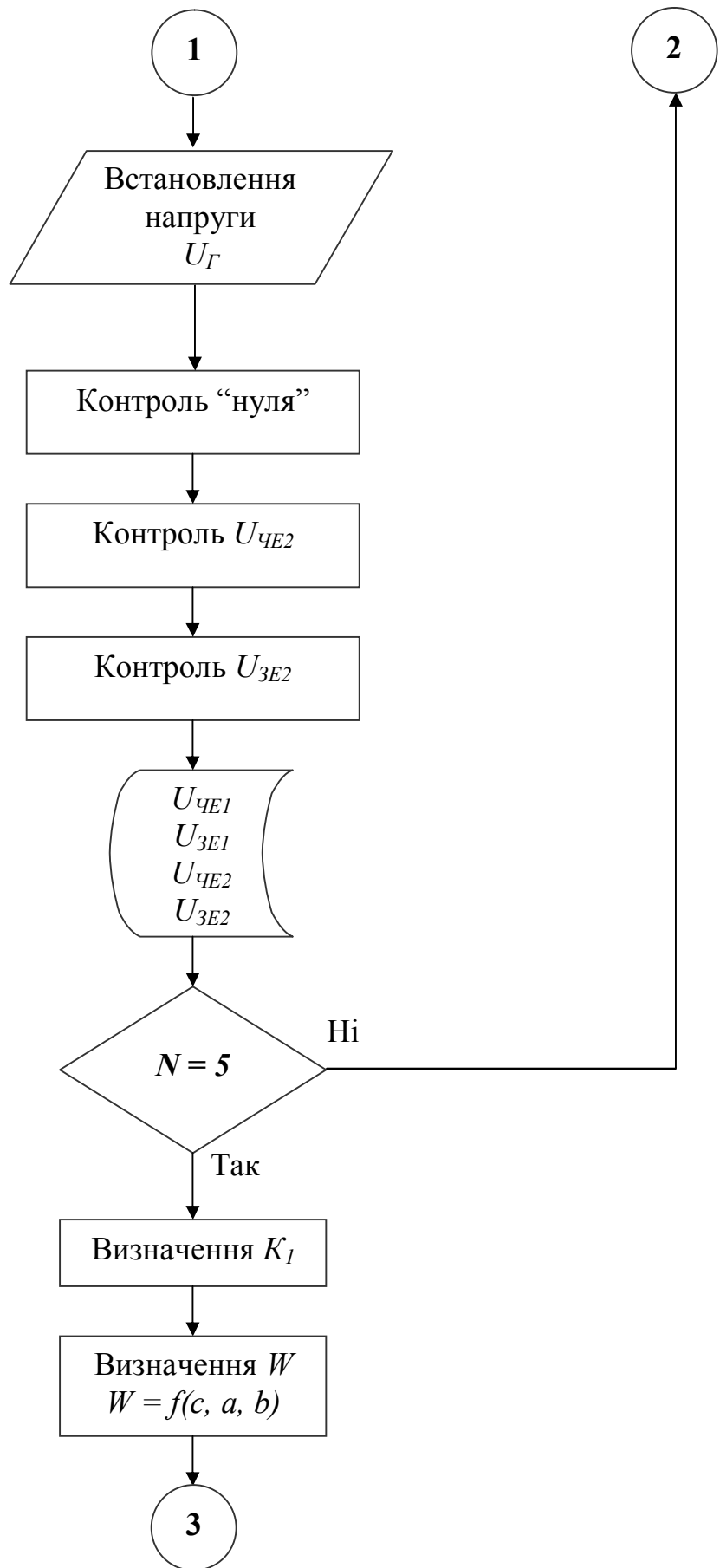


Рис.3.17. Продовження алгоритму рис.3.16

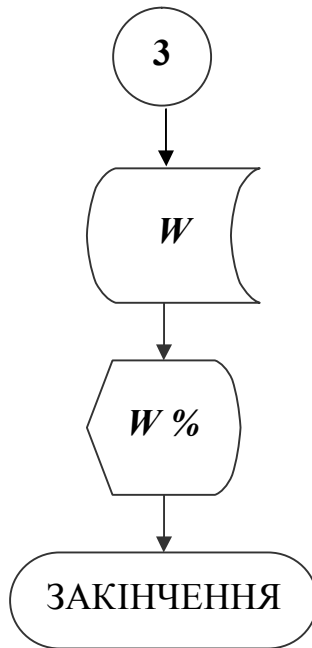


Рис.3.18. Продовження алгоритму рис.3.16

9. Витримка часу для завершення перехідних процесів.
10. Встановлення і контроль амплітуди  $U_G$ .
11. Контроль “нуля”.
12. Контроль амплітуди  $U_{3E1}$  на першій частоті  $f_1$ .
13. Встановлення параметрів схеми для третього контролю.
14. Витримка часу для завершення перехідних процесів.
15. Встановлення і контроль амплітуди  $U_G$ .
16. Контроль “нуля”.
17. Контроль амплітуди  $U_{4E2}$  на другій частоті  $f_2$ .
18. Встановлення параметрів схеми для четвертого контролю.
19. Витримка часу для завершення перехідних процесів.
21. Контроль “нуля”.
22. Контроль амплітуди  $U_{3E2}$  на другій частоті  $f_2$ .
23. Контроль температури і встановлення коригувальних коефіцієнтів.
24. Від’єднання вимірювальної частини приладу контролю вологості.
25. Зберігання інформативних параметрів  $U_{4E1}$ ,  $U_{4E2}$ ,  $U_{3E1}$ ,  $U_{3E2}$ .
26. Повторення  $N$  разів пунктів 2 – 25.
27. Визначення середніх значень одержаних інформативних параметрів  $U_{4E1}$ ,  $U_{4E2}$ ,  $U_{3E1}$ ,  $U_{3E2}$ , та виключення 20% недостовірних значень.
28. Перерахунок середніх значень  $U_{4E1}$ ,  $U_{4E2}$ ,  $U_{3E1}$ ,  $U_{3E2}$ .
29. Визначення  $K_1$ .
30. Визначення вологості хліба за інформативними параметрами та значенням  $U_G$ .

Аналізуючи всю сукупність контрольних та допоміжних операцій, а також те, що деякі з них утворюють вимірювальні цикли, можна також запропонувати блок-схему алгоритму визначення  $K_2$  і вологості хліба, але

визначення коефіцієнта відносного приросту уявної складової струму чутливого елемента необхідно здійснювати за виразом (3.52).

### 3.5. Структурна побудова вологомірів м'якушки хліба

Реалізація розробленого алгоритму (рис.3.13) передбачає наявність двох генераторів 1 і 2 з вихідними сигналами  $f_1$  і  $f_2$ , які за допомогою комутаційного пристрою під'єднуються до первинного вимірювального перетворювача через узгоджувальні пристрої 3 і 4, як при порожньому, так і при заповненому ємнісному чутливому елементі (рис.3.19).

Для реалізації резонансного методу заміщення первинний вимірювальний перетворювач 6 повинен мати зразковий конденсатор 7. До того ж, щоб одержати інформативний параметр – частоту, необхідно доповнити вимірювальний перетворювач допоміжним генератором 8.

Отримані з виходу первинного вимірювального перетворювача аналогові величини  $U_{вих}$  і  $f_D$  перетворюються аналого-цифровим перетворювачем 9 у цифровий код, що фіксується в оперативному запам'ятовувальному пристрої мікроконтролера 10. По команді із пристрою керування 11 інформація обробляється в 10 і результати виводяться на його індикаторний пристрій.

Для реалізації амплітудно-фазового методу виміру, як і в попередньому випадку необхідні генератори 1 і 2 (рис.3.20) для одержання вхідних напруг із частотами  $f_1$  і  $f_2$ . Необхідний комутатор 3 для почергового під'єднання цих напруг до вимірювального перетворювача 4. Для виконання умови  $U_{GC} = const$ , необхідно застосовувати автоматичний регулятор підсилення 5 напруг генераторів 1 і 2. Вихідні параметри  $U_0$  і  $\varphi$  вимірювальний перетворювач виміряються вольтметром 6 і фазометром 7. Результати цих вимірів у вигляді аналогових сигналів надходять на вхід аналого-цифрового перетворювача 8, де перетворюються в цифровий код, що використовується в мікроконтролері 9. За командою з пристрою керування 10 інформація обробляється в 9 і результат виводиться на індикатор.

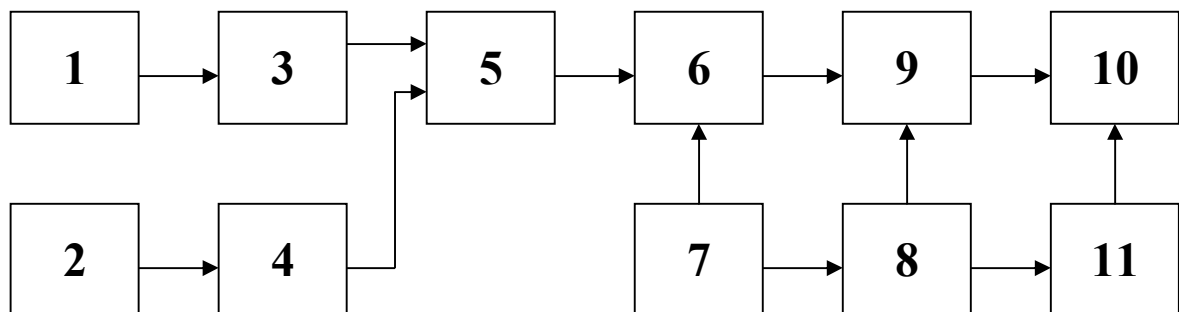


Рис.3.19. Структурна схема резонансного вологоміра

Реалізація розробленого алгоритму (рис.3.18) передбачає також наявність двох генераторів гармонічних коливань з вихідними сигналами  $f_1$  і  $f_2$ , оскільки в основу побудови засобу контролю вологості покладений двочастотний метод

визначення вологості. Головним елементом засобу контролю вологості є первинний перетворювач, в якому інформація про вологість перетворюється в пропорційний електричний сигнал [73,152]. Аналогові гармонічні сигнали  $U_{Г1}$  і  $U_{Г2}$  з частотами  $f_1$  і  $f_2$  відповідно за допомогою комутатора К1 мають по черзі подаватись на первинний перетворювач ПП, що утворений послідовно з'єднаними зразковим та чутливим елементом емнісного типу, в якому знаходиться досліджуваний зразок хліба. Інформативні параметри: напруга

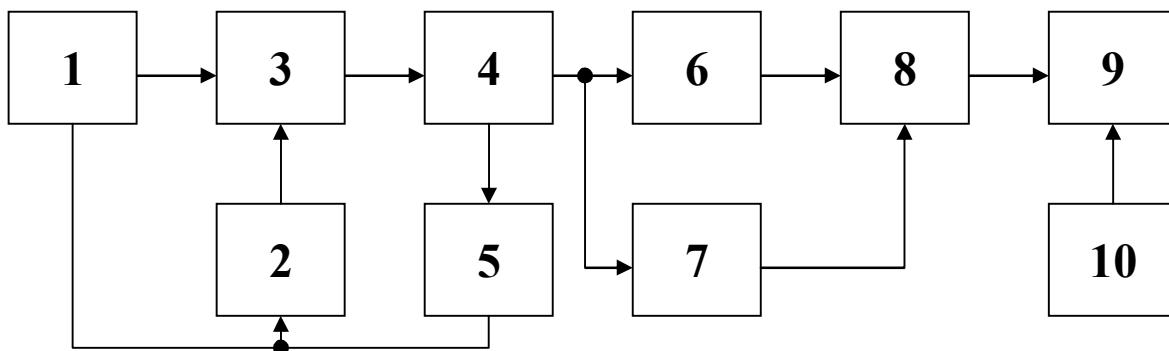


Рис.3.20. Структурна схема амплітудно-фазового вологоміра

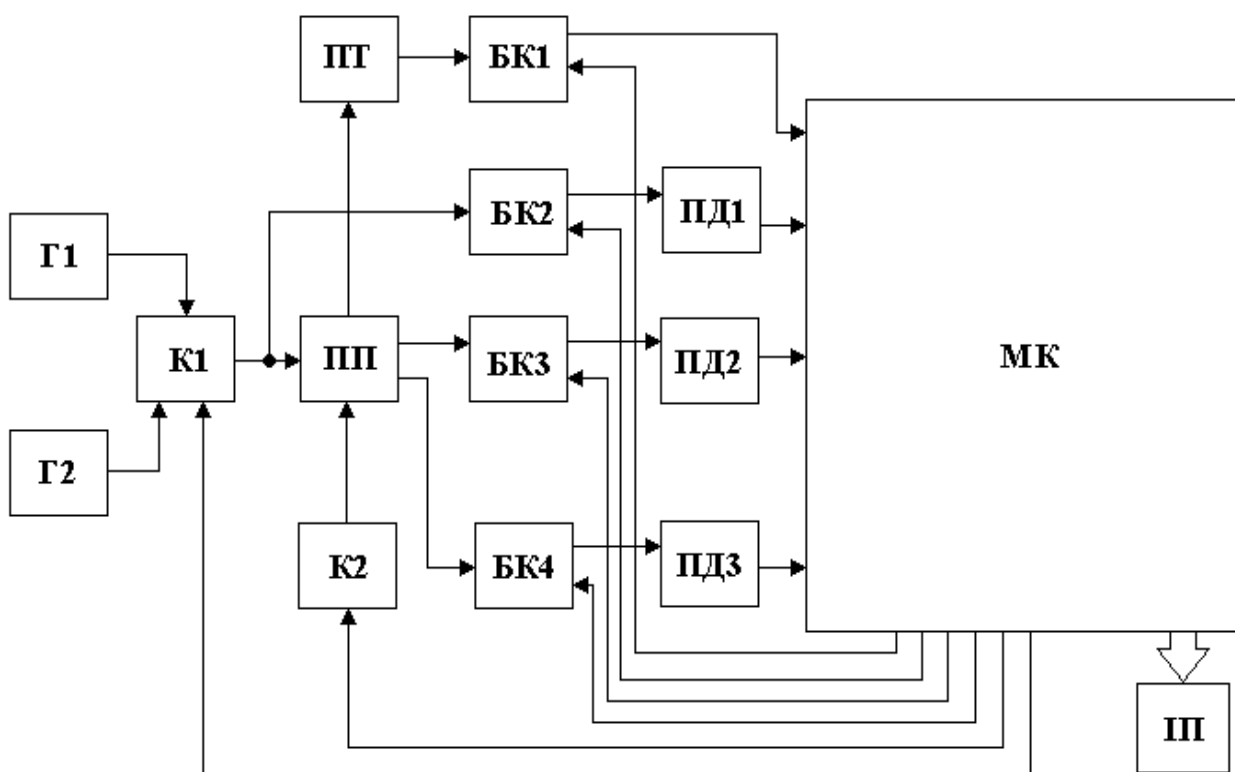


Рис.3.21. Структурна схема засобу контролю вологості хліба із мікроконтролером

генератора  $U_{Г}$ , напруга зразкового елемента  $U_3$  та напруга чутливого елемента  $U_{ЧЕ}$  через буферні каскади БК мають поступати на пікові детектори ПД, де

виділяються амплітуди цих сигналів, які і мають опрацьовуватись в подальшому мікроконтролером.

Для усунення похибки засобу контролю за рахунок зміни температури навколишнього середовища необхідно до його структурної схеми включити перетворювач температури ПТ, інформація з якого у вигляді рівня напруги має поступати на мікроконтролер.

Для виконання операції встановлення “нуля” необхідно в ПП передбачити коло імітації порожнього чутливого елемента і вмикати його комутатором К2.

З врахуванням приведених міркувань, структурна схема засобу контролю вологості хліба приведена на рис.3.21.

### 3.6. Розробка рівняння градуювання вологоміра м'якушки хліба і перевірка його адекватності

Вихідними даними є результати експериментальної залежності кутів нахилу  $\alpha_\varepsilon$  і  $\alpha_I$ , характеристик  $\varepsilon'(f)$  (2.14) і  $I_C(f)$  (2.15) від значення вологості контрольованого матеріалу.

Таблиця 3.1

Данні градуювання вимірювачів вологості м'якушки хлібобулочних виробів

№ п/п	1 МГц							
	$Z_{02.П},$ пФ	$Z_{02.М},$ пФ	$C_{д.П},$ пФ	$C_{д.М},$ пФ	$Q_{П}$	$Q_{М}$	$\varepsilon'$	$I_C,$ мкА
1	267	218	12,5	735	188	49,5	58,79	5,88
2	267	210	12,5	855	188	41	68,39	6,84
3	267	237	12,5	450	188	47	35,99	3,6
4	267	247	12,5	300	188	75	24	2,4
5	267	226	12,5	615	188	81	49,2	4,92
6	267	225	12,5	630	188	59,5	50,4	5,04
7	267	236	12,5	435	188	65,5	37,2	3,72

Продовження табл.3.1

№ п/п	3 МГц								$\alpha_\varepsilon,$ °	$\alpha_I,$ °	$W,$ %
	$Z_{02.П},$ пФ	$Z_{02.М},$ пФ	$C_{д.П},$ пФ	$C_{д.М},$ пФ	$Q_{П}$	$Q_{М}$	$\varepsilon'$	$I_C,$ мкА			
1	304	266	12,5	524,4	79	13,6	41,87	4,19	82,23	83,25	48,2
2	304	261	12,5	593,4	79	11,1	47,33	4,73	84,34	84,58	48,4
3	304	288	12,5	207,8	79	17,5	18,2	1,82	83,62	83,58	48,3
4	304	289	12,5	207	79	26,6	16,55	1,66	74,95	74,88	46,2
5	304	267	12,5	510	79	24,6	40,83	4,08	76,53	76,61	46,6
6	304	268	12,5	483	79	15,2	38,59	3,86	80,35	80,38	47,5
7	304	279	12,5	345	79	19,8	27,58	2,76	78,23	78,23	47,1

Вимір значень вологості вироблялося термогравіметричним методом з використанням лабораторних ваг ВЛА-200 відповідно до ГОСТ 8.432-81 [94]. Результати експериментів зведені в таблицю 3.1.

Аналізуючи таблицю 3.1 можна стверджувати, що кути  $\alpha$  практично не залежать від пористості хліба, тоді як ємність чутливого елемента  $C_{\delta}$ , діелектрична проникність  $\varepsilon'$ , струм  $I_C$  залежать дуже сильно, причому, залежність настільки сильна, що зовсім спотворює результат виміру (досліди 1 і 3). Варто звернути увагу, що кути  $\alpha_{\varepsilon}$  і  $\alpha_I$  практично рівні, це пояснюється тим, що обоє в основі визначення мають ємність чутливого елемента з матеріалом  $C_{\delta.M}$ .

В якості апроксимувальної функції для обох залежностей вибираємо поліном виду:

$$y = a_0 + a_1U + a_1U^2 + \dots + a_mU^m. \quad (3.54)$$

Судячи з характеру розподілу експериментальних точок на рис.3.22, рис.3.23, можна припустити, що рівняння апроксимації буде другого ступеня з малою відмінністю від лінійного. Тому рівняння прийме вид:

$$y_1 = a_0 + a_1U + a_2U^2. \quad (3.55)$$

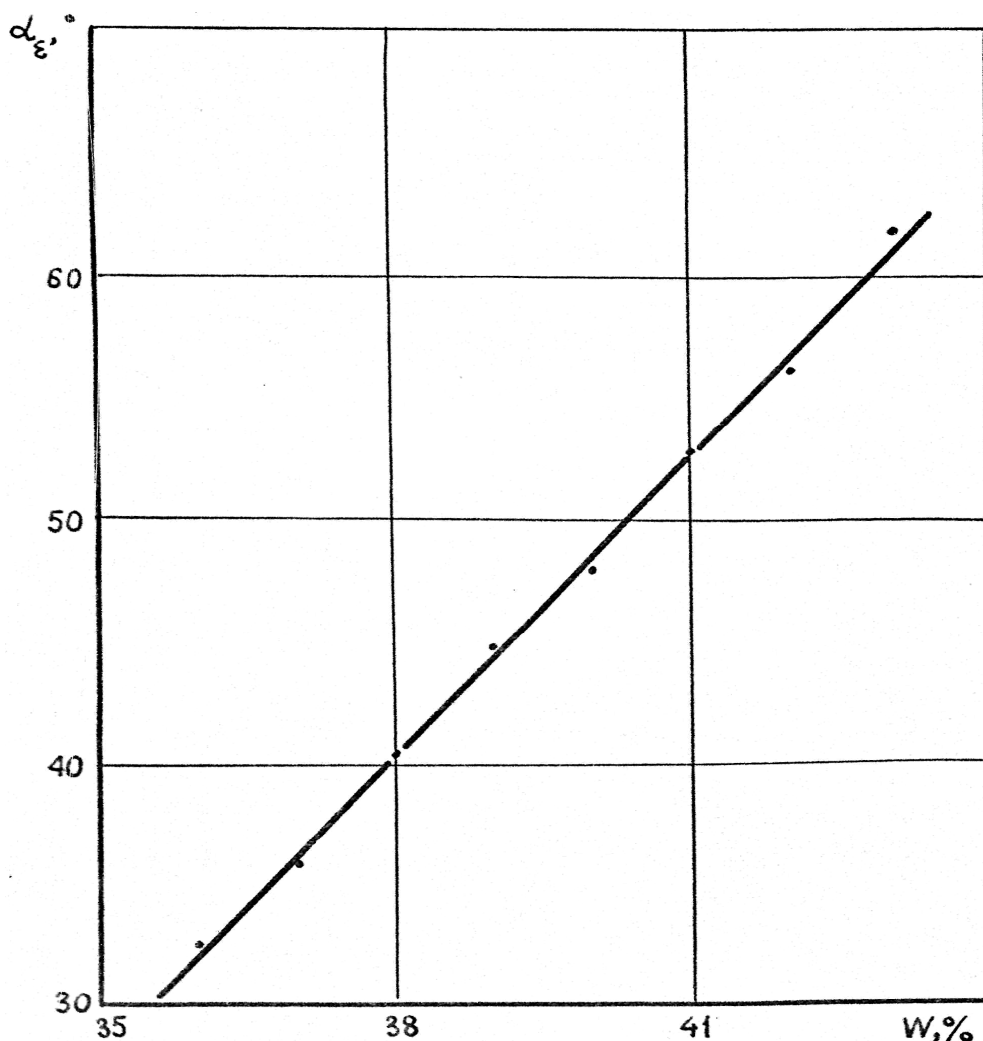


Рис.3.22. Експериментальна залежність  $\alpha_{\varepsilon'}(W)$

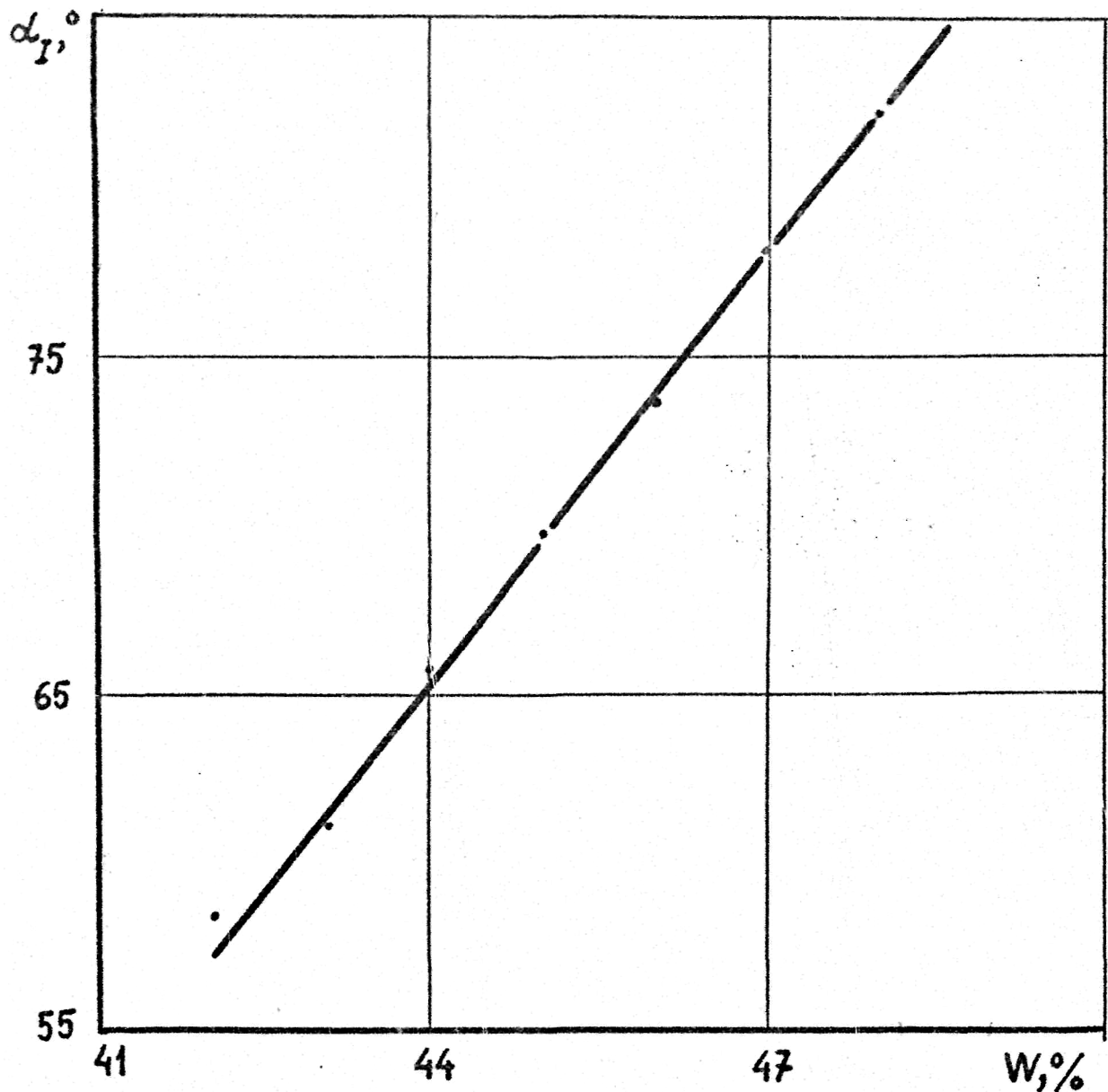


Рис.3.23. Експериментальна залежність  $\alpha_1(W)$

Скористаємося методом найменших квадратів [30]. Для цього обчислимо функцію  $\Phi$ , яка дорівнює:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 U_i + a_2 U_i^2)]^2. \quad (3.54)$$

і визначимо значення коефіцієнтів  $a_0, a_1, a_2$ , при яких вона досягає мінімуму.

Представимо вираз (3.54) у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \Phi = & n a_0^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 + (a_1^2 + 2 a_0 a_2) \sum_{i=1}^n U_i^2 + a_1^2 \sum_{i=1}^n U_i^2 + 2 a_0 a_1 \sum_{i=1}^n U_i + \\ & + 2 a_1 a_2 \sum_{i=1}^n U_i^3 - 2 a_0 \sum_{i=1}^n y_i - 2 a_1 \sum_{i=1}^n y_i U_i - 2 a_2 \sum_{i=1}^n y_i U_i^2. \end{aligned}$$

Функція  $\Phi$  досягне мінімуму, якщо її часткові похідні за коефіцієнтом будуть дорівнювати нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial a_0} &= 2na_0 + 2a_2 \sum_{i=1}^n U_i^2 + 2a_1 \sum_{i=1}^n U_i - 2 \sum_{i=1}^n y_i = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_1} &= 2a_1 \sum_{i=1}^n U_i^2 + 2a_0 \sum_{i=1}^n U_i + 2a_2 \sum_{i=1}^n U_i^3 - 2 \sum_{i=1}^n y_i U_i = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial a_2} &= 2a_0 \sum_{i=1}^n U_i^2 + 2a_2 \sum_{i=1}^n U_i^4 + 2a_1 \sum_{i=1}^n U_i^3 - 2 \sum_{i=1}^n y_i U_i^2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.55)$$

Спростуючи отриманий вираз (3.55), одержимо

$$\left. \begin{aligned} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n U_i + a_2 \sum_{i=1}^n U_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n U_i + a_1 \sum_{i=1}^n U_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n U_i^3 &= \sum_{i=1}^n y_i U_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n U_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n U_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n U_i^4 &= \sum_{i=1}^n y_i U_i^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

Використовуючи данні таблиці 3.1 і ввівши позначення:

$$\begin{aligned} W_i &= y_i, \quad \alpha_i = U_i, \quad \sum_{i=1}^n U_i = A, \\ \sum_{i=1}^n U_i^2 &= B, \quad \sum_{i=1}^n U_i^3 = C, \quad \sum_{i=1}^n U_i^4 = D, \\ \sum_{i=1}^n y_i &= E, \quad \sum_{i=1}^n y_i U_i = M, \quad \sum_{i=1}^n y_i U_i^2 = H, \end{aligned}$$

представимо систему (3.56) у наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} na_0 + Aa_1 + Ba_2 &= E, \\ Aa_0 + Ba_1 + Ca_2 &= M, \\ Ba_0 + Ca_1 + Da_2 &= H. \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

Коефіцієнти апроксимувальної функції визначаються з наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{E(BD - C^2) + A(CH - DM) + B(ME - DH)}{n(BD - C^2) + A(BC - AD) + B(AC - B^2)}, \\ a_1 &= \frac{n(DM - CH) + E(BC - AD) + B(AH - BM)}{n(BD - C^2) + A(BC - AD) + B(AC - B^2)}, \\ a_2 &= \frac{n(BH - CM) + A(CE - AH) + B(AM - BE)}{n(BD - C^2) + A(BC - AD) + B(AC - B^2)}. \end{aligned}$$

При апроксимації функцією виду  $y_2 = b_1 U + b_2 U^2$  вчинивши аналогічно, одержимо



$$b_1 = \frac{DM - CH}{BD - C^2}, \quad b_2 = \frac{BH - MC}{BD - C^2}.$$

При апроксимації функцією виду  $y_3 = c_0 + c_1U$ , одержимо:

$$c_0 = \frac{BE - AM}{nB - A^2}, \quad c_1 = \frac{nM - AE}{nB - A^2}.$$

Значення коефіцієнтів  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, c_0, c_1$  визначені за допомогою ЕОМ. Отримані результати дозволяють остаточно записати рівняння апроксимації:

$$y_1 = 6,54 + 0,79U - 0,004U^2, \quad (3.58)$$

$$y_2 = 0,95U - 0,004U^2, \quad (3.59)$$

$$y_3 = 28,63 + 0,235U, \quad (3.60)$$

Встановимо ступінь їхньої адекватності за значеннями середньо-квадратичного відхилення значень  $y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}$  отриманих з виразів (3.58) – (3.60) і відповідних їм експериментальних результатів, наявних у таблиці 3.1.

Для першого випадку

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_{e.i})^2} = 0,2136. \quad (3.61)$$

Для другого випадку  $\sigma_2 = 0,0588$ .

Для третього випадку  $\sigma_3 = 0,0445$ .

Оскільки  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  можна припустити, що рівнянням градування може бути вираз (3.60).

Виходячи з того, що  $y$  – вологість, а  $U$  – кут нахилу характеристик  $\varepsilon'(f)$  і  $I_C(f)$ , рівняння (3.60) приймає вид:

$$W = 28,63 + 0,235\alpha. \quad (3.62)$$

З огляду на вираз (2,14), (3.15) і (3.16), представимо вираз (3.62) через інформативні параметри вимірювального перетворювача для випадку резонансного методу заміщення:

$$W = 28,63 + 0,235 \times \frac{\frac{m_f}{m_\varepsilon} \sqrt{\frac{\left(\frac{f_{2Д1}^2 - f_{1Д1}^2}{4\pi L_2 C_0 f_{1Д1}^2 f_{2Д1}^2} + 1\right)^2}{1 + \left(\frac{1}{U_{вих.М1}} - \frac{1}{U_{вих.П1}}\right)^2}}}{f_2 - f_1} - \frac{\sqrt{\frac{\left(\frac{f_{2Д2}^2 - f_{1Д2}^2}{4\pi L_2 C_0 f_{1Д2}^2 f_{2Д2}^2} + 1\right)^2}{1 + \left(\frac{1}{U_{вих.М2}} - \frac{1}{U_{вих.П2}}\right)^2}}}{f_2 - f_1}. \quad (3.63)$$

Для амплітудно-фазового методу з врахуванням (2.15), (3.27)

$$W = 28,63 + 0,235 \left( \frac{m_f}{m_I} \frac{C_0 (U_{01} \omega_1 \cos \varphi_1 - U_{02} \omega_2 \cos \varphi_2)}{f_2 - f_1} \right). \quad (3.64)$$

Графік градування вологоміра показаний на рис.3.24.

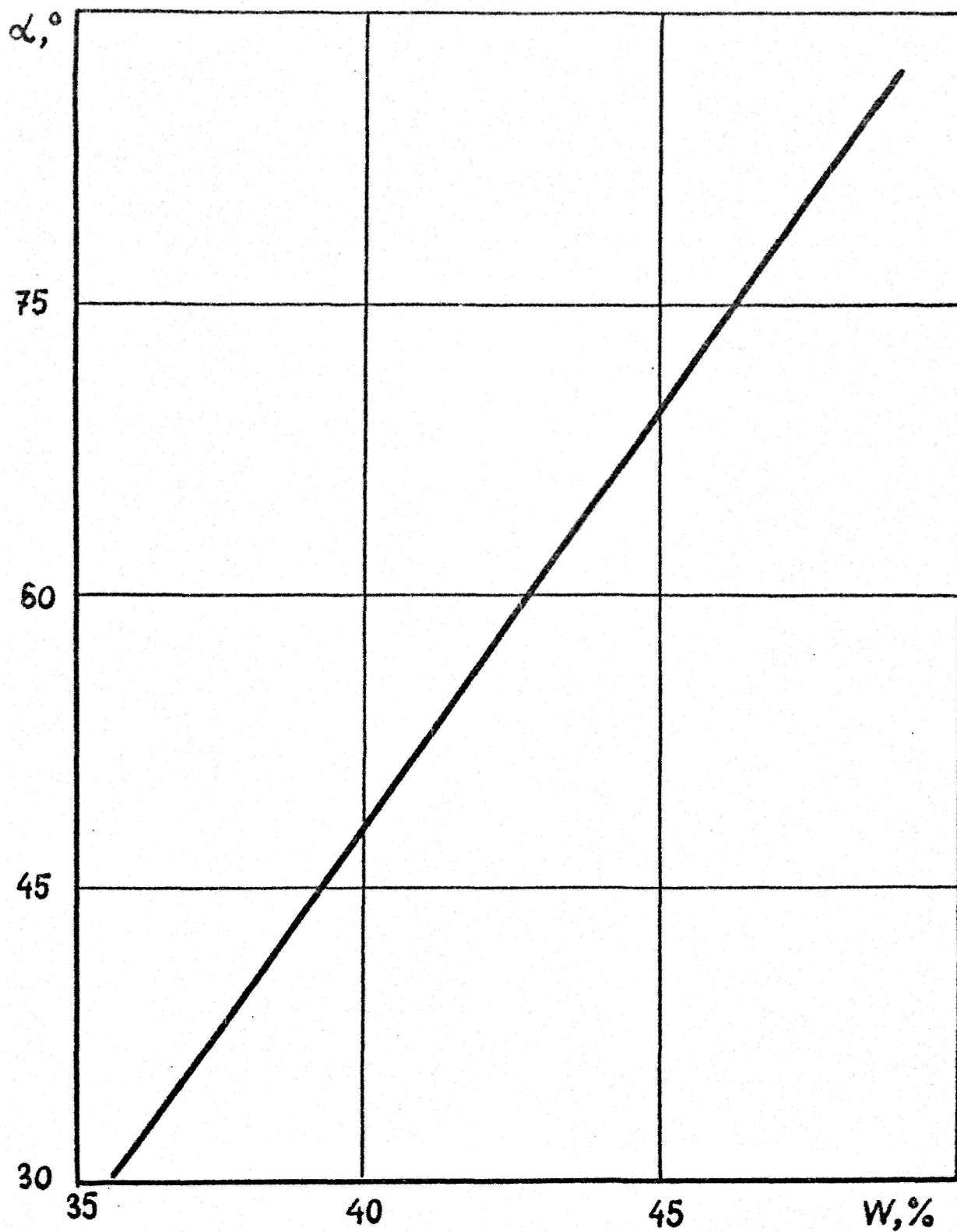


Рис.3.24. Графік градування вологоміра м'якушки хліба

## РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ПОХИБКИ І ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ХЛІБА

Результат виміру вологості м'якушки хліба буде залежати від багатьох заважальних факторів, основними з яких є: пористість м'якушки, нестабільність частот генераторів вхідної напруги, температурна нестабільність розмірів ємнісного чутливого елемента, нестабільність частот допоміжного генератора, нестабільність аналого-цифрового перетворювача. З огляду на всі ці фактори, необхідно визначити похибка виміру і її вплив на вірогідність контролю змісту повної вологи в м'якушці, провести виробничі випробування вологоміра і зрівняти розрахункові і експериментальні дані.

### 4.1. Розрахунок інструментальної похибки вимірювача вологості м'якушки хліба

Похибка виміру вологості буде функцією шести змінних:

$$\Delta W = f(\Delta P, \Delta f_1, \Delta f_2, \Delta C_\partial, \Delta f_D, \Delta A), \quad (4.1)$$

де  $\Delta P$  – мінливість пористості об'єкта дослідження;

$\Delta f_1$  – нестабільність частоти генератора 1 МГц;

$\Delta f_2$  – нестабільність частоти генератора 3 МГц;

$\Delta C_\partial$  – температурна нестабільність ємності чутливого елемента;

$\Delta f_D$  – нестабільність частоти додаткового генератора;

$\Delta A$  – похибка перетворення АЦП.

Перелічені фактори діють незалежно один від одного тому можна оцінити окремі похибки від кожного з них і визначити сумарну похибку виміру [68].

Використання двох каналів вимірювальної інформації (на частотах  $f_1$  і  $f_2$ ) практично дозволяє одержати незалежність результатів від пористості об'єкта. Тому заважальний фактор  $\Delta P$  можна виключити з рівняння (4.1). Остаточний вираз (4.1) прийме вид:

$$\Delta W = f(\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta C_\partial, \Delta f_D, \Delta A), \quad (4.2)$$

При оцінці сумарної похибки, крім перерахованих складових, необхідно враховувати вплив похибки градування.

4.1.1. Розрахунок похибки від нестабільності частоти генераторів вхідної напруги. Нестабільність напруги частоти генераторів вхідних напруг призведе до похибки контролю  $\varepsilon'_1$  і  $\varepsilon'_2$  (рис.4.1). Причому, найгірший випадок буде тоді, коли  $f_1$  одержить від'ємне збільшення, а  $f_2$  – додатне.

Отримане при цьому значення кута  $\alpha_1$  буде дорівнювати:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{m_f (\varepsilon'_1 + \Delta\varepsilon'_1) - (\varepsilon'_2 + \Delta\varepsilon'_2)}{m_\varepsilon (f_2 - f_1)}, \quad (4.3)$$

де  $\Delta\varepsilon'_1$  – збільшення  $\varepsilon'_1$  від збільшення частоти  $\Delta f_1$ ;

$\Delta\varepsilon'_2$  – збільшення  $\varepsilon'_2$  від збільшення частоти  $\Delta f_2$ .

Значення кута  $\alpha$  при відсутності заважальних факторів  $\Delta f_1$  і  $\Delta f_2$  може бути знайдене з виразу (2.14).

Оскільки в генераторах вхідної напруги застосована кварцова стабілізація, відносна нестабільність їхньої частоти становить  $10^{-5}$ . Абсолютне відхилення частот у заданому температурному діапазоні  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$  буде дорівнювати:

- для генератора 1 МГц –  $\Delta f_1 = 10$  Гц;
- для генератора 3 МГц –  $\Delta f_2 = 30$  Гц.

Із трикутника АВС (рис.4.1) знаходимо катет ВС для двох граничних значень

$$\alpha = \begin{cases} 70^\circ \\ 87^\circ \end{cases}$$

Значення катета ВР при цьому будуть рівні:

$$\begin{aligned} \text{ВР}_{70} &= 5,4951747, \\ \text{ВР}_{87} &= 36,1633. \end{aligned}$$

Якби частоти напруг генераторів  $f_1$  і  $f_2$  вимірялися в процесі роботи вологоміра, то похибка би від цього параметра була відсутня. Але оскільки частоти ці приймаються незмінними, то у виразах (2.14) і (4.3) знаменники однакові, а тому виникає похибка від нестабільності частот вхідних генераторів.

При цьому значення граничних кутів будуть рівні:

$$\alpha_{1.\min} = 70,000736^\circ, \quad \alpha_{1.\max} = 87,000119^\circ.$$

Збільшення кута  $\alpha_{1.\min}$  більше, тому його і візьмемо до уваги при подальших обчисленнях.

Значення  $\alpha_1$  і  $\alpha$  підставляємо у вираз (3.26) і одержимо:

$$W_1 = 45,088873\%, \quad W = 45,0777\%.$$

Знаходимо абсолютну похибка від нестабільності частоти вхідних генераторів:

$$\Delta W_{\Delta f_{1,2}} = W_1 - W = 1,103 \cdot 10^{-2}\%.$$

4.1.2. Розрахунок похибки від температурної нестабільності ємності чутливого елемента. Нестабільність ємності обумовлена в основному зміною розмірів конструктивних елементів ємнісної комірки (рис.4.2), електроди якої виготовлені з мідної фольги.

З огляду на вираз (3.5), рис.3.1 і 4.1, можна записати:

$$C + \Delta C = \varepsilon_0 \frac{l + \Delta l}{\pi} \ln \left( \frac{8(b + \Delta b)}{H + \Delta H} + 1 \right), \quad (4.4)$$

де  $\Delta C$  – збільшення ємності чутливого елемента;

$\Delta l$  – збільшення довжини електрода чутливого елемента;

$\Delta b$  – збільшення ширини електрода чутливого елемента;

$\Delta H$  – збільшення міжелектродної відстані.

Із врахуванням того, що конструктивні розміри чутливого елемента наступні:  $l = 25$ ,  $b = 8$ ,  $H = 4$ , а коефіцієнт лінійного розширення міді  $\mu = 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$  [37], використовуючи вираз (4.4), знаходимо:

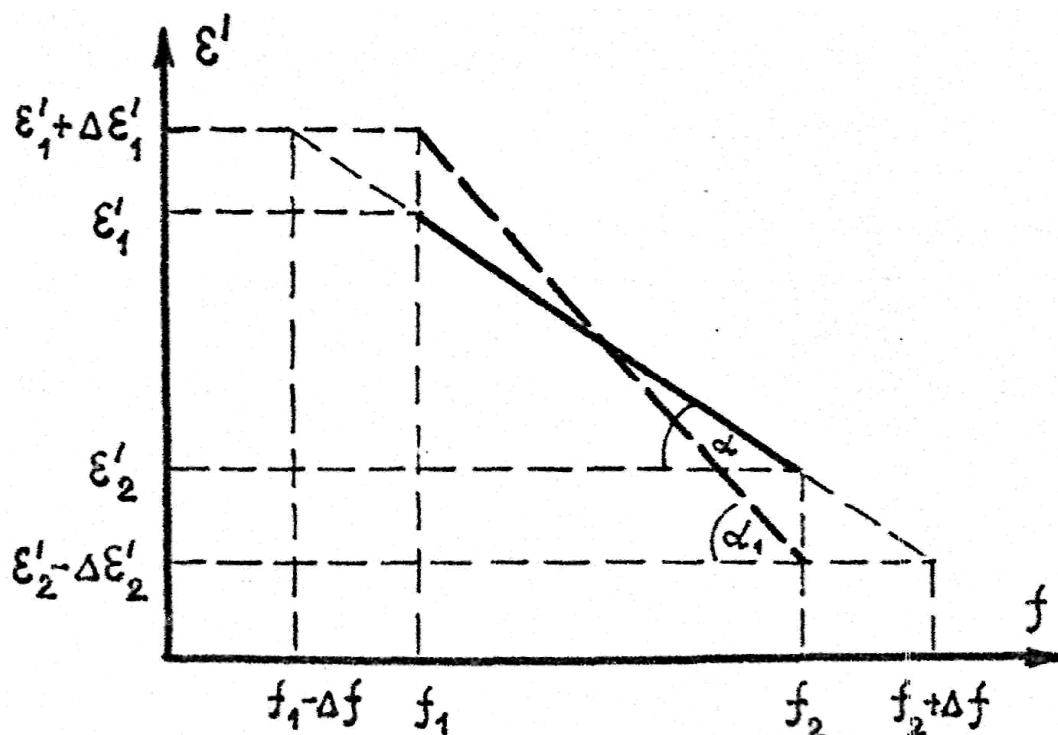


Рис.4.2. До розрахунку похибки від нестабільності генераторів

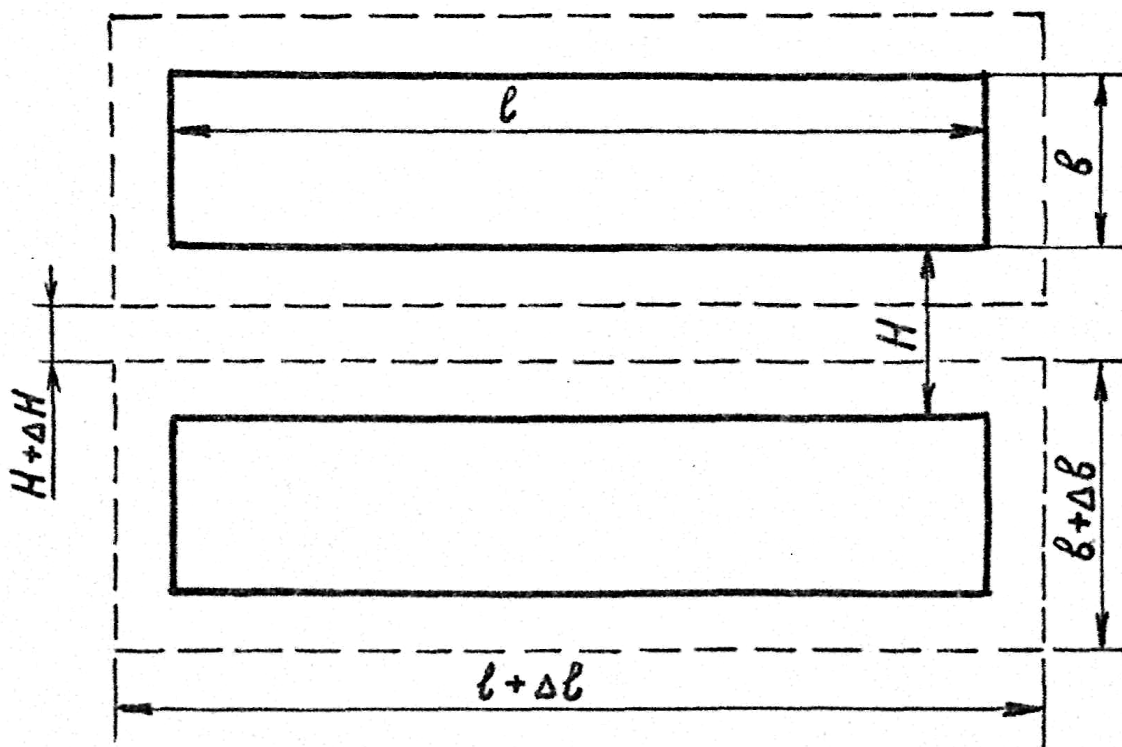


Рис.4.3. До розрахунку похибки від температурної нестабільності розмірів давача

$$\Delta C = 1,996 \cdot 10^{-12} \Phi.$$

Таке збільшення ємності призводить до збільшення кута  $\alpha$ :

$$\Delta \alpha = 0,064^\circ.$$

Для випадку  $\alpha_{\min} = 70^\circ$

$$\alpha_1 = 70,064^\circ.$$

Абсолютна похибка, як і в попередньому випадку, знаходиться, як різниця між  $W_1$  і  $W$ :

$$\Delta W_{\Delta C_0} = W_1 - W = 1,504 \cdot 10^{-2}\%.$$

4.1.3. Розрахунок похибки від нестабільності частоти допоміжного генератора. Допоміжний генератор є LC-автогенератором із трансформаторним зворотним зв'язком. Відносна нестабільність його частоти становить  $0,5 \cdot 10^{-3}$ .

Знаходимо значення  $L_2$ , скориставшись виразом (3.10) даними таблиці 3.1 і, прийнявши  $f_{1Д1} = 100$  кГц для випадку, коли вхідна напруга має частоту 1 МГц:

$$L_2 = \frac{1}{4\pi^2 C_{02.П} f_{1Д}^2} = 9,487 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (4.5)$$

При цьому значення  $f_{2Д}$  для зразка вологістю 46,2% буде дорівнює:

$$f_{2Д1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_{02.М}}} = 103969,8 \text{ Гц.}$$

Аналогічно знаходимо частоти  $f_{1Д}$  і  $f_{2Д}$  для випадку, коли частота вхідної напруги перетворювача дорівнює 3 МГц:

$$f_{1Д2} = 83717,111 \text{ Гц, } f_{2Д2} = 96118,457 \text{ Гц.}$$

При зазначеній нестабільності значення частот допоміжного генератора будуть рівні

$$\begin{aligned} f_{1Д1} &= 100000 \pm 5,0 \text{ Гц, } f_{1Д2} = 93717,1 \pm 4,7 \text{ Гц,} \\ f_{2Д1} &= 103969,8 \pm 5,2 \text{ Гц, } f_{2Д2} = 96118,4 \pm 4,8 \text{ Гц.} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Підставивши значення (4.6) у формулу (3.15), скориставшись виразами (3.16), (2.13) і даними таблиці 3.1, можна визначити значення діелектричної проникності м'якушки на частотах 1 і 3 МГц для випадків додатного і від'ємного збільшення частот допоміжного генератора:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{1М-} &= 28,98; & \varepsilon'_{2М-} &= 21,98; \\ \varepsilon'_{1М+} &= 29,02; & \varepsilon'_{2М+} &= 22,01. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Кут  $\alpha$  для від'ємного і додатного збільшень частот:

$$\alpha_- = 74,05^\circ; \quad \alpha_+ = 74,07^\circ.$$

Використовуючи вираз (3.26), знаходимо значення вологостей при додатному і від'ємному збільшенні частот допоміжного генератора:

$$W_+ = 46,03415\%; \quad W_- = 46,02945\%.$$

Для гіршого випадку абсолютна похибка буде дорівнювати

$$\Delta W_{\Delta f_D} = 0,13415\%.$$

4.1.4. Розрахунок похибки, внесеної аналого-цифровим перетворювачем. В якості аналого-цифрового перетворювача у вологомірі м'якушки хліба використана ІМС ICL7107CPL, фірми "Intersil Inc.", США, похибка перетворення якої дорівнює 0,01% [30].

Ця похибка призводить до збільшення кута  $\alpha$ , що визначаємо з використанням даних таблиці 3.1, виразів (3.12), (3.16) і (2.14).

Максимальне значення  $\alpha_m$  при цьому дорівнює:

$$\alpha_m = 86,1999^\circ.$$

Використовуючи вираз (3.26), знаходимо значення вологості, що відповідає  $\alpha_m$ :

$$W_m = 48,884677\%.$$

Абсолютна похибка, внесена аналого-цифровим перетворювачем, дорівнює:

$$\Delta W_{\Delta A} = 2,3 \cdot 10^{-2}\%.$$

Градування приладу виконане арбітражним методом із похибкою  $\Delta W_{\Gamma} = 0,01\%$ .

Сумарна абсолютна похибка від всіх факторів, що заважають, дорівнює:

$$\Delta W = \sqrt{\Delta W_{\Delta f_{1,2}}^2 + \Delta W_{\Delta C_D}^2 + \Delta W_{\Delta f_D}^2 + \Delta W_{\Delta A}^2 + \Delta W_{\Gamma}^2} = 0,18\%.$$

## 4.2. Перевірка збіжності дослідних розподілів з теоретичними

З генеральної сукупності результатів виміру вологості м'якушки хліба, отриманих термогравіметричним методом, узята вибірка із тридцяти значень. Побудовано варіаційний ряд значень вологості (табл.4.1) і висунута гіпотеза про нормальний закон їхнього розподілу.

Перевірку ступеня згоди досвідченого розподілу з теоретичним необхідно робити за допомогою "критерію  $\nu$ " за методикою [79].

Вихідні дані для розрахунку зведені в табл.4.1.

Обчислюємо характеристики

$$\nu^2 = \sum_{i=1}^n W_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n W_i \right)^2 = 67841,65 - 67830,07 = 11,58,$$

$$\chi^2 = \left\{ \sum_{j=1}^l a_{n-j+1} (W_{n-j+1} - W_i) \right\}^2 = 12,52.$$

Звідси експериментальне значення критерію

$$\nu_e = \frac{\chi^2}{\nu^2} = 1,082.$$

Задавшись рівнем значимості  $\eta = 0,05$  за таблицею 9 [79] визначаємо теоретичне значення критерію:

Данні для розрахунку ймовірнісно-статистичних характеристик об'єкта контролю

№ п/п	$W_i, \%$	$j$	$a_{n-j+1}$	$W_{n-j+1} - W_i$	$a \cdot \Delta W$
1	46,6				
2	46,6				
3	46,6				
4	46,8				
5	46,9				
6	46,9				
7	46,9				
8	47,0				
9	47,0				
10	47,0				
11	47,1				
12	47,4				
13	47,4				
14	47,4				
15	47,4				
16	47,5	15	0,0076	0,1	0,00076
17	47,7	14	0,0227	0,3	0,00681
18	47,7	13	0,0381	0,3	0,01143
19	47,8	12	0,0537	0,4	0,02148
20	47,9	11	0,0697	0,8	0,05576
21	48,1	10	0,0862	1,1	0,09482
22	48,2	9	0,1036	1,2	0,12432
23	48,2	8	0,1219	1,2	0,14628
24	48,2	7	0,1415	1,3	0,18395
25	48,3	6	0,1630	1,4	0,2282
26	48,3	5	1,1887	1,5	0,2765
27	48,3	4	0,2148	1,5	0,3222
28	48,4	3	0,2487	1,8	0,44766
29	48,4	2	0,2944	1,8	0,52992
30	48,5	1	0,4254	1,9	0,80826

$$v_T = \left\{ \begin{array}{l} \eta = 0,5 \\ n = 30 \end{array} \right\} = 0,927.$$

Оскільки  $v_e > v_T$ , можна припустити, що гіпотеза справедлива і дослідний розподіл значень вологості м'якушки хліба не суперечить нормальному закону.



Виконаємо тридцять вимірів вологості того самого зразка м'якушки хліба і одержимо варіаційний ряд випадкових результатів і вихідні дані для розрахунку (табл.4.2).

Таблиця 4.2

Данні для розрахунку ймовірнісно-статистичних характеристик вологоміра м'якушки хліба

№ п/п	$W_i, \%$	$j$	$a_{n-j+1}$	$W_{n-j+1} - W_i$	$a \cdot \Delta W$
1	48,05				
2	48,05				
3	48,06				
4	48,06				
5	48,08				
6	48,09				
7	48,10				
8	48,12				
9	48,14				
10	48,15				
11	48,16				
12	48,18				
13	48,19				
14	48,19				
15	48,21				
16	48,23	15	0,0076	0,02	0,000152
17	48,23	14	0,0227	0,04	0,000908
18	48,24	13	0,0381	0,05	0,001905
19	48,24	12	0,0537	0,06	0,003222
20	48,25	11	0,0697	0,09	0,006272
21	48,26	10	0,0862	0,11	0,009482
22	48,27	9	0,1036	0,13	0,013468
23	48,29	8	0,1219	0,17	0,020723
24	48,30	7	0,1415	0,20	0,028300
25	48,31	6	0,1630	0,22	0,035860
26	48,31	5	0,1870	0,23	0,043010
27	48,32	4	0,2148	0,26	0,055848
28	48,33	3	0,2487	0,27	0,067149
29	48,34	2	0,2944	0,29	0,085376
30	48,35	1	0,4254	0,30	0,127620

Обчислюємо характеристики для вологоміра

$$v_{\epsilon}^2 = \sum_{i=1}^n W_{i\epsilon}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n W_{i\epsilon} \right)^2 = 69707,05 - 69706,84 = 0,21,$$

$$\chi_{\epsilon}^2 = \left\{ \sum_{j=1}^l a_{n-j+1} (W_{n-j+1} - W_i) \right\}^2 = 0,25.$$

Експериментальне значення критерію для вологоміра

$$v_{\epsilon\epsilon} = \frac{\chi_{\epsilon}^2}{v_{\epsilon}^2} = 1,19.$$

При рівні значимості  $\eta = 0,05$  теоретичне значення критерію  $v_{TB} = 0,927$ .

Оскільки  $v_{\epsilon\epsilon} > v_{TB}$ , можна припустити, що гіпотеза справедлива і дослідний розподіл значень вологості м'якушки хліба, обмірюваних вологоміром, не суперечить нормальному закону.

### 4.3. Обґрунтування допустимої похибки засобів контролю вологості хліба

Одним із найважливіших питань, що виникають перед розроблювачами і користувачами засобів контролю, є питання необхідної точності вимірів. Знання оптимальної точності позбавляє від необхідності застосовувати дорогу високоточну вимірювальну апаратуру. Рішення оптимізації вибору засобів контролю в кожному окремому випадку вимагає індивідуального підходу, заснованого на ретельному дослідженні об'єкта контролю.

Дослідження проведемо на прикладі випадкової вибірки з генеральної послідовності значень вологості м'якушки хліба (табл.4.3). Використовуючи дані табл.4.3, визначаємо середньоквадратичне відхилення для вибірки з 30 значень:

$$\sigma_x = M_k \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} = 0,628.$$

У даній формулі  $M_k = 1,008$  – коефіцієнт значимості, значення якого знаходимо з табл.4 [79].

Визначаємо довірчий інтервал при двосторонній довірчій імовірності  $p = 0,95$  і відповідному їй коефіцієнту довіри  $t_{\gamma} = 2,045$  [79]:

$$\bar{W} \pm t_{\gamma} \sigma_x = (47,55 \pm 1,28)\%.$$

Таким чином, із ймовірністю  $p = 0,95$  контрольоване значення вологості м'якушки хліби буде перебувати в межах:

$$W_H = 46,27\%, \quad W_B = 48,83\%.$$

Оскільки значення допустимої середньоквадратичної похибки вимірювача вологості [38] дорівнює:

$$\sigma'_{\epsilon} = \frac{\sigma_x}{2} = \frac{0,628}{2} = 0,314.$$

Дані для розрахунку ймовірностно-статистичних характеристик об'єкта контролю

№ п/п	$W_i, \%$	$\bar{W}, \%$	$W_i - \bar{W}$	$(W_i - \bar{W})^2$	$\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2$	$\sigma_x$
1	46,6	47,55	-0,95	0,9025	11,575	0,628
2	46,6		-0,95	0,9025		
3	46,6		-0,95	0,9025		
4	46,8		-0,75	0,5625		
5	46,9		-0,65	0,4225		
6	46,9		-0,65	0,4225		
7	46,9		-0,65	0,4225		
8	47,0		-0,55	0,3025		
9	47,0		-0,55	0,3025		
10	47,0		-0,55	0,3025		
11	47,1		-0,45	0,2025		
12	47,4		-0,15	0,0225		
13	47,4		-0,15	0,0225		
14	47,4		-0,15	0,0225		
15	47,4		-0,15	0,0225		
16	47,5		-0,05	0,0025		
17	47,7		0,15	0,0225		
18	47,7		0,15	0,0225		
19	47,8		0,25	0,0625		
20	47,9		0,35	0,1225		
21	48,1		0,55	0,3025		
22	48,2		0,65	0,4225		
23	48,2		0,65	0,4225		
24	48,2		0,65	0,4225		
25	48,3		0,75	0,5625		
26	48,3		0,75	0,5625		
27	48,3		0,75	0,5625		
28	48,4		0,85	0,7225		
29	48,4		0,85	0,7225		
30	48,5		0,95	0,9025		

Дані для розрахунку ймовірностно-статистичних характеристик вологоміра

№ п/п	$W_i, \%$	$\bar{W}, \%$	$W_i - \bar{W}$	$(W_i - \bar{W})^2$	$\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2$	$\sigma_x$
1	48,05	48,20	-0,15	0,0225	0,2672	0,1
2	48,05		-0,15	0,0225		
3	48,06		-0,14	0,0196		
4	48,06		-0,14	0,0196		
5	48,08		-0,12	0,0144		
6	48,09		-0,11	0,0121		
7	48,10		-0,10	0,01		
8	48,12		-0,08	0,0064		
9	48,14		-0,06	0,0036		
10	48,15		-0,05	0,0025		
11	48,16		-0,04	0,0016		
12	48,18		-0,02	0,0004		
13	48,19		-0,01	0,0001		
14	48,19		-0,01	0,0001		
15	48,21		0,01	0,0001		
16	48,23		0,03	0,0009		
17	48,23		0,03	0,0009		
18	48,24		0,04	0,0016		
19	48,24		0,04	0,0016		
20	48,25		0,05	0,0025		
21	48,26		0,06	0,0036		
22	48,27		0,07	0,0049		
23	48,29		0,09	0,0081		
24	48,30		0,10	0,010		
25	48,31		0,11	0,0121		
26	48,31		0,11	0,0121		
27	48,32		0,12	0,0144		
28	48,33		0,13	0,0169		
29	48,34		0,14	0,0196		
30	48,35		0,15	0,0225		

і це значення більше отриманого  $\sigma_g = 0,1$  (табл.4.4), те з імовірністю  $p = 0,95$  показання такого вологоміра можна вважати достовірними.

#### 4.4. Оцінка впливу похибки контролю на вірогідність контролю

Вологість м'якушки хліба є випадковою величиною, що змінюється з імовірністю  $p = 0,95$  у межах 46,27% – 48,83%, причому відбраковування здійснюється відносного стандартного граничного значення  $W_c = 48,5\%$ . При  $W \leq W_c$  виріб вважається придатним, а при  $W > W_c$  – непридатним. У процесі відбраковування виникають помилки I і II роду [51,52,79,81].

Помилка I роду - визнання бракованим фактично придатного виробу.

Помилка II роду - визнання придатним фактично непридатного виробу.

У першому випадку ризикує виробник, у другому – споживач контрольованого виробу через помилку контролю [93].

Якщо відхилення вологості не перевищувало  $W_c$ , то не було б необхідності в її контролі. Але в нашому випадку може бути

$$W > W_c,$$

тому необхідно оцінити ризик і виробника і споживача.

Втрати виготовлювача пропорційні відносній кількості забракованих придатних виробів і його ризик  $R_{ep}$  характеризується ймовірністю того, що придатний виріб зізнається негідним. Ризик споживача  $R_{cn}$  характеризується ймовірністю того, що негідний виріб зізнається придатним і реалізується за вартістю придатного виробу.

При однобічному обмеженні придатності  $W_c = 48,5\%$  інтервал перевищення вимірюваної величини

$$\delta_3 = 48,83 - 48,5 = 0,33\%.$$

Використовуючи методику [81], і прийнявши

$$\delta_0 = 3\sigma_g = 0,288\%,$$

знаходимо відношення:

$$\frac{\delta_0}{\delta_3} = 0,87; \quad \frac{\sigma_x}{\delta_3} = 0,95.$$

за значеннями яких з рис.15 [81] знаходимо

$$R_{cn} = 0,02\%; \quad R_{ep} = 0,04\%.$$

Однією з кількісних характеристик вірогідності контролю є абсолютна вірогідність [71], що є імовірність прийняття вірного рішення:

$$D = 1 + P_{ном},$$

де  $P_{ном}$  – імовірність прийняття помилкового рішення при контролі, що дорівнює сумі ризиків виробника і споживача

$$P_{ном} = R_{cn} + R_{ep}.$$

При цьому одержуємо:

$$D = 1 - 0,06 = 0,94.$$

## Дані контрольних вимірів вологості м'якушки хліба

№ п/п	$W_i$ , %	$W_{вим}$ , %	$W_i - W_{вим}$	$(W_i - W_{вим})^2$	$\sum_{i=1}^n (W_i - W_{вим})^2$
1	47,1	47,35	-0,25	0,0625	1,6111
2	46,5	46,41	0,09	0,0081	
3	47,0	46,75	0,25	0,0625	
4	48,4	48,52	-0,12	0,0144	
5	48,2	48,31	-0,11	0,0121	
6	47,8	47,67	0,13	0,0169	
7	48,5	48,58	-0,08	0,0064	
8	46,6	46,79	-0,19	0,0361	
9	48,3	48,42	-0,12	0,0144	
10	48,0	47,81	0,19	0,0361	
11	47,7	47,97	-0,27	0,0729	
12	47,3	47,57	-0,27	0,0729	
13	47,6	47,47	0,13	0,0169	
14	47,2	46,84	0,36	0,1296	
15	47,5	47,35	0,15	0,0225	
16	46,6	46,77	-0,17	0,0289	
17	46,6	47,75	-0,15	0,0225	
18	47,0	47,25	-0,25	0,0625	
19	47,0	47,27	-0,27	0,0729	
20	47,4	47,63	-0,23	0,0529	
21	46,9	47,69	0,21	0,0441	
22	48,2	48,04	0,16	0,0256	
23	48,2	48,63	-0,43	0,1849	
24	47,7	47,81	-0,11	0,0121	
25	46,6	46,21	0,39	0,1521	
26	47,8	47,57	0,23	0,0529	
27	46,8	47,01	-0,21	0,0441	
28	47,5	47,11	0,39	0,1521	
29	47,1	46,76	0,34	0,1156	
30	47,0	47,06	-0,06	0,0036	

Одержані результати вказують на досить низькі ризики як виробника хлібобулочних виробів так і його споживача та підтверджують високу вірогідність контролю запропонованими методами.

#### **4.5. Результати контрольних випробувань вимірювача вологості м'якушки хліба**

Контрольні випробування проводилися в лабораторії хлібозаводу №2 ВАТ “Вінницяхліб” термогравіметричним методом із використанням лабораторних ваг типу ВЛА-200 відповідно до ГОСТ 8.432-81 [22]. Результати випробувань наведені в таблиці 4.5.

Середньоквадратична похибка виміру вологості

$$\sigma_{вим} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i + W_{вим})^2} = 0,234.$$

У такий спосіб в результаті контрольних вимірів вологості встановлено, що середньоквадратична похибка вологоміра становить 0,23%.

## ВИСНОВОК

Контроль вологості хлібобулочних виробів, які відносяться до капілярно-пористих матеріалів, у процесі їхнього виробництва здійснюється термогравіметричним методом за ГОСТ 21094-75. При цьому виникають значні суб'єктивні помилки контролю, які в сполученні з великою тривалістю виміру дозволяють стверджувати про низьку ефективність вимірів вологості, що призводить до зростання ризику як виготовлювача, так і споживача хлібобулочних виробів.

У даній роботі теоретично і експериментально доводиться застосованість діелектрометричного методу контролю при аналізі вологості капілярно-пористих матеріалів незалежно від їхньої маси і пористості, а також від впливу діелектричних втрат, що підтверджується наступними результатами:

1. На основі теоретичних досліджень отримана електрофізична модель м'якушки хліба, що враховує всі форми зв'язку вологи з речовиною.

2. Експериментально досліджена зміна діелектричних параметрів м'якушки в діапазоні частот, їхня залежність від основних заважальних факторів.

3. Теоретично і експериментально досліджений зв'язок контрольованого параметра – вологості з інформативним параметром об'єкта контролю – кутом нахилу  $\varepsilon'(f)$ , що послужило основою розробки способу виміру повної вологості в хлібобулочних виробках.

4. Теоретично і експериментально досліджений зв'язок інформативного параметра – кута нахилу залежності  $I_C(f)$  з контрольованим параметром – вологістю, що послужило основою розробки другого способу виміру повного вмісту вологи в м'якушці хлібобулочних виробів.

5. Розроблено метод виміру вологості, що зменшує вплив діелектричних втрат, шляхом визначення реактивного опору чутливого елемента через відношення напруг на зразковому і чутливому елементах і фазовий зсув між ними. Метод дозволяє визначати також опір діелектричних втрат.

6. Експериментально підтверджена незалежність результатів вимірів від пористості контрольованого матеріалу – основного заважального фактора.

7. На основі повного багатofакторного експерименту, регресійного аналізу отримана математична модель м'якушки хліба, що зв'язує інформативні параметри об'єкта контролю – кути нахилу залежностей  $\varepsilon'(f)$  і  $I_C(f)$  з контрольованим параметром – вологістю і неінформативними параметрами – пористістю і температурою навколишнього середовища. Отримана модель адекватна об'єкту контролю за критерієм Фішера.

8. Запропоновано структурні схеми пристроїв для контролю повної вологості м'якушки хлібобулочних виробів.

9. На базі запропонованої структури розроблений і впроваджений експериментальний зразок вологоміра на ВАТ “Вінницяхліб”.



10. Результати даної роботи можуть бути використані на підприємствах агропромислового комплексу для експресного і автоматичного безперервного аналізу вологості зерна і насіння різних сільськогосподарських культур, на підприємствах, що переробляють сільськогосподарську продукцію – для аналізу вологості зернопродуктів, на хлібопекарських і кондитерських підприємствах – для аналізу вологості і пористості, у деревообробній, паперовій і текстильній промисловості – для експресного безперервного аналізу вмісту вологи, у гірничорудній промисловості – для дослідження вмісту вологи сировинних матеріалів з великими втратами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / Е.Б.Карпин, А.И.Авен, И.К.Петров; Под ред. Е.Б.Карпина. -2-е изд., перераб. -М.: Агропромиздат, 1985. -536 с.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. -М.: Наука, 1976.-279 с.
3. Арутюнов О.С., Цеймах Б.М. Датчики состава и свойств веществ. -М.: Энергия, 1969. -136 с.
4. Арси Э.И. Высокочастотный автогенераторный контроль в горном деле. - М.: Недра, 1971. -159 с.
5. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства. –М.: Пищевая промышленность, 1972. -512 с.
6. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов. -М.: Наука, 1977. -399 с.
7. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. -М.: Изд-во стандартов, 1972. -338 с.
8. Бандак М.И. Исследование и разработка высокочастотных влагомеров для материалов с большими электрическими потерями. -Дис. канд. техн. наук. -Винница, 1976. -119 с.
9. Бандак М.И., Маликов В.Т., Тихомиров Е.Н. К вопросу автоматической коррекции потерь при создании влагомеров // Научные труды ВНИИАП. - 1974. -№4. -С.96-99.
10. Барабашук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. -К.: Техніка, 1984. -200 с.
11. Бензарь В.К. Определение влажности капиллярно-пористых материалов по поглощению радиоволн СВЧ // Инженерно-физический журнал. -1970. -Т.18. -№6. -С.1131-1136.
12. Бензарь В.К. Техника СВЧ влагометрии. -Минск: Высшая школа, 1974. -349 с.
13. Берлинер М.А. Оценка погрешностей вологомірів // Измерительная техника. -1969. -№4. -С.65-67.
14. Берлинер М.А. Измерения влажности. -М.: Энергия, 1973. -400 с.
15. Бойко В.О., Платонов П.Н., Пикерсгиль А.А. Двухчастотный метод измерения влажности зерна // Измерительная техника. -1980. -№4. -С.59-60.
16. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента. -М.: Наука, 1976. -223 с.
17. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. -М.: Машиностроение, 1982. -94 с.
18. Буров А.Н. Аналитические приборы для управления технологическими процессами // Приборы и системы управления. -1977. -№10. -С.22-25.
19. Бухгольц В.П., Тисевич Э.Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления, -М.: Энергия, 1972. -79 с.

- 20.Вапник М.А. Влияние гранулометрического состава материала и способа его засыпки на емкость конденсаторного датчика // Заводская лаборатория. -1967. -№1. -С.178-180,
- 21.Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. -К.: Техніка, 1975. -165 с.
- 22.Влажность зерна и продуктов его переработки. Методика выполнения измерений на образцовой вакуумно-тепловой установке. ГОСТ 8.432-81. - М.: Изд-во стандартов, 1985. -6 с.
- 23.Володарский А.В., Тофан И.Г., Михелев А.А. Исследование теплообмена в начальной стадии выпечки / Хлебопекарная и кондитерская промышленность. -1967. -№9. -С.236-250.
- 24.Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин / В.А.Викторов, Б.В.Лункин, А.С.Совлуков. -М.: Наука, 1978. -280 с.
- 25.Гинзбург А.С, Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. -М.: Пищевая промышленность, 1980. -288 с.
- 26.Гинзбург А.С. Теплофизические основы процесса выпечки, -М.: Пищепромиздат, 1955. -476 с.
- 27.Горячева А.В., Кузьминский Р.В. Сохранение свежести хлеба. -М.: Пищевая промышленность, 1983. -146 с.
- 28.Грицай В.И., Цапив И.И, Выбор размеров просыпного датчика электрических высокочастотных вологомiрiв емкостного типа // Контрольно-измерительная техника. -Вип.2. -Львов: Изд-во Львовского университета, 1966. -С.115.
- 29.Гутер Р.С, Овчинский В.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. -М.: Наука, 1970, -432 с.
- 30.Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - Л.: Энергоатомиздат, 1988. -304 с.
- 31.Даниельс Н.В.Р. Действие воды в тесте из пшеничной муки // Вода в пищевых продуктах / Под ред. Р.Б. Дакуорта: Пер. с англ. -М.: Пищевая промышленность, 1980. -С.318-330.
- 32.Двинских В.А., Парусов В.П., Сергеев А.С. Раздельное измерение составляющих комплексного сопротивления полупроводниковых объектов с большими потерями // Метрология. -1978. -№5. -С.49-55.
- 33.Джабраилов А.Д. Двухчастотный метод контроля за влажностью нефтяных эмульсий // Нефтяное хозяйство. -1967. -№7. -С.46-47.
- 34.Долгов В.А., Келин А.В. Электронные датчики для автоматических систем контроля. -М.: Сов. радио, 1968. -87 с.
- 35.Дубров Н.С., Кричевский Е.С., Невзлин Б.И. Многопараметрические влагомеры сыпучих материалов, -К.: Машиностроение, 1980. -144 с.
- 36.Егоров А.Е., Азаров Г.Н., Коваль А.В. Исследование устройств и систем автоматизации методом планирования эксперимента. -Харьков: Вища школа, 1986. -240 с.
- 37.Енохович А.С. Справочник по физике и технике. -М.: Просвещение, 1983. -255 с.

- 38.Ерохин В.В. Зависимость диэлектрической проницаемости нефтяных эмульсий от частоты / Труды метрологических институтов СССР. - Вып.136/196. -Москва: -Казань: Изд-во стандартов, 1972. -С.98-102.
- 39.Завадский Ю.В. Планирование эксперимента в задачах автомобильного транспорта. -М.: Изд-во МАДИ, 1979. -172 с.
- 40.Завадский Ю.В. Статистическая обработка эксперимента. -М.: Высшая школа, 1976. -270 с.
- 41.Зацепина Г.Н. Свойства и структура–воды. -М.: Изд-во МГУ, 1974. -167 с.
- 42.Зверева Л.Ф., Немцова З.С., Волкова Н.М. Технология и технохимический контроль хлебопекарного производства. -3-е изд. -М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. -416 с.
- 43.Исматуллаев П.Р., Гринвальд А.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов. -Ташкент: ФАН, 1982. -83 с.
- 44.Каменев Л.В., Ройфе В.С. Диэлькометрические влагомеры на основе схем с параметрической стабилизацией // Приборы и системы управления. - 1974. -№9. -С.19-22.
- 45.Кричевский Е.С., Волченко А.Г., Галушкин С.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. -М.: Энергоатомиздат, 1987. -136 с.
- 46.Кричевский Е.С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых, -М.: Недра, 1972. -215 с.
- 47.Кричевский Е.С., Галушкин С.С, Терехов В.П. Опыт эксплуатации систем непрерывного контроля влажности апатитового концентрата // Химическая промышленность. -1975. -№2. -С.139-142.
- 48.Крушевский Ю.В., Куцевол Н.А., Сутьян В.Я. Измеритель влажности хлеба // Диагностика и коррекция преобразователей технологической информации: Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. Ноябрь 1989. -К.: 1989. -С.136-138.
- 49.Крушевский Ю.В., Куцевол Н.А., Сутьян В.Я. Исследование температурно-влажностных характеристик хлеба // Диагностика и коррекция преобразователей технологической информации: Тез. докл. Респ. научно-техн. конф. Ноябрь 1989 г. -К.: 1989. -С.134-135.
- 50.Крушевский Ю.В. Методы и устройства контроля влажности сыпучих биологических материалов. - Дис. канд. техн. наук. -Винница, 1988. -166 с.
- 51.Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизация АСКУ. -М.: Сов. радио, 1971. -294 с.
- 52.Кузьмин И.В., Кедрус В.А. Основы теории информации и кодирования. - М.: Машиностроение, 1987. -168 с.
- 53.Кулишенко А.З., Харитонов А.С, Гридин И.А. Емкостный датчик для измерения шихты в потоке // Кокс и химия. - 1962. -№9. -С.16-19.
- 54.Куцевол Н.А., Крушевский Ю.В., Сутьян В.Я., Притака А.Д. Диэлькометрический влагомер и его использование для анализа хлеба // Хлебопродукты. -1990. -№4. -С.33-36.
- 55.Поджаренко В. О., Куцевол М. О., Куцевол О. М. Високочастотні методи

- та засоби вимірювання капілярно-пористих матеріалів // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вісник національного університету “Львівська політехніка”. – 2003. - № 64. – С. 147 – 152/
56. Куцевол О. М., Куцевол М. О. Метод визначення ємності матеріалу зі значними діелектричними втратами // Пр. 9-ї НТК “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Вип. № 9 (2002). – Т.1. – Хмельницький: ТУП. – 2002. – С. 86 – 88.
57. Куцевол Н.А., Крушевский Ю.В., Сутьян В.Я. Метод измерения влажности хлебобулочных изделий с помощью емкостного чувствительного элемента. -М., 1990. -12 с. - Деп. в ЦНИИТЭИ Минхлебопродукта СССР 10.07.90, № П82-хб90.
58. Лоор Г.П. Диэлектрические свойства гетерогенных влагосодержащих смесей // Приборы и системы управления. -1974. -№9. -С.19-22.
59. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрохимических методов анализа. - М.: Высшая школа, 1975. - 291 с.
60. Лыков А.В. Теория сушки. -М.: Энергия, 1968. -471 с.
61. Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. -Рига: Зинатне. -238 с.
62. Матяш И.В. Вода в конденсированных средах. –К.: Наукова думка, 1978. - 236 с.
63. Моик И.Б., Рогов Н.А., Горбунов А.Б. Термо- и влагометрия пищевых продуктов: Справочник. -М.: Агропромиздат, 1977. -304 с.
64. Музалевский В.И. Комбинированные емкостные преобразователи влажности листовых материалов // Измерительная техника. -1972. -№1. - С.73-74.
65. Надь Ш.Б. Диэлькометрия. -М.: Энергия, 1971. -200 с.
66. Некрутман СВ., Белехов А.Н. Диэлектрические свойства пищевых продуктов // Электронная обработка материалов. -1973. -№6. -С.44-46.
67. Никитина Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. -М.: Энергия, 1968. -500 с.
68. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. -Л.: Энергоатомиздат, 1985. -248 с.
69. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. -Л.: Энергия, 1968. -248 с.
70. Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин: Пер. с англ. -Л.: Энергия, 1970. -360 с.
71. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые). -К.: Вища школа, 1971. -551 с.
72. Петров И.К. Технологические измерения и приборы в пищевой промышленности. –М.: Пищевая промышленность, 1973.
73. Петров И.К. Технологические измерения и приборы в пищевой промышленности. - 2-е изд. -М.: Агропромиздат, 1985. -344 с.
74. Подгорный Ю.В., Терлецкая Л.А. Новый измеритель диэлектрических параметров проводящих веществ // Измерительная техника, -1979. -№4. - С.47-49.

75. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н.Петров, В.А.Викторов, Б.В.Лункин, А.С.Совлуков. -М.: Наука, 1976. -243 с.
76. Пучкова Л.И., Сугрובה Л.Л., Архангельский И.В. Состояние воды в мякише хлеба и его компонентах // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. -1980. -№10. -С.31-32.
77. Рабинович Ф.М. Кондуктометрический метод дисперсионного анализа. - Л.: Химия, 1970. -176 с.
78. Ребиндер П.А. Избранные труды. -М.: Наука, 1978. -368 с.
79. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений. -Киев: Техніка, 1987. -128 с.
80. Ройфе В.С. Современные электрофизические методы влагометрии бетонной смеси и бетона в изделиях // Неразрушающие методы контроля качества сборного железобетона. -М.: МДНТП. -1971. -№2. -С.14-18.
81. Романов В.Г. Поверка влагомеров твердых веществ. -М.: Изд-во стандартов, 1983. -175 с.
82. Секанов Ю.П., Онишанский В.Н., Левина Н.С. О возможных погрешностях влагомеров // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. -1973. -№11. -С.54-56.
83. Скрипник Ю.А., Дубровский В.А., Танюк Б.А. Контроль параметров технологических процессов в легкой промышленности. -Киев: Техніка, 1980. -240 с.
84. Скрипник Ю.А. Методы преобразования и выделения измерительной информации из гармонических сигналов. -Киев: Наукова думка, 1971. -276 с.
85. Скрипник Ю.А. Модуляционные измерения параметров сигналов и цепей. -М.: Сов. радио, 1975. -320 с.
86. Скрипник Ю.А. Повышение точности измерительных устройств. -Киев: Техніка, 1976. -264 с.
87. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники. -М.: Энергия, 1971. -424 с.
88. Терехов В.П., Кричевский Е.С., Смирнов В.Н. Опыт применения ИК-вологомірів для автоматического контроля влажности сыпучих продуктов // Обогащение руд. -1980. -№5. -С.43-46.
89. Турчун А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. -М.: -Л.: Энергия, 1966. -690 с.
90. Федоткин И.М., Клочков В.П. Физико-технические основы влагометрии в пищевой промышленности. -Киев: Техніка, 1974. -320 с.
91. Флооов А.К. Автоматизация обработки информации при высокочастотных измерениях. -Киев, Техніка, 1975. -143 с.
92. Форейт И. Емкостные датчики неэлектрических величин. -М.: Энергия, 1975. -143 с.
93. Фрумкин Б.Д., Рубичев Н.А. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике. -М.: Машиностроение, 1987. -168 с.
94. Хлеб и хлебобулочные изделия. Метод определения влажности. ГОСТ

- 21094-75. - М.: Изд-во стандартов, 1986. -8 с.
95. Худякова Т.А., Крешков А.П. Кондуктометрический метод анализа: Под ред. проф. А.П.Крешкова. -М.: Высшая школа, 1975. -207 с.
96. Худякова Т.А., Крешков А.П. Теория и практика кондуктометрического и хронокондуктометрического анализа: Под общ. ред. А.П.Крешкова. -М.: Химия, 1976. -304 с.
97. Цветное С.А. Электрические влагомеры для зерна и пищевых продуктов. -М.: Пищепромиздат, 1969. -307 с.
98. Черепанов П.А. Электрические колебательные системы для измерения параметров сельхозпродуктов. -М.: Машиностроение, 1987. -184 с.
99. Эме Ф. Диэлектрические измерения: Пер. с нем, под ред. И.И.Заславского. -М.: Химия, 1967. -223 с.
100. А.с. №438919 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Емкостный датчик / А.В.Буглов (СССР). – 4 с.: ил.
101. А.с. №515982 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Способ компенсации активных потерь емкостных преобразователей / Е.Н.Тихомиров, В.В. Масловский, М.В. Венедиктов, В.Т. Маликов, М.И. Бандак, А.С. Васюра (СССР). -3 с.: ил.
102. А.с. №577446 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Первичный преобразователь влажности пористых и сыпучих материалов / Я.В.Ткачук (СССР). -4 с: ил.
103. А.с. №595669 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Емкостный преобразователь / Н.Н. Кротков, М.Д. Клионский (СССР). -2 с: ил.
104. А.с. №602844 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Преобразователь влажности сыпучих материалов / А.В. Немаров (СССР). -2 с: ил.
105. А.с. №631810 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Емкостный преобразователь / С.С. Колотуша, Р.Т. Франко (СССР). -4 с: ил.
106. А.с. №669279 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Измеритель влажности / В.В. Масловский, Е.Н. Тихомиров, В.И. Керновой (СССР). -4 с.:ил.
107. А.с. №670872 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Накладной емкостный датчик / Ю.Н. Федоров, Ю.М. Романенко (СССР). -3 с.: ил.
108. А.с. №682810 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Поверхностный емкостный датчик / М.В. Чаусов, В.П. Миронов, В.В. Стрельцов (СССР). -2 с.: ил.
109. А.с. №684424 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Поверхностный емкостный датчик влажности / В.С. Ройфе, А.Л. Вайнштейн (СССР). -3 с.: ил.
110. А.с. №734548 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Емкостный влагомер / Б.А. Баховец, В.В. Васин, Г.П. Горюнов, В.И. Пастушечко, Я.В. Ткачук (СССР). -3 с, ил.
111. А.с. №976364 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01N27/22. Устройство для измерения влажности / М.И. Бандак (СССР). -2 с: ил.
112. Способ измерения влажности: А.с. 1718089 СССР, МКИ G01N27/22. / Н. А. Куцевол, Ю. В. Крушевский, В. Я. Супьян (СССР). - № 4775221/25; заявлено 04.11.89; опубл. 07.03.92, Бюл. №9. – 4 с.
113. Richter J. Abbacken von Rodenbrot // Der Bäcker und Konditor. -Leipzig, 1966. -№12. -S.375-376.

114. Schneeweiss R. Über die Möglichkeiten zur Verkürzung der Backzeiten // Der Bäcker und Konditor. -Leipzig, 1961. -№11. -S.354-359.
115. Schneeweiss R. Über die Möglichkeiten zur Verkürzung der Backzeiten und ihre Grenzen // Der Bäcker und Konditor. -Leipzig, 1962. -№4. -S.118-120.
116. Steinberg M.P., Leung H. Some application of water in foods. -London, New-York, San-Fransisko: Acad. Press, 1975. -p.233-248.
117. Tscheuschner H.D. Zur Anwendung der Wasser-dampflockering bei der Gebäckherstellung // Der Bäcker und Konditor. -Leipzig, 1972. -№11. -S.325-326.



*Наукове видання*

Микола Олександрович Куцевол  
Олег Миколайович Куцевол  
Олександр Степанович Яремчук

## **ВИСОКОЧАСТОТНІ МЕТОДИ І ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ**

Монографія

Оригінал-макет виготовлено М. О. Куцеволом  
Редактор

Видавництво ВДАУ  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія № від . .200 р.  
21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, ВДАУ  
Тел.: (0432) 46-00-03

Підписано до друку . .2008 р.  
Формат 29,7x42 ¼ Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 6,5  
Наклад. 100 прим. Зам. №

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного аграрного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія № від . .200 р.  
21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, ВДАУ  
Тел.: (0432) 46-00-03.