



УДК 621.38

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-23

ВИБІР МЕТОДУ І ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОЛОКА

Кабалдов Ю. К., аспірант*,

Лобода О. І., к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0003-1532-3366>

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.: +38 (096)-661-3109

Анотація – у статті поставлена задача вибрати метод і пристрій для визначення діелектричних властивостей молока. Встановлено, що діелектричні властивості молока можна описати рівнянням комплексної діелектричної проникності. Аналіз рівняння показує, що не зважаючи на вміст в молоці крім жирових включень, також присутні молочний цукор, білки і сухі речовини, саме жири значно впливають на діелектричну проникність. Зміна концентрації жиру у молоці впливає на значення діелектричної проникності по закону близькому до прямолінійного. Точний контроль вмісту жиру в молоці дозволить більш точно визначити режими сушки молока з використанням енергії електромагнітного поля надвисокої частоти. За результатами аналізу останніх досліджень запропоновано і обгрунтовано метод і пристрій для визначення вмісту жиру в молоці за характеристиками електромагнітного високочастотного сигналу, пропущеного через молоко.

Ключові слова: діелектричні властивості молока, визначення діелектричних властивостей, діелектрики, вміст жиру в молоці, сушка молока, електромагнітне поле.

Постановка проблеми. Для розробки технологічних процесів обробки харчових продуктів енергією електромагнітного поля (ЕМП) надвисокої частоти (НВЧ), а також пристроїв для реалізації цих процесів необхідна інформація про діелектричні характеристики сировини, яка піддається обробці. Від значень діелектричних характеристик залежать величини питомої потужності ЕМП НВЧ, яка трансформується в теплоту, а також глибина проникнення НВЧ-поля у продукт. Також слід зазначити, що діелектричні характеристики продукту залежать від частоти ЕМП, хімічного складу і температури продукту. Молоко, як харчовий продукт, представляє собою складну гетерогенну суміш, до складу якої входить 87,5 % води, 12,5 % - сухих речовин, 3,3 % - білків, 3,5 % - жирів, 4,7 % - молочного цукру, 1 % - мінеральних речовин. Через наявність жиру і сухих речовин у своєму складі діелектричні властивості молока значно відрізняються від діелектричних властивостей води, попри її великий

* Науковий керівник: Лобода О.І., к.т.н.

© Кабалдов Ю. К., Лобода О. І.



вміст у молоці. Тому визначення ефективного методу визначення діелектричних властивостей молока є першим і дуже важливим аспектом для вивчення процесу сушки молока з використанням НВЧ-енергії.

Аналіз останніх досліджень. Діелектричні властивості молока можна описати за допомогою комплексної діелектричної проникності [1]

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (1)$$

де ε' - дійсна частина, діелектрична проникність,
 ε'' - уявна частина, фактор втрат (коефіцієнт поглинання).

Дійсна частина ε' прямо впливає на кількість енергії, яка може акумулюватися у матеріалі у вигляді електричного поля. Уявна частина ε'' показує скільки енергії матеріал може розсіяти у формі теплоти. Відношення енергії, яка витрачається на нагрівання, до енергії, яка накопичується за період електромагнітних коливань називається тангенсом кута діелектричних втрат і визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

У таблиці 1 представлено діелектричні властивості знежиреного молока в залежності від масової долі сухих речовин при температурі 20 °С і частоті електромагнітного поля 2450 МГц [2].

Таблиця 1.

Діелектричні властивості знежиреного молока

Масова доля сухих речовин, %	ε'	ε''
9	69,8	15,7
11	68,1	16,5
13	66,4	17,3
15	64,7	18
17	63	18,8

Встановлено, що діелектриками можуть бути рідини, тверді тіла або неіонізовані гази, через які проникає електричне поле, але які погано проводять електричний струм. В залежності від природи діелектриків і їх агрегатного стану існують різні методи визначення діелектричних властивостей: хвильові, резонансні, оптичні, калориметричні, пондеромоторні та інші. Методи виміру ємності і діелектричних втрат відрізняються один від одного тим, що застосовуються різні частоти



електричного поля. У постійному полі при низьких частотах (десяті доли герц) ємність визначають шляхом виміру зарядного або розрядного струму конденсатору за допомогою балістичного гальванометру. У високочастотній області (від 10^5 до 10^8 Гц) для вимірювання ємності C_ϵ і діелектричної проникності ϵ застосовують резонансні методи. Суть методу полягає в тому, що коливальний контур, який в своєму складі має зразковий конденсатор, налаштовується в резонанс і вимірюється відповідна резонансу величина ємності C' . Після чого паралельно зразковому конденсатору підключають конденсатор з діелектриком C_ϵ і контур знову налаштовується у резонанс. У цьому випадку ємність зразкового конденсатору C'' буде меншою. Після чого ємність конденсатору з діелектриком C_ϵ розраховується за формулою

$$C_\epsilon = C' - C'' \quad (3)$$

Різні резонансні методи відрізняються один від одного за способом визначення тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$. В методі заміщення діелектрик заміщують еквівалентною схемою, яка складається з ємності і опору. Підбирають такий опір, який при вмиканні послідовно або паралельно зразковому конденсатору буде давати такий же резонансний струм в контурі, як і зразок діелектрика. При цьому ємність зразкового конденсатору обирають так, щоб вона була однаковою з діелектриком. В той час як метод розладу контуру заснований на тому, що ширина резонансної кривої контуру відрізняється його добротністю Q , яка пов'язана з тангенсом кута діелектричних втрат відношенням

$$tg\delta = \frac{1}{Q} \quad (4)$$

В області надвисоких частот від 10^8 до 10^{11} Гц діелектричні виміри засновані на використанні об'ємних резонаторів і радіохвилеводів, а також на закономірностях розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі. За іншою методикою виміру діелектричних характеристик спостерігають за стоячими хвилями у хвилеводі, навантаженому відомим опором, або спостерігають за поглинанням хвиль, які проходять через діелектрик [1].

Формулювання цілей статті Синтез ефективного методу визначення діелектричних властивостей молока, що є важливим аспектом для вивчення процесу сушки молока з використанням НВЧ-енергії

Основна частина. Запропоновано і обґрунтовано метод і пристрій контролю вмісту жиру в молоці за характеристиками електромагнітного високочастотного сигналу, пропущеного через молоко. Суть методу полягає в тому, що молоко з різним вмістом жиру, що протікає через обкладинки ємнісної комірки змінює амплітудо- і фазочастотні характеристики несинусоїдального періодичного електромагнітного високочастотного сигналу, який подається на обкладинки. На вимірювальний первинний перетворювач рис. 1, виконаний з послідовно увімкннутих активного опору і ємнісної комірки, між обкладинками якої знаходиться молоко, з виходу генератора подають високочастотні несинусоїдальні періодичні електромагнітні коливання u

$$u = U_{(1)max} \sin(\omega t + \psi_{(1)}) + \sum_{k=2}^n U_{(k)max} \sin(k\omega t + \psi_{(k)}), \quad (5)$$

де $U_{(1)max}$, $\psi_{(1)}$ - максимальне значення і початкова фаза основної гармоніки початкової напруги;

$U_{(k)max}$, $\psi_{(k)}$ - максимальне значення напруги і початкова фаза k -тої гармоніки;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота основної гармоніки.

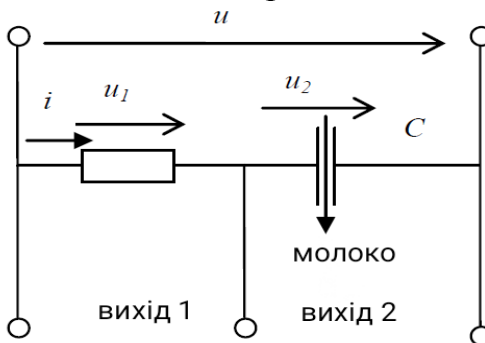


Рис. 1. Схема заміщення вимірювального первинного перетворювача

Відповідно, напруги, які знімаються з активного опору і ємнісної комірки, також є несинусоїдальними функціями виду

$$u_1 = U_{1m(1)} \sin(\omega t + \psi_{1(1)}) + \sum_{k=2}^n U_{1m(k)} \sin(k\omega t + \psi_{1(k)}) \quad (6)$$

$$u_2 = U_{2m(1)} \sin(\omega t + \psi_{2(1)} - 90^\circ) + \sum_{k=2}^n U_{2m(k)} \sin(k\omega t + \psi_{2(k)} - 90^\circ) \quad (7)$$

де $u_1 = f(i)$ і $u_2 = f(i, C, \omega, k)$;

i – миттєве значення несинусоїдального струму вимірювального первинного перетворювача.



В свою чергу

$$C = f(S, d, \varepsilon^*), \quad (8)$$

де ε^* - комплексна діелектрична проникність молока;
 S і d - площа електродів і відстань між ними;
 C - електрична ємність.

Процеси, що протікають в діелектриках, яким і є молоко, в електричному полі визначається комплексною діелектричною проникністю

$$\varepsilon^* = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (9)$$

де ε'_∞ - діелектрична проникність, виміряна при високій частоті;
 $\varepsilon'_{\omega 0}$ - квазістатичне значення діелектричної проникності (при $\omega \rightarrow \infty$);
 τ - час релаксації.

З формули (9) виділяємо активну і реактивну складові діелектричної проникності і отримуємо вирази для кожного виміру

$$\varepsilon' = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (10)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (11)$$

Так як молоко є багатокомпонентною сумішшю, кожен компонент якої має різний час релаксації, ε' і ε'' для всієї сукупності вимірювань можна описати виразами

$$\varepsilon' = \varepsilon'_\infty + (\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty) \int_0^\infty \frac{p(\tau)d\tau}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad (12)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon'_{\omega 0} - \varepsilon'_\infty) \int_0^\infty \frac{\omega\tau p(\tau)d\tau}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad (13)$$

де $p(\tau)$ - відносна ймовірність того, що час релаксації дорівнює τ .

З формул (12) і (13) бачимо, що активна і реактивна складові комплексної діелектричної проникності залежать від частоти. Частотна дисперсія діелектричної проникності молоко до частот 10-20 МГц невелика і спостерігається тільки при високих частотах діапазону, де ε' знижується до значення 52,8 через процеси релаксації поляризації.



Відомо, що діелектрична проникність молока змінюється в діапазоні 53...80. Важливо, що струм у вимірювальному первинному перетворювачі змінюється по закону близькому до лінійного при зміні вмісту жиру в молоці. Солі і білки, які також входять до складу молока, носять малоймовірний вплив на точність вимірювань [2].

Висновок. Таким чином, при зміні вмісту жиру в молоці, змінюється комплексна діелектрична проникність молока ϵ^* , що призводить до зміни вихідних напруг вимірювального первинного перетворювача: u_1 - на активному опорі і u_2 - на ємності. Розклавши вихідні напруги u_1 і u_2 у гармонічні ряди за початковими фазами і амплітудами напруг основної і вищих гармонік можна судити про точний вміст жиру в молоці. Тому запропонований метод і пристрій вимірювання вмісту жиру в молоці є ефективним рішенням поставленої задачі.

Список використаних джерел.

1. Чернушенко А. М. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: Учебник для вузов / А. М. Чернушенко, Б. В. Петров, Л. Г. Малорацкий и др.; Под ред. А. М. Чернушенко. - М. : Радио и связь, 1990. - 352 с.
2. Рогов И. А, Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман. - М., 1986. – 350 с.

ВЫБОР МЕТОДА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОЛОКА

Кабалдов Ю. К., Лобода А.И.

Аннотация – в статье поставлена задача выбрать метод и устройство для определения диэлектрических свойств молока. Установлено, что диэлектрические свойства молока можно описать уравнением комплексной диэлектрической проницаемости. Анализ уравнения показал, что несмотря на содержание в молоке кроме жировых включений молочного сахара, белков и сухих веществ, именно жировые включения значительно влияют на диэлектрическую проницаемость. Изменение содержания жиров в молоке меняет значение диэлектрической проницаемости по закону близкому к прямолинейному. Точный контроль содержания жира в молоке позволит более точно определить режимы сушки молока с применением энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты. Исходя из результатов последних исследований, предложено и обосновано метод и устройство для определения содержания жира в молоке по характеристикам электромагнитного высокочастотного сигнала, пропущенного через молоко.

Ключевые слова: диэлектрические свойства молока, определение диэлектрических свойств, диэлектрики, содержание жира в молоке, сушка молока, электромагнитное поле.



SELECTION METHOD AND DEVICE FOR DETERMINATION OF MILK DIELECTRIC PROPERTIES

Kabaldov Y., Loboda O.

Summary

The article aims to choose a method and device for determining the dielectric properties of milk. For the development of technological processes for the processing of food by the energy of the electromagnetic field of ultra high frequency, as well as devices for the implementation of these processes, information about the dielectric characteristics of the raw material to be processed is required. It is established that the dielectric properties of milk can be described by the equation of complex dielectric permeability. Analysis of the equation showed that, despite the content in milk, in addition to fat inclusions, dairy sugar, proteins and dry substances, it is fat inclusions that significantly affect the dielectric constant. The change in the fat content in milk changes the value of the dielectric constant according to a law close to straight. Accurate control of the fat content in milk will make it possible to more accurately determine the mode of drying of milk using the energy of the electromagnetic field of ultra-high frequency. Offered and proved method and device controls the fat content of milk on the characteristics of high electromagnetic signal passed through the milk. The essence of the method is that milk with different fat content flowing through the covers of the container cell changes the amplitude and phase characteristics of the non-sinusoidal periodic high-frequency electromagnetic signal applied to the covers. Based on the results of recent studies, a method and device for determining the fat content in milk according to the characteristics of an electromagnetic high-frequency signal passed through milk has been proposed and justified.

Keywords: dielectric properties of milk, determination of dielectric properties, dielectrics, fat content in milk, drying of milk, electromagnetic field.