

ВПЛИВ ЕМП ТА ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ НА БІОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

УДК621.317

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Косулина Н. Г.¹, Черенков А. Д.¹, Сапрыка А. В.²

¹Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко,

²Белгородский государственный технологический университет имени Шухова

Обоснован фазовый метод измерения действительной составляющей диэлектрической проницаемости (ДП) веществ в пределах $10^7 \dots 10^9$, который использует явление сдвига фаз между осциллирующими полями при асимметрии двух плеч резонатора атомно-лучевой трубки. Показано, что применение квантовых измерителей с добротностями $10^7 \dots 10^9$ позволяет обойтись без громоздких и дорогостоящих сверхпроводящих резонаторов.

Постановка проблемы. Изучение ДП веществ в зависимости от температуры, частоты, влажности, давления, ядерного излучения, газовой среды и т.д. дает информацию о структуре вещества, типах поляризации и видах потерь, размерах молекул и атомов, о резонансных частотах собственных колебаний [1]. С изучением ДП связаны современные методы физико-химических исследований: контроль чистоты непроявляющих жидкостей, анализ бинарных и многокомпонентных смесей; измерение влажности сельскохозяйственных культур и процесс определения электрофизических параметров почвы [2, 3, 4]. По величине многокомпонентного газа можно судить о дыхании плодов и овощей в процессе длительного хранения, некоторых видов микроорганизмов, о состоянии плодов и овощей в процессе низкотемпературного консервирования [5, 6, 7]. Измерение функции дыхания плодов и овощей при воздействии на них информационных электромагнитным полем ЭМП связано с определением столь малых величин изменений ДП ($10^7 \dots 10^8$), что приводит к необходимости использовать для измерения измерительные ячейки с уникально высокими добротностями ($10^6 \dots 10^9$) на основе приборов, принцип действия которых основан на использовании резонансного индуцированного излучения (поглощения) молекулами или атомами рубидия [7]. Однако, применение таких устройств для измерения ДП биологических веществ требует, как теоретических, так экспериментальных исследований.

Анализ последних исследований. Физические принципы работы квантовых приборов положены в основу создания квантовых стандартов частоты и времени. Принцип работы квантовых стандартов частоты и времени основан на стабилизации частоты кварцевых генераторов по частоте спектральной линии квантовых переходов атомов или молекул и последующем формировании из сигнала кварцевого генератора сигналов времени [7]. Из существующих квантовых стандартов частоты, для измерения изменений дыхания плодов и овощей, наиболее приемлемы приборы на основе квантовых дискриминаторов. В дискриминаторах квантовый переход в атомах или молекулах происходит под воздействием внешнего

ЭМП и спектральная линия играет роль высокочастотного контура, по которому с помощью системы частотной автоподстройки подстраивают частоту опорного кварцевого генератора. К квантовым дискриминаторам относятся атомно-лучевые трубки на пучке атомов рубидия и др. [7]. Проведенный анализ показывает, что для измерения изменений ДП биологических веществ могут быть использованы атомно-лучевые трубки в области сверхвысоких частот диапазона.

Цель статьи. Целью статьи является теоретическое обоснование фазового метода измерения изменений действительной составляющей ДП газа и биологических веществ на основе атомно-лучевых трубок.

Основная часть. Принцип измерения изменений ДП веществ в квантовых измерителях основан на измерении сдвига частоты и изменений добротности спектральной линии квантового перехода атомов или молекул, возникающее в результате сдвига фаз между осциллирующими полями при асимметрии двух плеч резонатора атомно-лучевой трубки [10].

Рассмотрим фазовый метод измерений на конструкциях с U -образным и коаксиально-цилиндрическим резонаторами. Для расчета фазового сдвига, пропорционального изменению ДП веществ, рассмотрим эквивалентную схему U -образного резонатора на рис 1.

В представленной схеме ток и напряжение эквивалентной линии с волновым сопротивлением Z_0 и с постоянной распространения $Y = (\alpha + i\beta)$ (α – постоянная затухания; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_\beta}$ – волновое число; λ_β –

длина волны в волноводе) определяют магнитные и электрические составляющие осциллирующего поля [3].

Влияние исследуемого вещества, помещенного в запердельный волновод (рис. 1), учитывается в эквивалентной схеме (рис. 2) подключением импеданса Z_x последовательно с импедансом R_H , соответствующего потерям в торцевой заглушке резонатора. Возбуждение резонатора производится генератором напряжения, расположенным в центре линии.

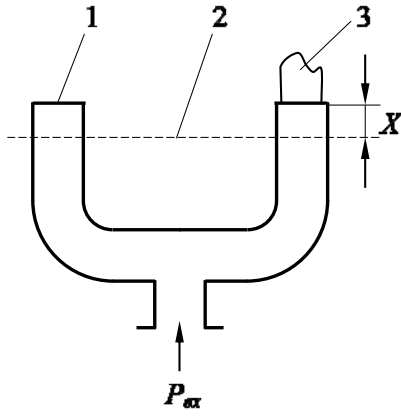


Рисунок 1 – Схема квантового измерителя с конструкцией U-образного резонатора:
1 – резонатор; 2 – атомный пучок; 3 – запредельный волновод для исследуемого вещества

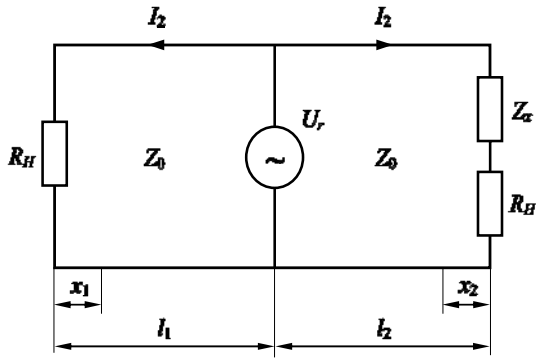


Рисунок 2 – Эквивалентная схема квантового измерителя с U-образным резонатором

Используя теорию длинных линий, в [7] показано, что фазы токов в сечении x_1 и x_2 при вещественном Z_0 определяется соотношением:

$$\text{tg } \varphi_{1,2} = \frac{\sin \beta(l_{1,2} - x_{1,2}) + \sin \beta(l_{1,2} + x_{1,2})}{[\alpha(l_{1,2} + x_{1,2}) + 2\xi] \cos \beta(l_{1,2} - x_{1,2}) + \alpha(l_{1,2} - x_{1,2}) \cos \beta(l_{1,2} + x_{1,2})} \quad (1)$$

В случае полноценной электрической симметрии резонатора относительно центра возбуждения и при идеальном размещении отверстий под пучок фазы тока в точках x_1 и x_2 равны [3]:

$$\varphi_{1,2} = (2\pi - 1) \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

Включение импеданса Z_x (см. рис. 2) в линию приводит к увеличению (уменьшению) эквивалентной электрической длины линии на величину, определяемую выражением [6],

$$\Delta l = \frac{1}{\beta} \text{arctg} \frac{X_x}{Z_0} \quad (3)$$

где X_x – реактивная составляющая импеданса Z_x .

Учитывая идеальное размещение отверстий под пучок $\beta x_2 = \pi$ и электрическую симметрию относительно центра возбуждения $\beta l_2 = (2\pi + 1) \frac{\pi}{2}$, выражение для фазы тока в сечении x_2 (см. рис. 2) с включенным импедансом Z_x , запишем в виде:

$$\text{tg } \varphi_2 = \frac{\sin(2\beta\Delta l)}{\alpha(l_2 - x_2)[1 + \cos(2\beta\Delta l)]} \quad (4)$$

Тогда сдвиг фазы, обусловленный импедансом Z_x , оказывается равным:

$$\Delta \varphi = \text{tg} \left[(2n - 1) \frac{\pi}{2} - \varphi_2 \right] = \frac{\sin(2\beta\Delta l)}{\alpha(l_2 - x_2)[1 + \cos(2\beta\Delta l)]} \quad (5)$$

и, подставив (3) в (5) получим:

$$\Delta \varphi = \frac{X_x}{\alpha(l_2 - x_2)Z_0} \quad (6)$$

Рассматривая эквивалентную схему (см. рис. 3) коаксиально-цилиндрического резонатора, будем считать, что линия с характеристическим сопротивлением Z_{02} нагружена на последовательно включенные сопротивления R_H и Z_x . Сопротивление R_H соответствует потерям в торцевой части резонатора, а Z_x определяет влияние исследуемого вещества.

На основании выводов, приведенных в [6], выражение для фазы тока φ_2 в сечении II – III запишется в следующем виде:

$$\text{tg } \varphi_2 = -[2K \sin \beta_1 L_2 - (K + 1) \sin(\beta_1 L_2 + 2\beta_2 l_2) + (K - 1) \sin(\beta_1 L_2 - 2\beta_2 l_2)] / \left[4 \left(\xi + \alpha_2 l_2 + \frac{K}{2} \alpha_1 L_2 \right) \cos \beta_1 L_2 + \alpha_1 L_2 (K + 1) \cos(\beta_1 L_2 + 2\beta_2 l_2) + \alpha_1 L_2 (K - 1) \cos(\beta_1 L_2 - 2\beta_2 l_2) \right] \quad (7)$$

где

$$K = \frac{Z_{01}}{Z_{02}}, \quad \xi = \frac{R_H + R_x}{Z_{02}}$$

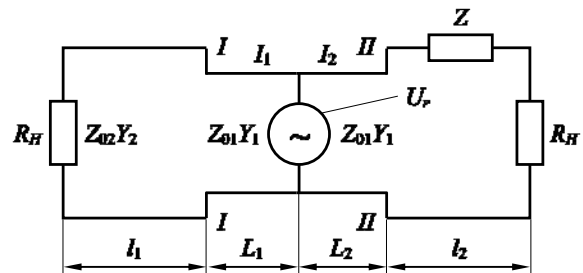


Рисунок 3 – Эквивалентная схема квантового измерителя с коаксиально-цилиндрическим резонатором

Учитывая полную электрическую симметрию резонатора относительно возбуждения

$\beta_1 L_2 = (2\pi + 1)\frac{\pi}{2}$; $\beta_2 L_2 = \pi$, а также то, что реактивная нагрузка X_x приводит к изменению электрической длины l_2 (см. рис. 2), выражение для разности фаз токов в сечениях I-I и II-II, вызванная влиянием исследуемого вещества, помещенного в запердельным волновод – 3 (см. рис. 3), будет определяться соотношением:

$$\Delta\varphi = \frac{X_x}{\alpha_1 L_2 Z_{01}} \quad (8)$$

Относительный сдвиг частоты атомного перехода для ^{87}Rb рассчитывали по формуле [5]:

$$\frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta\varphi}{\pi Q_n} \quad (9)$$

где Q_n – добротность линии перехода.

Сдвиг частоты рассчитан для U-образного резонатора, выполненного из волновода сечением 28,5 мм × 12,6 мм, изогнутого в плоскости E. Длина волны в волноводе $\lambda_g = 6,9$ см, длина $l_2 = 15$ см, $x_2 = 2,3$ см, $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-4}$ см $^{-1}$, $Z_0 = 536$ Ом. Добротность линии атомного перехода $Q_n = 10^7$.

Коаксиально-цилиндрический резонатор выполнен из двух труб. Тип колебаний H_{01n} . Длина $l_2 = 2,3$ см, $Z_{01} = 788$ Ом, $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-4}$ см $^{-1}$, $Q_n = 10^7$. Ширина спектральной линии $2\Delta f_0 = 760$ Гц.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета

Резонатор	X_x , Ом	0,2	0,4	0,6	0,8	1
U-образный	$\Delta\varphi$, рад	0,21	0,42	0,63	0,84	1,05
	Δf_n , Гц	45,7	91,4	137,1	174,128	228,5
Цилиндрический	$\Delta\varphi$, рад	0,85	1,7	2,55	3,4	4,25
	Δf_n , Гц	185,01	370,02	555,0	740,0	925,05

Сдвиг частоты атомного перехода квантового измерителя ДП биоматериалов, помещенных в запердельный волновод.

Выводы. Для измерения изменений ДП ($10^7 \dots 10^9$) газа и веществ следует использовать квантовые измерители на атомно-лучевых трубках в СВЧ диапазоне длин волн.

Список использованных источников

1. Бранд А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Бранд. – М. Физматгиз, 1964. – 404 с.
2. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот / А. Ф. – М.: Сов. радио, 1965. – 733 с.
3. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности / М. А. Берлинер. – М.: Энергия, 1965. – 488 с.
4. Бензарь В. К. Техника СВЧ влагометрии / В. К. Бензарь. – Минск: Высшая школа, 1974. – 349 с.
5. Вознесенский В. Л. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений / В. Л. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений / В. Л. Вознесенский, О. В. Зеленский, О. А. Семихатова. – М. Наука, 1968. – 306 с.
6. Перов Г. Д. Электрические характеристики почвы и корней сахарной свеклы / Г. Д. Петров, В. Я. Воробейчик // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – № 7. – С. 26 – 29.
7. Пихтелев А. И. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А. И. Пихтелев, А. А. Ульянов, Б. П. Фатеев. – М.: Наука, 1967. – 288 с.

Анотація

ВИМІР ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ КВАНТОВИХ ВИМІРЮВАЧІВ

Косуліна Н. Г., Черенков О. Д., Саприка О. В.

Обґрунтовано фазовий метод виміру дійсної складовою діелектричної проникності (ДП) речовин в межах $10^7 \dots 10^9$, який використовує явище зрушення фаз між осцилюючими полями при асиметрії двох плечей резонатора атомно-променевої трубки. Показано, що застосування квантових вимірювачів з добротністю $10^7 \dots 10^9$ дозволяє обійтися без громіздких і дорогих надпровідних резонаторів.

Abstract

MEASURING OF DIELECTRIC PENETRATION OF BIOLOGICAL SUBSTANCES ON BASIS OF QUANTUM MEASURING DEVICES

N. Kosulina, A. Cherenkov, A. Saprika

The phase method of measuring the actual constituent of inductivity (DP) of substances is reasonable within the limits of $10^7 \dots 10^9$, that uses the phenomenon of change of phases between the fields at asymmetry of two shoulders of resonator of atomic-radial tube. It is shown that application of quantum measuring devices with Q $10^7 \dots 10^9$ allows to do without bulky and expensive over conducting resonators.