



УДК 621.3.011.5:538.956]:577.35

**ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF MATERIALS AND BIOOBJECTS, METHODS AND MEANS OF THEIR MEASUREMENT IN ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES****ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МАТЕРИАЛОВ И БИООБЪЕКТОВ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИХ ИЗМЕРЕНИЯ****Kosulina N. G. / Косулина Н. Г.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0003-4055-8087

*State Biotechnological University, Kharkov, Alchevskih str. 44, 61002**Государственный биотехнологический университет,**Харьков, Алчевских, 44, 61002*

**Аннотация.** В работе рассмотрены проблемы по исследованию диэлектрических параметров биообъектов и материалов сельскохозяйственного назначения, методы и средства измерения диэлектрических параметров материалов и биоовеществ.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, биоовещество, рефлектометрия

**Вступ.**

Проведенный анализ показывает, что электромагнитный нагрев (ЭМ) нагрев следует отнести к энергосберегающей электротехнологии благодаря ряду преимуществ, по сравнению с обычным температурным нагревом. ЭМ нагрев ускоряется в 10 раз из-за своей безинерционности и высокого КПД преобразования энергии в теплоту, объемного и избирательного нагрева обрабатываемого материала и интенсивной сушки влажных зон. Из-за отсутствия контакта с теплоносителем и загрязнения среды продуктами сгорания, быстроты нагрева и разогрева изнутри сохраняется высокое качество продукта. Применение низкоэнергетического излучения ЭМ энергии в технологическом процессе растениеводства и животноводства связано с наименьшими затратами энергии при максимальном влиянии на информационные процессы жизнедеятельности биообъектов, так как основой жизни являются обмен веществ, энергии, информации при асимметричной спиральной структуре [1].

Однако следует отметить, что эффективное использование низкоэнергетического электромагнитного поля (ЭМП) невозможно без разработки физико-математических моделей, учитывающих параметры воздействующего ЭМП и диэлектрические характеристики сельскохозяйственных объектов в растениеводстве и животноводстве, которые в большинстве случаев неизвестны, особенно в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн.

**Основной текст.**

Характер взаимодействия ЭМП со средой определяется свойствами среды: диэлектрической и магнитной проницаемостью, проводимостью. Потери в материалах и биоовеществах в СВЧ и КВЧ диапазонах связаны с поляризацией связанных зарядов, ориентации диполей, перемещением переносчиков заряда (ионных и электронных). В сложных веществах, например, биологических,



могут иметь место все основные виды поляризации: электронная, ионная, дипольная. Значения комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) большинства веществ изменяются с частотой, то есть обладают дисперсией. Один вид дисперсии определяется релаксацией Дебая с пиком поглощения  $\epsilon''$  на частоте  $\frac{1}{2\pi\tau}$ . Другой вид дисперсии определяется квантовыми переходами в атоме или молекуле с одного энергетического уровня на другой с пиком поглощения по частоте перехода. Поэтому диэлектрические свойства, определяемые процессами, которые доминируют в биологических средах, можно описать на основе указанных релаксационных закономерностей.

Для клеточных структур один из механизмов поляризации связан с процессами переноса зарядов. Под действием внешнего ЭМП процесс переноса зарядов приводит к возникновению электромагнитного потенциала на клеточной мембране, который налагается на собственный потенциал мембраны. Поскольку клетка ведет себя как диполь, индуцированный внешним ЭМП, она воздействует на другие диполи, что приводит в конечном итоге к поглощению ЭМ энергии. С целью изучения поведения диэлектрических свойств материалов и биоовеществ в ЭМП, выявления их структуры и состава, измерения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  проводятся в широком диапазоне частот (от 0 до  $10^{13}$  Гц). Такой широкий частотный диапазон нельзя охватить единым методом измерений. Для каждой области диапазона существует предпочтительный метод. При измерении диэлектрических характеристик материалов выбор частотного диапазона определяется решаемой задачей. Квазистатические значения диэлектрической проницаемости измеряются на достаточно низких частотах до области аномальной дисперсии методом баллистического гальванометра или по электростатическому силовому взаимодействию.

Измерения диэлектрической проницаемости в переменных полях представляют значительно больший интерес, чем измерения при постоянном токе, так как они позволяют получить более точную информацию о свойствах материала. Особенно ценны измерения в дисперсионной области. Исходя из структурной организации вещества и задач, предъявляемых научными исследованиями и народным хозяйством, методы измерения электрофизических свойств веществ в СВЧ диапазоне можно разделить на методы измерений в линии передачи, в свободном пространстве и в объемном резонаторе.

Волноводные методы предусматривают измерение ДП с использованием ЭМП, направляемых посредством передающей линии – волновода, и основываются на изменениях фазы и амплитуды стоячей (или бегущей) волны при помещении вещества в волновод. Для измерения ДП жидких, твердых и газообразных веществ используется метод полного заполнения сечения волновода, при этом образец исследуемого вещества определенной толщины располагается в волноводе вплотную к его стенкам и к короткозамыкающей пластинке. Электрофизические характеристики исследуемого вещества связаны с изменением картины стоячих волн в волноводе без образца и с образцом определенными отношениями, являющимися результатом решения



соответствующих электродинамических задач. Следует отметить, что метод стоячей волны присущи такие недостатки: измерение только на фиксированной частоте, сложность автоматизации процесса измерений. Применение резонансных методов основано на результатах решения уравнений ЭМП для конкретного типа рабочей волны и конструкции резонатора с учетом влияния на поле измеряемого образца, помещенного в резонатор. Расчет и измерение относительной ДП  $\varepsilon'$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $tg \delta$  выполняются через измеряемые резонансную частоту  $f_0$  и добротность  $Q_0$  резонатора без образца  $f_1$  и  $Q_1$  резонатора с образцом [2]. В длинноволновой части СВ диапазона широкое применение нашли цилиндрические и прямоугольные резонаторы с колебаниями вида  $E_{01n}$  или  $H_{01n}$ . При исследовании твердых диэлектриков образец должен быть значительно меньше объема резонатора и устанавливаться по оси резонатора. При малых потерях в образцах использовались колебания вида  $E_{01n}$ , так как в этом случае имел место максимум электрическое поле в образце, а, следовательно, достигалась наибольшая чувствительность при измерениях. При больших потерях для понижения чувствительности выгоднее использовать колебания вида  $H_{01n}$ , так как при этом имеет место нулевое электрическое поле на оси резонатора. Для материалов с небольшими значениями проницаемости и потерь применяется метод полного заполнения резонатора. Точность метода полного заполнения составляет около 0,01% для проницаемости и 3,0...5,0% для  $tg \delta$ .

В методе измерения сильнопоглощающих жидкостей на частоте 9 ГГц диэлектрическая проницаемость и  $tg \delta$  вычисляются по изменению резонансной частоты и добротности объемного резонатора, который связан с запердельным волноводом, заполненным исследуемой жидкостью. Применяются резонаторы с добротностью  $Q = 10^7$  для исследований небольших измерений  $tg \delta = 10^{-6}$  электрофизических свойств материалов, обусловленных внешними воздействиями (светом, излучением). С помощью высокодобротных резонаторов удалось определить время релаксации и время свободных носителей для большего количества полупроводников. Релаксационная спектроскопия предъявляет повышенные требования по чувствительности средств измерения ДП до  $10^{-6} \dots 10^{-7}$ .

Достоинствами резонансных методов являются простота измерений, малые габариты установки, приемлемая погрешность  $\varepsilon'$  порядка 1,5%, а  $\varepsilon''$  – 3...5%, малое количество материала, необходимое для измерения. К недостаткам этих методов можно отнести отсутствие серийных резонаторов, механическую трудность изготовления резонаторов с большой добротностью (кроме того, любой резонатор является узкополосным устройством), необходимость обеспечения большой стабильности генератора колебаний и невозможность измерений  $\varepsilon'$  и  $tg \delta$  материалов с большими потерями.

Метод измерения ДП материалов в СВЧ области с помощью  $S$  – параметров четырехполюсников предусматривает что падающая, отраженная и прошедшая волны связаны между собой комплексной матрицей рассеяния:



$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где  $S_{11}$  и  $S_{22}$  – комплексные коэффициенты отражения входа и выхода четырехполюсника;  $S_{21}$  и  $S_{12}$  – комплексные коэффициенты передачи в прямом и обратном направлении соответственно.

Для симметричного четырехполюсника выражения для  $S$  – будут иметь вид:

$$S_{12} = S_{22} = \frac{r \cdot (1 - e^{-2x})}{1 - r^2 \cdot l^{-2x}}; \quad (3)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{(1 - r^2) \cdot l^{-2x}}{1 - r^2 \cdot l^{-2x}}, \quad (4)$$

где  $r = \frac{\sqrt{\mu} - \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\mu} + \sqrt{\varepsilon}}$ ;  $x = jr_0 \cdot \sqrt{\mu\varepsilon}$ ;  $r = r_0 \cdot \sqrt{\mu\varepsilon}$ ;  $r_0 = 1,2 \cdot l \cdot f$ ;  $z = z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ ;

$\mu = \mu' - j\mu''$ ;  $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ ;  $l$  – длина образца, мм;  $f$  – частота, ГГц;  $z$  – волновое сопротивление четырехполюсника, Ом;  $z_0$  – волновое сопротивление тракта, Ом.

При известных значениях  $S_{11}$  и  $S_{22}$  систему выражений (3) и (4) можно решить относительно  $\varepsilon$  и  $\mu$ :

$$\varepsilon = \sqrt{DC}, \mu = \sqrt{\frac{C}{D}}, \quad (5)$$

где 
$$D = \frac{1 - 2S_{11} + |S|}{1 + 2S_{11} + |S|}; \quad (6)$$

$$C = \frac{r^2}{r_0^2}; r = r_u + n\pi, n = 0, 1, 2, \dots; \quad (7)$$

$$\gamma_u = \ln \cdot (P \pm \sqrt{p^2 - 1}); P = \frac{1 - |S|}{2 \cdot S_{21}}; |S| = |S_{11}^2 - S_{21}^2|. \quad (8)$$

Из выражений (3)...(8) следует, что одновременное измерение  $S_{11}$  и  $S_{21}$  позволяет решить задачу определения частотных зависимостей комплексных значений  $\varepsilon$  и  $\mu$ . Рассмотренным методам измерения ДП материалов и веществ, присущи существенные недостатки: Ограниченная точность; Значительная трудоемкость процесса измерений  $\varepsilon$  и  $\sigma$  требующая; Инерционность процесса измерений; Отсутствие легкодоступной экспресс-информации; Необходимость специально подготовленного технического персонала для обслуживания аппаратуры и проведения измерений.

Устранить указанные недостатки позволяет метод импульсной рефлектометрии. Суть метода заключается в том, что материалы биовещества помещаются в специальную волноводную направляющую систему, через которую пропускаются импульсы пикосекундной длительности [2].

Отраженные и прошедшие через образец сигналы поступают на считывающее устройство стробоскопического осциллографа, где производится



специальная обработка информации с целью получения данных об электрофизических свойствах материала. Использование импульсов пикосекундной длительности позволит обеспечить непрерывный спектр в широкой полосе частот. Импульсы прямоугольной формы описываются выражением:

$$x(t) = \begin{cases} A & \text{при } -\frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{\tau_u}{2} \\ 0 & \text{при } t < -\frac{\tau_u}{2} \text{ и } t > \frac{\tau_u}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

$A$  – амплитуда импульса;  $\tau_u$  – длительность импульса.

Используя преобразования Фурье, получим:

$$x(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (10)$$

Подставив (9) в (10) спектральную плотность сигнала получим в следующем виде:

$$x(j\omega) = A \cdot \tau_u \left[ \frac{\sin(\omega \cdot \frac{\tau_u}{2})}{\omega \cdot \frac{\tau_u}{2}} \right]. \quad (11)$$

Из выражения (11) видно, что  $x(j\omega)$  – непрерывная функция во всем диапазоне частот.

При растягивании импульса расстояние между нулями функции  $x(j\omega)$  сокращается, что равносильно сужению спектра. При укорочении (сжатии) импульса, наоборот, расстояние между нулями функции  $x(j\omega)$  увеличивается

(спектр расширяется). В пределе при  $\tau_u \rightarrow 0$   $A = (const)$  точки  $\omega = \pm \frac{2\pi}{\tau_u}$ ,

соответствующие двум первым нулям функции  $x(j\omega)$  удаляются в бесконечность и спектральная плотность становится равномерной в полосе частот от  $-\infty$  до  $+\infty$ . В случае прямоугольного импульса полоса частот

определяется из условия  $\Delta F = \frac{1}{\tau_u}$ . Она содержит 90% всей энергии сигнала. Это

одно из преимуществ импульсных методов рефлектометрии по сравнению с измерениями на непрерывных сигналах.

Кроме того, метод импульсной рефлектометрии позволяет исследовать нелинейные стохастические системы. Действительно, представим сигнал импульсного рефлектометра  $x(j\omega)$  в виде ряда Вольтера, который действует на входе с импульсной характеристикой  $h(t)$ , то отклик системы  $y(t)$ , обусловленный этим сигналом возбуждения определяется сверткой:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau) \cdot h(\tau) d\tau. \quad (12)$$

В символической записи выражение (1.12) будет иметь следующий вид:





$$y(t) = x(t) * h(t), \quad (13)$$

где знак \* – операция свёртки.

Процедура определения  $h(t)$  с известными  $x(t)$  и  $y(t)$  представляют собой процесс идентификации системы, с помощью которого находится импульсная характеристика системы. При переходе из временной области в частотную область, свёртка трансформируется в операцию умножения:

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega), \quad (14)$$

где  $Y(j\omega)$ ,  $X(j\omega)$ ,  $H(j\omega)$  – частотные формы функций  $y(t)$ ,  $x(t)$ ,  $h(t)$ .

Тогда, частотная характеристика будет иметь вид:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (15)$$

В идеальном случае при наличии точной информации о функциях  $y(t)$  и  $x(t)$  можно с большой точностью выполнить операцию обращения свёртки, и вычислить  $h(t)$ , что может быть сделано, как во временной, так и в частной областях.

Таким образом, это даёт возможность использовать достоинства временного метода (раздельное получение отраженных сигналов от отдельных неоднородностей исследуемого объекта) для получения частотных характеристик, как отдельных нелинейностей, так и всего объекта в целом. Например, можно определить коэффициенты рассеяния четырехполосников по измеренным импульсным сигналам [2].

Исследуемым четырехполосником может быть специально встроенный в линию передачи элемент, узел коаксиального или полоскового тракта, контейнер с исследуемым материалом, свойствами, которых должны быть изучены в широкой области частот. При этом сохраняется возможность исследования временных характеристик объектов, а также их нелинейных и параметрических свойств [2].

### **Вывод.**

Были рассмотрены электрофизические параметры материалов и биообъектов, методы и средства измерения диэлектрических параметров материалов и биоовеществ. Проведенный анализ показал, что метод импульсной рефлектометрии для измерения электрофизических параметров материалов и биоовеществ, находящихся под воздействием различных физических факторов является наиболее перспективным для измерения диэлектрических параметров материалов и биоовеществ, но в настоящее время отсутствуют результаты применения метода рефлектометрии.

### **Литература:**

1. Косуліна Н. Г. Применение информационных электромагнитных полей в технологических процессах сельского хозяйства // Світлотехніка та електроенергетика. Міжнародний науково-технічний журнал. – Х.: ХНАМГ, 2005. – №5. – С. 77 – 80.

2. Косуліна Н. Г. Метод импульсной рефлектометрии для исследования электрофизических параметров биообъектов. Проблеми енергозабезпечення та



енергозбереження в АПК України. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Х.: ХНТУСГ. – №164. – С. 158 – 160.

**Abstract.** В работе рассмотрены электрофизические параметры материалов и биообъектов, методы и средства измерения диэлектрических параметров материалов и биоовеществ. Показано, что метод импульсной рефлектометрии для измерения электрофизических параметров материалов и биоовеществ, находящихся под воздействием различных физических факторов является наиболее перспективным для измерения диэлектрических параметров материалов и биоовеществ, но в настоящее время отсутствуют результаты применения метода рефлектометрии.

**Key words:** диэлектрическая проницаемость, биоовещество, рефлектометрия

Статья отправлена: 31.09.2022 г.

© Косулина Н. Г.