

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕПЛОвого КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ****Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф.**

Казенное научно-производственное предприятие „Кварсит”, г. Константиновка

Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев

Научно-исследовательский центр квантовой медицины „Видгук”, г. Киев

**Abstract**

*Kutsenko W.P., Skripnik Y.A., Tregubow N.F., Schewchenko K.L., Yanenko A.F. Theoretical bases of materials radiothermal control. In work separate characteristics of objects of the radiothermal control are considered. Dependence of spectral density of thermal noise in a material from frequency is shown, to spectral density of capacity of radiothermal radiation from length of a wave and temperature, communication between radiating and поглощательной abilities of materials.*

**Рассмотрение проблемы радиотеплового контроля материалов и изделий из них.**

В изделиях новой техники все более широкое применение получают материалы на основе керамики, аморфного стекла, полуметаллов и высокомолекулярных полимеров. Низкая электропроводность, теплопроводность и звукопроводность не позволяют контролировать нарушения внутренней структуры изделий из этих материалов традиционными методами (электромагнитным, акустическим и др.). По своим физическим свойствам данные материалы можно отнести к непроводящим (диэлектрическим) материалам. Высокая их поглощающая способность затрудняет использование и радиоволнового метода, основанного на оценке отражательной способности таких материалов и изделий из них. В то же время относительно высокая радиопрозрачность материалов позволяет для выявления внутренних дефектов и неоднородностей использовать радиотепловой метод, основанный на анализе интенсивности и спектра собственного электромагнитного излучения в диапазоне сверхвысоких частот [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

**Постановка задачи исследования.**

В данное время СВЧ радиометры наряду с традиционным применением в радиоастрономии находят широкое применение в различных областях науки и техники для исследования свойств материалов. В частности, параметры и характеристики материалов могут быть оценены по интенсивности собственного радиотеплового излучения без внешнего облучения, что имеет место при радиоволновом контроле.

Поэтому имеет смысл рассмотреть теоретические основы радиотеплового контроля объектов исследования, которые следует учитывать при измерении параметров материалов и изделий из них.

**Основная часть.**

Источником собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) материалов являются тепловые электрические флуктуации (тепловой шум), который является следствием хаотического (броуновского) движения носителей электрического заряда (электронов, ионов, дырок в полупроводниках). В равновесной системе, в которой отсутствуют необратимые процессы, связанные с диссипацией энтропии, носители заряда находятся в тепловом равновесии с молекулами вещества. Но броуновское движение носителей заряда вызывает

флуктуации равновесного распределения их по объему материала или изделия и обуславливают появление несбалансированных зарядов, которые создают разность потенциалов и выравнивающий эту разность ток. В диэлектрических материалах, в которых мало свободных электронов, тепловой шум обусловлен в основном появлением термовозбужденных поляризуемых молекул, образующих флуктуирующие диполи [8].

Средний квадрат флуктуирующего напряжения на участке материала с сопротивлением  $R$  определяется формулой Найквиста:

$$\bar{V}^2 = 4KTR\Delta f [B^2], \quad (1)$$

где  $K$  - постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  - термодинамическая температура, К;  $\Delta f$  - полоса частот, внутри которой измеряются флуктуации напряжения, Гц.

Спектральная плотность квадрата флуктуирующего напряжения, т.е. распределение энергии по частоте, описывается выражением:

$$S(f) = 4KTR_3 [B^2/\Gamma_{\text{ц}}], \quad (2)$$

где  $R_3$  - эквивалентное сопротивление, включающее диэлектрические потери в материале.

Так как  $S(f) = \text{const}$  и не зависит от частоты  $f$  в широком диапазоне частот, то такой шум является широкополосным и „белым“. В области сверхвысоких частот (СВЧ) спектральная плотность теплового шума описывается обобщенной формулой Найквиста:

$$S(f) = 4hf \left[ \exp\left(\frac{hf}{KT}\right) - 1 \right]^{-1} \text{Re } Z, \quad (3)$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\text{Re } Z$  - активная составляющая полного сопротивления  $Z$ .

Очевидно, что  $S(f)$  начинает уменьшаться, когда  $hf > KT$ . Практически можно считать тепловой шум „белым“, если при температуре 293 К полоса частот ограничена частотами меньше  $10^{11} \dots 10^{12}$  Гц [9].

Тепловые электрические флуктуации в материале и порождают радиотепловое ЭМИ в широком диапазоне частот. При этом электромагнитное поле, создаваемое движущимися зарядами в веществе, в свою очередь воздействует на эти заряды. В результате создается равновесное ЭМИ, интенсивность которого пропорциональна термодинамической температуре материала. Но с ростом температуры увеличивается и неравномерность спектра излучения, особенно в области оптических частот [10].

Спектральная плотность мощности равновесного излучения абсолютно черного тела (АЧТ) в зависимости от длины волны  $\lambda$  определяется формулой Планка:

$$S(\lambda, T) = \frac{2\pi h C^2}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hf}{KT}\right) - 1 \right]^{-1} = c_1 \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} [Вт/м^3],$$

(4)

где  $C$  - скорость распространения ЭМИ в вакууме;  $c_1$  и  $c_2$  постоянные Планка ( $c_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$  Вт·м,  $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К).

Спектральная плотность мощности имеет максимальное значение  $S(\lambda, T)_m$  при некоторой длине волны  $\lambda_m$ . Произведение  $\lambda_m T$  является корнем уравнения:

$$e^{\frac{c_2}{\lambda_m T}} \left( \frac{c_2}{\lambda_m T} \right) - 5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda_m T}} - 1 \right) = 0. \quad (5)$$

Согласно закону смещения Вина длина волны  $\lambda_m$  обратно пропорциональна температуре  $T$ :

$$\lambda_m T = B, \quad (6)$$

где  $B$  - постоянная Вина.

Из (6) следует, что с повышением  $T$  уменьшается длина волны  $\lambda_m$ .

В радиотепловом контроле спектральную плотность мощности обычно представляют в виде функции частоты  $f$ :

$$S(f, T) = \frac{2\pi h f^3}{C^2} \left[ \exp\left(\frac{hf}{KT}\right) - 1 \right] \left[ \frac{Bm}{m^2 \cdot \Gamma u} \right]. \quad (7)$$

Спектральная плотность мощности имеет максимальное значение  $S(f, T)_m$  при частоте  $f_m$ , определяемой соотношением

$$f_m / T = 5,8789 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1} \text{ K}^{-1}. \quad (8)$$

Из соотношения (7) следует, что с понижением температуры  $T$  максимум ЭМИ смещается в сторону низких частот (радиочастотный диапазон).

В оптическом диапазоне частот, где энергия фотона  $hf$  многим больше тепловой энергии ( $hf \gg KT$ ) распределение Планка (7) переходит в распределение Вина:

$$S(f, T) = \frac{2\pi h f^3}{C^2} \exp\left(-\frac{hf}{KT}\right) = c_1 f^3 \exp\left(-\frac{c_2 f}{T}\right). \quad (9)$$

В СВЧ диапазоне имеет место обратное соотношение между тепловой энергией и энергией фотона ( $KT \gg hf$ ). Для этого случая распределение плотности мощности в спектре равновесного ЭМИ определяется законом Релея-Джинса:

$$S(f, T) = \frac{2\pi f^2}{C^2} KT. \quad (10)$$

Распределение излучения АЧТ по спектру может быть описано и с помощью функции  $N(f, T)$ , которая представляет собой полное число фотонов, испускаемых в единицу времени на единицу интервала частот по всем направлениям внутри телесного угла  $2\pi$  с единицы поверхности при температуре  $T$ :

$$N(f, T) = \frac{2\pi f^2}{C^2} \left[ \exp\frac{hf}{KT} - 1 \right]^{-1}. \quad (11)$$

Функция  $N(f, T)$  имеет максимальное значение при частоте  $f_m$ , определяемой соотношением  $f_m / T = 3,3206 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , а отношение

$$\frac{N(f, T)_m}{T^2} = 1,9656 \text{ см}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}. \quad (12)$$

Полное число фотонов всех частот, испускаемых в единицу времени единицей поверхности АЧТ при температуре  $T$  определяется интегралом

$$\int_0^{\infty} N(f, T) df, \quad (13)$$

где  $T^{-3} \int_0^{\infty} N(f, T) df = 1,52 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-3}$ .

Фотонный подход удобен так же для оценки ЭМИ в диапазоне крайне высоких частот (КВЧ), т. е. для радиодиапазона миллиметровых и субмиллиметровых длин волн.

Для описания неравновесного ЭМИ, которое возникает вследствие градиента неравномерного температурного поля, используют средства неравновесной термодинамики, которая в отличии от классической термодинамики с ее равновесным состоянием, положила в основу стационарное неравновесное состояние. В последней постоянной является скорость диссипации энтропии во времени  $\left( \frac{dH}{dT} = \text{const} \right)$ , значение которой служит критерием неравновесности [11].

Флуктуации электрического заряда возникают под действием внешних сил, которые обуславливают неравновесное состояние системы. При этом постоянство скорости диссипации энтропии является признаком стационарности неравновесного состояния системы, которое характеризуется уравнением:

$$T \frac{dH}{dt} = n \frac{d\varphi}{dt} = P, \quad (14)$$

где  $\varphi$  - электрический потенциал;  $n$  - зарядовое число;  $P$  - мощность неравновесного потока.

Если речь идет об ЭМИ, порождаемых всеми видами электрических шумов, включая дробовые, фликер-шумы и др., то в уравнении (14)  $P$  отражает электрическую мощность всех генерируемых шумов.

Как отмечалось выше, излучение реальных (серых) тел всегда меньше излучения АЧТ. Количественно уменьшение полной мощности излучения оценивается коэффициентом излучения (серости):

$$\xi_T = \frac{P(T)}{P_0(T)}, \quad (15)$$

где  $P(T)$  и  $P_0(T)$  - полные мощности излучения во всем диапазоне частот реального тела и АЧТ.

Уменьшение излучения на разных частотах учитывается частотным (спектральным) коэффициентом излучения

$$\xi_f = \frac{S(f, T)}{S_0(f, T)}. \quad (16)$$

В оптическом диапазоне частот полная мощность излучения реальных тел по всем частотам определяется выражением:

$$P(T) = \xi_T \sigma (T^4 - T_1^4), \quad (17)$$

где  $\sigma = \frac{2\pi^5 K^4}{15C^2 h^3}$  - постоянная Стефана-Больцмана;  $T_1$  - температура среды, находящейся в тепловом равновесии с излучающей поверхностью.

Связь между коэффициентами  $\xi_T$  и  $\xi_f$  описывается соотношением:

$$\xi_T = \frac{\int_0^{\infty} \xi_f S(f, T) df}{\sigma(T^4 - T_1^4)}. \quad (18)$$

Если сравнивают полные мощности (или их спектральные плотности) реальных излучателей и АЧТ не в пределах угла  $2\pi$ , а в направлении нормали к излучающей поверхности, то коэффициенты излучения обозначаются  $\xi_T^n$  и  $\xi_f^n$ . Для диапазона инфракрасного излучения значения коэффициентов излучения приведены в [12].

Излучательная и поглощательная способности материалов тесно связаны между собой. Согласно закону излучения Кирхгофа отношение излучательной и поглощательной способностей тела постоянно и зависит от его температуры и частоты излучения:

$$\frac{\xi(f, T)}{\alpha(f, T)} = \xi_0(f, T), \quad (19)$$

где  $\alpha(f, T)$  - поглощательная способность;  $\xi_0(f, T)$  - излучательная способность АЧТ.

Чем больше излучательная способность материала, тем выше его поглощательная способность. Поэтому, чем ближе „серость” к „черноте”, тем больше излучательная способность материалов и покрытий.

В диапазоне СВЧ спектральную плотность мощности излучения различных материалов и покрытий следует оценивать формулой (10) с учетом частотного коэффициента излучения:

$$S(f, T) = \xi_f \frac{2\pi f^2}{C^2} KT. \quad (20)$$

Для диэлектрических материалов  $\xi_f = 0,7...0,98$ . В то время, как материалы на основе металлов имеют  $\xi_f = 0,01...0,5$  в зависимости от состояния поверхности (шероховатости, наличия окислов и т.п.). С другой стороны, диэлектрические материалы, которые обладают высокой излучательной способностью, согласно закону Кирхгофа (19) обладают и высокой поглощательной способностью, а следовательно, имеют малую отражательную способность.

Контроль по радиотепловому излучению в диапазоне ИК и видимого света уже длительное время используется для бесконтактного измерения температуры различных тел. При этом применяются различные типы параметров (полного и спектрального излучения) [13]. Из-за малой длины волны ЭМИ оптического диапазона собственное излучение несет информацию только о поверхностной температуре. Учет серости различных объектов производят путем введения поправок и применением специальных схем измерения отношения спектральных плотностей мощности на разных длинах волн (цветовые пирометры).

В связи с необходимостью измерения подповерхностной (глубинной) температуры стали развиваться радиотепловые методы измерения температуры. Использование более длинных волн (сантиметрового и дециметрового диапазонов) позволило измерять градиент температуры путем изменения частоты принимаемого излучения на глубине до 8...10 сантиметров [14]. Повышение чувствительности и разрешающей способности радиометров делает это направление контроля весьма перспективным.

В последние годы наметилось новое направление в радиотепловом контроле, связанное с оценкой ЭМИ от различных материалов или от различных участков одного изделия при заданной температуре нагрева. Благодаря хорошей радиопрозрачности

диэлектрических материалов можно принимать радиоизлучение из глубины материала или изделия. Так как сравниваются ЭМИ при одной температуре, то разность их интенсивностей несет информацию о структуре материала и ее нарушениях. Так, неравномерное распределение вещества по объему изделия или различная плотность вещества, а так же градиент концентрации примесей обуславливают и неравномерное поглощение ЭМИ на разных частотах, что изменяет спектр собственного ЭМИ. Поэтому радиотепловой контроль основывается на сравнении мощностей излучения контролируемого изделия и эталонного (образцового) изделия или определении изменений в форме огибающей спектра излучения. Перспективным так же является спектральный (частотный) анализ собственного ЭМИ под воздействием влияющих факторов.

### **Выводы.**

Радиотепловые методы открывают новые возможности в неразрушающем контроле материалов и изделий по уровню собственного ЭМИ, вызываемого радиотепловыми электрическими флуктуациями. Если раньше тепловой шум рассматривался как фактор, ограничивающий чувствительность и точность любых измерительных устройств, то теперь они оказались информационной основой нового направления как в термометрии, так и в области дефектоскопии и диагностики элементов конструкций новой техники. Однако дальнейшее развитие радиотеплового контроля связано с необходимостью решения ряда проблем:

- усиление в диапазоне СВЧ ничтожно малого полезного (информативного) шумового радиоизлучения ( $10^{-17} \dots 10^{-13}$  Вт) с тем, что бы выходной сигнал стал доступен регистрации, обработке и измерению;
- получение наибольшего отношения полезного сигнала (информативного ЭМИ) к помехе (собственному шуму и наводкам). Решение этой важной и сложной задачи усугубляется тем, что полезный сигнал и помеха однородны и статистически неразличимые случайные процессы;
- разработка методов высокоточного измерения ЭМИ и соответствующих алгоритмов обработки результатов измерений для исключения систематических погрешностей аддитивного и мультипликативного характера, а так же минимизации случайных погрешностей измерения;
- выбор типа и конструкции СВЧ антенны для приема ЭМИ в широком диапазоне частот и согласованной с объектом контроля;
- развитие методов подавления влияния собственных шумов аппаратуры путем коммутационно-модуляционной обработки принимаемых ЭМИ, включая метод периодического замещения, инвертирования и противопоставления СВЧ сигналов.

### **Литература**

1. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Развитие представлений об излучающей и поглощающей способности биологических объектов в диапазоне сверхвысоких частот// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - №2.- 1999. - С. 135 – 138.
2. Куценко В.П., Трегубов Н.Ф. Неразрушающий радиометрический метод контроля плотности кварцевой керамики радиопрозрачных термостойких обтекателей// Материалы 15-ой международной конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМико-2005). – Севастополь: „Вебер”, 2005. – С. 834-835.

3. Скрипник Ю.О., Шевченко К.Л., Куценко В.П., Трегубов М.Ф., Яненко О.П. Радиометричний контроль складу та стану об'єктів живої та неживої природи// Вісник КНУТД, №2(22), 2005. – С.13-18.

4. Скрипник Ю.О., Куценко В.П., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко О. П. Радиометричний кореляційний вимірювач потужності мікрохвильового діапазону // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія: „Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Випуск 88– Донецьк: „Лебідь”, 2005 – С.152-155.

5. Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф. Радиометрический контроль состава и свойств диэлектрических материалов// Материалы 16-ой международной конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМико-2006). – Севастополь: „Вебер”, 2006. – С. 762-764.

6. Патент №18320 (Україна), G01S13/00 Спосіб вимірювання енергетичного спектра слабких радіовипромінювань/ Куценко В.П., Скрипник Ю.О., Трегубов М.Ф., Шевченко К.Л., Яненко А.Ф., – №u200603339; Заявл. 28.03.2006; Опубл. 15.11.2006; Бюл. 11.

7. Ситько С.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Экспериментальное исследование излучения некоторых объектов в мм-диапазоне// Физика живого.– 1998. Т. 6, №1.– С. 15-18.

8. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание, измерение/ Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1973. – 167 с.

9. Саватеев А.В. Шумовая термометрия. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. 1987. – 132 с.

10. Рытов С.М. Теория электрических флюктуаций и теплового излучения. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. 470 с.

11. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф., Куценко В.П., Гимпилевич Ю.Б. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов/ Под ред. Ю.А. Скрипника. Житомир: изд-во «Волянь», 2003. – 408 с.

12. Брамсон М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. – М.: Наука. – 1964. – 118 с.

13. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И., Стадник Б.И., Ярышев Н.А. Температурные измерения: Справ. – К.: Наук. думка. 1984. – 494 с.

14. Скрипник Ю.А., Шевченко К.Л. Модуляционный радиометр// 14-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 13-17 сентября 2004 г.: Материалы конференции. – Севастополь: «Вебер», 2004. С. 747-750.