

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК РАДИОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ В С.В.Ч.-ДИАПАЗОНЕ

© 2011 г. О. А. Дьяконова, Ю. Н. Казанцев, С. В. Маречек

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. им. Академика Б.А. Введенского, 1

Поступила в редакцию 19.07.2010 г.  
После доработки 28.10.2010 г.

Предложено использовать модель коаксиальной измерительной камеры для оценки в с.в.ч.-диапазоне уровня интенсивности гармоник радиопоглощающего материала (р.п.м.). Приведены результаты измерений коэффициентов гармоник пленочного р.п.м. Показано существенное увеличение коэффициентов гармоник с повышением уровня мощности зондирующей частоты, а также их зависимость от длины исследуемых образцов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные радиопоглощающие материалы (р.п.м.) представляют собой различные структуры: однородные, слоистые, могут иметь более сложную структуру, обеспечивающую необходимые параметры поглощения и отражения. Р.п.м. состоят из диэлектрических, магнитных материалов с различными дискретными включениями, образующими, например, киральные структуры. Эффект поглощения в таких структурах достигается использованием материалов с большими значениями тангенса угла диэлектрических и магнитных потерь.

Электромагнитное поле  $\mathbf{E} = \mathbf{E}e^{j\omega t}$  или  $\mathbf{H} = \mathbf{H}e^{j\omega t}$  действующее как на внешней границе, так и внутри материала, создает электрические  $j_e$  и “магнитные”  $j_m$  токи, амплитуды которых зависят от мощности зондирующего электромагнитного поля и от значений комплексных проницаемостей материалов среды [1]

$$\begin{aligned} j_e &= -(i\omega/4\pi)\mathbf{D}, \\ j_m &= -(i\omega/4\pi)\mathbf{B}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $\mathbf{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \mathbf{E}$  – вектор электрической индукции;  $\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}$  – вектор магнитной индукции;  $\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon''$  – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость;  $\mu_r = \mu' + i\mu''$  – относительная комплексная магнитная проницаемость.

У некоторых из применяемых материалов, обладающих необходимыми характеристиками поглощения, наблюдается зависимость комплексной диэлектрической или магнитной проницаемостей от напряженностей электрического  $E$  или магнитного  $H$  полей. Эти зависимости наиболее

сильно проявляются для полупроводниковых материалов, сегнетоэлектриков и ферромагнетиков и могут быть в общем виде представлены в виде рядов по степеням  $E$  и  $H$  [2]:

$$\epsilon_r = \epsilon_n + \epsilon_1 E + \epsilon_2 E^2 + \dots, \quad (2)$$

$$\mu_r = \mu_n + \mu_1 H + \mu_2 H^2 + \dots, \quad (3)$$

где  $\epsilon_n$  и  $\mu_n$  – номинальные значения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей;  $\epsilon_{1,2,\dots}$  и  $\mu_{1,2,\dots}$  – коэффициенты степенного ряда, описывающие нелинейные свойства комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Количественное сравнение нелинейностей различных диэлектриков и ферритов осуществляется по дифференциальному параметру  $N_\epsilon = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dE}$  и  $N_\mu = \frac{1}{\mu_r} \frac{d\mu_r}{dH}$ , который вводится по аналогии с температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости  $TK_\epsilon = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dT}$ . Из выражений (2) и (3) легко получить, что коэффициенты  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  и  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  связаны с нелинейностью простыми соотношениями [2]:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \epsilon_r N_\epsilon, & \epsilon_2 &= \frac{\epsilon_r N_\epsilon}{2E}, \\ \mu_1 &= \mu_r N_\mu, & \mu_2 &= \frac{\mu_r N_\mu}{2H}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя значения комплексных проницаемостей (2), (3) в (1), получим спектры гармоник токов, действующих в среде и создающих отклик в виде отраженного сигнала.

**Таблица 1.** Характеристики ферритов для значений напряженности магнитного поля  $0-0.5H_c$  ( $\mu_n$  – начальная магнитная проницаемость,  $m_1$  – коэффициент амплитудной нелинейности магнитной проницаемости,  $\text{tg}\delta_m$  – тангенс угла магнитных потерь;  $f$  – рабочая частота)

Марка феррита	$\mu_n$	$m_1, 10^{-7}$ М/А	$\text{tg}\delta_m$	$f, \text{МГц}$	Уровень 2-й гармоники, дБ
10ВНП	10	0.7	0.01	15	-143
35ВНП	35	0.8	0.017	80	-142
55ВНП	55	5	0.0084	8	-126
60ВНП	60	5	0.01	7	-126
65ВНП	65	5	0.0084	8	-126
90ВНП	90	2	0.02	30	-134
150ВНП	150	90	0.05	20	-101
200ВНП	200	100	0.011	3	-100
300ВНП	300	120	0.013	3	-98.4

Отклик среды (в виде отраженной волны  $E_r$  или мощности  $P_r$ ) при воздействии падающей монохроматической волны  $\mathbf{E} = \mathbf{E}e^{i\omega t}$  представляет собой бесконечный спектр гармоник. Он может быть представлен в виде ряда Тейлора, что позволяет анализировать степень нелинейности проницаемостей в рабочей точке характеристики материала в зависимости от напряженностей электрического и магнитного полей в материале, независимо от причины возникновения нелинейности [3, 4]. Выражение, описывающее интенсивность потока мощности отраженного сигнала, имеет вид

$$P_r = P_0(1 - R_1)[b_1 + (1 - R_2)b_2 + (1 - R_3)b_3 + \dots], \quad (5)$$

где  $b_i$  – коэффициенты мощности  $i$ -ой гармоники;  $R_i$  – коэффициенты отражения мощности  $i$ -ой гармоники.

Нелинейные материалы, имея хорошие характеристики поглощения, часто обладают сильной зависимостью комплексных проницаемостей от температуры, дисперсности, механических напряжений, ориентации дискретных включений, истории воздействия мощных электрических и магнитных полей. Поэтому необходим контроль электромагнитных свойств используемых материалов на всех этапах технологического процесса изготовления р.п.м. Одним из параметров, который следует контролировать, является степень нелинейности комплексной проницаемости. Численно она выражается через коэффициент генерации гармоник [5]

$$K = \frac{b_2 + b_3 + \dots}{b_1}. \quad (6)$$

Часто на практике удобно измерять коэффициент генерации отдельно для второй, третьей и т.д. гармоник [5]. Например, для второй и третьей гармоник

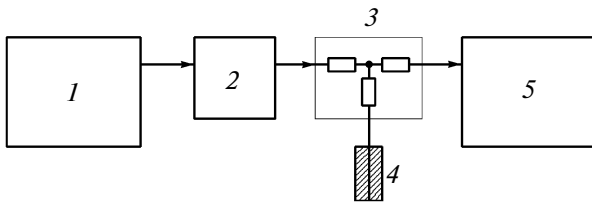
$$K_2 = \frac{b_2}{b_1} \text{ и } K_3 = \frac{b_3}{b_1}. \quad (7)$$

Здесь значения числителей представляют собой мощности генерации сигналов средней на частотах гармонического ряда, а значение знаменателей – мощность зондирующей частоты, прошедшую в среду образца.

Оценку порядка ожидаемых величин коэффициентов гармоник удобно сделать для ферритов, используемых в катушках с управлением значения их индуктивности, путем изменения напряженности постоянного магнитного поля. Для ферритов этой группы производители нормируют значение линейного изменения магнитной проницаемости  $m_1 = \mu_1/\mu_n$  ( $\mu_n$  – начальная магнитная проницаемость). Он показывает относительное изменение магнитной проницаемости для приращения переменного магнитного поля  $H$ , вызвавшего изменение магнитной проницаемости. Характеристики таких ферритов для значений напряженности магнитного поля  $0-0.5 H_c$  ( $H_c$  – коэрцитивная сила) приведены в табл. 1 [6].

Следует заметить, что для малой нелинейности среды значение дифференциального параметра нелинейности  $N_\mu$  близко к значению параметра  $m_1$ .

Таким образом, зная  $m_1$ , можно оценить для выше приведенных ферритов уровень генерации 2-ой гармоники, правда, со значительной погрешностью, так как для частот с.в.ч.-диапазона они могут значительно отличаться от значений, приведенных в табл. 1. Для ферритов, обладающих более нелинейной формой кривой намагничивания, например, для ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, значение коэффициента амплитудной нелинейности магнитной проницаемости будет значительно больше.



**Рис. 1.** Схема измерительной установки для исследования нелинейных свойств радиопоглощающих материалов. 1 – с.в.ч.-генератор зондирующей частоты; 2 – гребенчатый фильтр; 3 – резистивный тройник; 4 – измерительная коаксиальная камера; 5 – анализатор спектра.

Нелинейность р.п.м., изготовленного на основе феррита, можно оценить, используя измерительную камеру в виде коаксиальной линии. Образец поглощающего материала толщиной много меньшей одной четверти длины волны размещается в камере у закороченного конца и заполняет все свободное пространство. Это позволяет для анализа использовать эквивалентную модель в виде ферритового кольца с одним витком, равномерно распределенным по всему периметру кольца. Предположим, что через этот виток течет высокочастотный ток  $i$  коаксиальной линии, возбуждаемой выходной мощностью с.в.ч.-генератора. Напряженность магнитного поля, созданная этим током в ферритовом кольце на расстоянии  $r$  от оси, может быть представлена в виде [7]

$$H = \frac{iw}{2\pi r} = \frac{B}{\mu_r \mu_0}, \quad (8)$$

где  $w$  – число витков, в нашем случае  $w = 1$ . Ограничиваясь 2-ой гармоникой, для материала сердечника, обладающего нелинейностью магнитной проницаемости, можно написать

$$\mu_r(H) = \mu_n(H_0) + \mu_1 H. \quad (9)$$

Токи самоиндукции 1-ой и 2-ой гармоник будут равны

$$i_1 = \frac{\mu_n(H_0)}{\mu_r(H)} 2\pi r H, \quad \text{где } \frac{\mu_n(H_0)}{\mu_r(H)} \approx 1 \quad (10)$$

и

$$i_2 = \frac{\mu_1(H)H}{\mu_r(H)} 2\pi r H = 2\pi r H^2 m_1. \quad (11)$$

Найдем уровень мощности 2-ой гармоники (выраженной в дБ) относительно мощности зондирующей частоты (1-ой гармоники)

$$10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 20 \lg(m_1 H), \quad (12)$$

где

$$P_1 = i_1^2 \rho / 2 = 2\pi^2 r^2 H^2 \rho$$

– мощность 1-ой гармоники;

$$P_2 = i_2^2 \rho / 2 = m_1^2 2\pi^2 r^2 H^4 \rho$$

– мощность 2-ой гармоники;  $\rho$  – волновое сопротивление.

В правом столбце табл. 1 даны оценочные значения ожидаемых уровней мощности 2-ой гармоники относительно мощности зондирующей частоты (1-ой гармоники) для напряженности магнитного поля в единицах А/м. Из таблицы видно, что уровни находятся в диапазоне значений от  $-98.4$  до  $-143$  дБ, что позволяет сформулировать специфические требования как к методике измерения столь низких значений, так и к используемой измерительной аппаратуре.

Наиболее близким к естественным условиям использования пленочного р.п.м. является проведение измерений мощностей гармоник в свободном пространстве, где исследуемый образец достаточно больших размеров облучается в безэховой камере плоской монохроматической электромагнитной волной большой интенсивности. На практике реализация такого метода очень трудоемка из-за необходимости создания образцов больших размеров и достаточной толщины, а также получения требуемой плотности потока зондирующей мощности с очень малым значением собственных гармоник.

## 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Указанные трудности по созданию экспериментальной установки для исследования нелинейных эффектов в материале могут быть решены с использованием коаксиального измерительного тракта. Методика, в которой в качестве измерительной камеры применяется закороченный на конце отрезок коаксиальной линии, позволяет проводить все исследования без использования безэховой камеры. Малые размеры исследуемого образца облегчают его изготовление и не требуют применения генератора зондирующей частоты большой мощности.

Для исследования использовались образцы в виде цилиндрических втулок, изготовленные, как из цельного ферромагнитного материала, так и из пленочного материала, скрученного в рулон. Измерительная схема, изображенная на рис. 1, позволяет анализировать нелинейные свойства исследуемого образца в рабочем диапазоне частот коаксиального тракта используемой измерительной аппаратуры.

Для подачи мощности генератора зондирующей частоты в камеру с исследуемым образцом и измерения уровня мощности гармоник в измерительной установке использован резистивный мост (тройник), который принципиально широкополосен. Мощность зондирующего генератора подается на один из входов тройника и далее поступает на два выхода с ослаблением 6 дБ. К одному

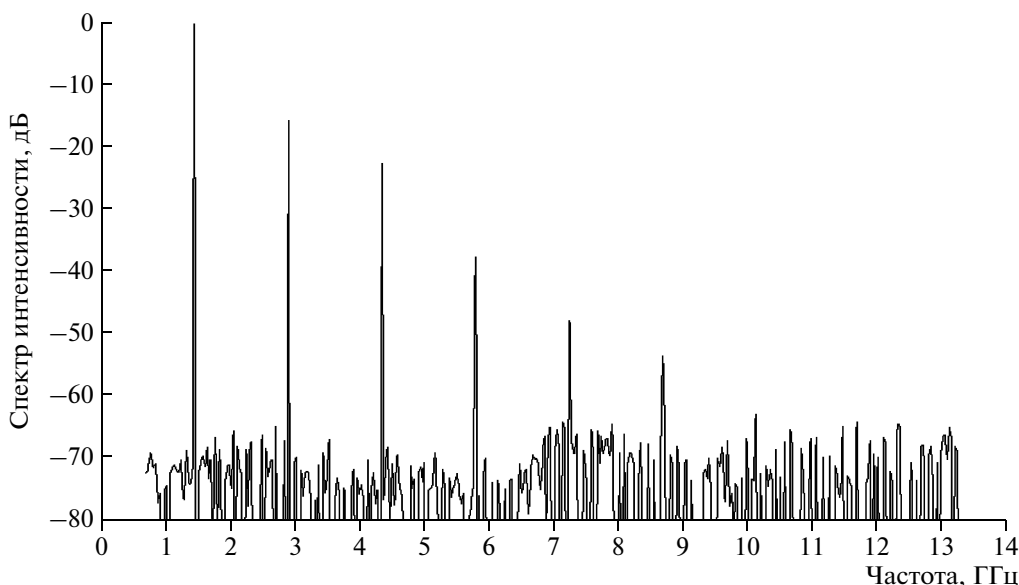


Рис. 2. Частотный спектр выходной мощности генератора – анализатора цепей E-5071B.

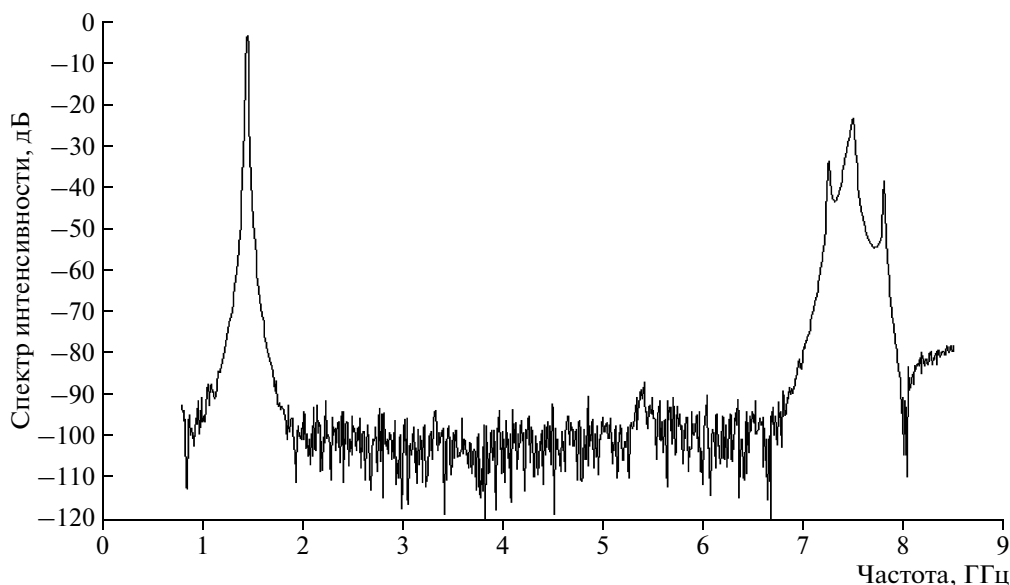


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра.

из выходов тройника подключается вход анализатора спектра, а к другому выходу – короткозамкнутая секция коаксиальной линии, с расположенным внутри образцом из поглощающего материала.

Эта методика измерения мощности генерации гармоник исследуемым материалом работает в том случае, если уровни мощностей собственных гармоник зондирующего генератора меньше, чем у исследуемого образца. В качестве генератора фиксированной зондирующей частоты применялся векторный анализатор цепей E-5071B

(фирмы Agilent Technologies) с выходной мощностью 1 или 10 мВт.

На рис. 2 представлен измеренный частотный спектр выходной мощности самого генератора. Кроме основной гармоники (частота 1.45 ГГц), в спектре присутствуют гармоники высших порядков, причем уровень их мощностей настолько велик, что невозможно обнаружить нелинейность материала в образцах с уровнем генерации, например, для 2-ой гармоники <math><-15\text{ дБ}</math>. Для увеличения чувствительности обнаружения гармоник в измерительной схеме, изображенной на рис. 1, на

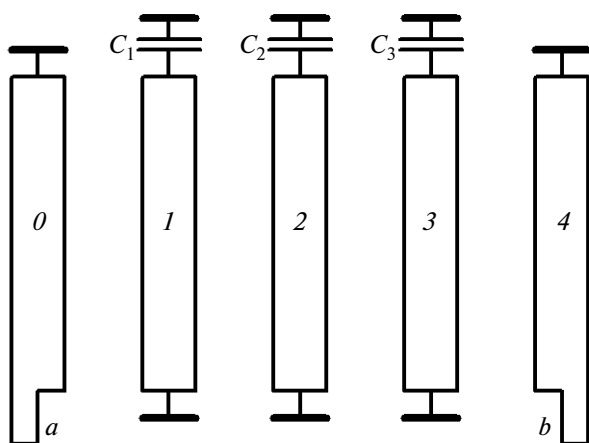


Рис. 4. Схема гребенчатого фильтра третьего порядка. 0 и 4 – согласующие оконечные звенья фильтра; 1, 2 и 3 – стержни резонаторов; а, b – вход и выход фильтра;  $C_1, C_2, C_3$  – оконечные емкости стержней резонаторов фильтра.

выходе генератора установлен полосовой гребенчатый фильтр третьего порядка, настроенный на частоту пропускания 1.45 ГГц. Измеренная частотная характеристика этого фильтра приведена на рис. 3.

Конструкция фильтра представляет собой ряд однонаправленных стержней, концы которых нагружены на конденсаторы переменной емкости. Стержни имеют одинаковую длину и разный диаметр [8]. Схема гребенчатого фильтра приведена на рис. 4.

При длине стержней  $1/8$  длины волны подавляются четыре гармоники сигнала, а при длине  $1/16$  – восемь гармоник. Достоинством такого гребенчатого фильтра является сильное затухание в широкой области задерживания при слабом ( $<3$  дБ) затухании в области пропускания. Фильтр пропускает 1-ю гармонику и подавляет на 90 дБ гармоники до 4-го порядка.

Мощность 1-ой гармоники удобно измерять анализатором спектра, когда вместо измерительной камеры с образцом к выходу тройника подключена согласованная нагрузка. В этом случае интерференцией для 1-ой гармоники можно пренебречь и мощность на входе анализатора спектра будет равна

$$P_1 = P_g K_t, \quad (13)$$

где  $P_g$  – мощность на выходе генератора (фильтра);  $K_t$  – коэффициент передачи моста. Мощность зондирующего сигнала (1-ой гармоники), поглощенная образцом, может быть представлена в виде

$$P_1' = P_g K_t (1 - R_1), \quad (14)$$

где  $R_1$  – коэффициент отражения измерительной камеры с образцом на частоте 1-ой гармоники. Мощность  $i$ -ой гармоники, генерируемая нелинейной средой и измеренная на входе анализатора спектра, может быть представлена в виде

$$P_i = P_1' K_i K_i (1 - R_i), \quad (15)$$

где  $R_i$  – коэффициент отражения измерительной камеры с образцом на частоте  $i$ -ой гармоники.

Подставляя в (15) значение мощности 1-ой гармоники из (13) и (14), получим выражение для вычисления коэффициентов генерации гармоник

$$K_i = \frac{P_i}{P_1 (1 - R_1) (1 - R_i) K_t}. \quad (16)$$

Выражение (16) получено в предположении использования идеального зондирующего генератора, у которого отсутствуют собственные гармоники выше 1-ой.

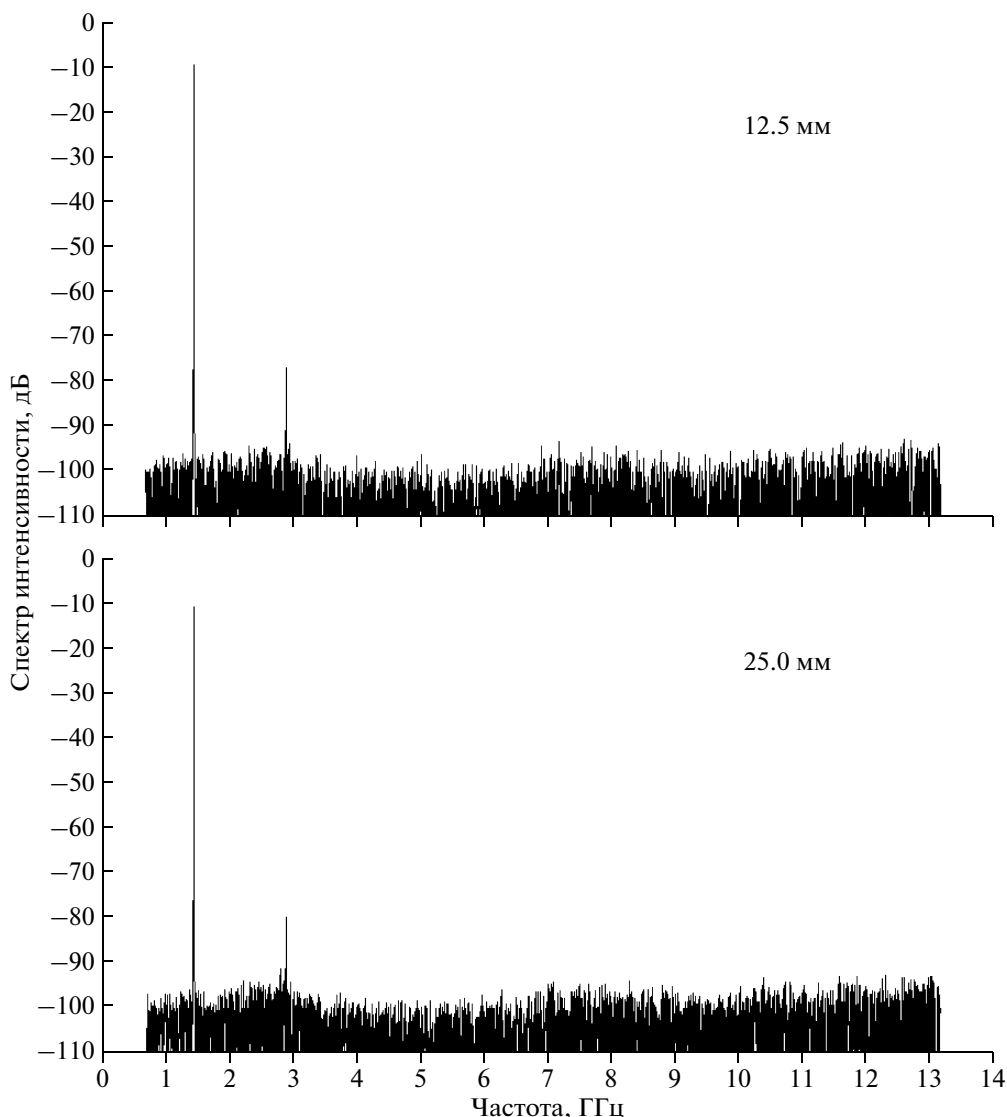
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК

С помощью измерительной установки, изображенной на рис. 1, исследованы образцы из ферритов, представленных в табл. 1, и из высокочастотных ферромагнитных материалов на основе карбонильного железа. Исследуемые образцы имели длину 12–15 мм и набирались в стопку из ферритовых кольцевых сердечников.

Зондирование исследуемых образцов проводилось на частоте 1.45 ГГц мощностью 1 и 10 мВт. Спектральные измерения интенсивности гармоник отраженного сигнала от исследуемых образцов проводились с помощью анализатора спектра E-4405B (фирмы Agilent Technologies) в диапазоне частот 0.7–13.3 ГГц.

В экспериментах, однако, ни с одним из упомянутых выше ферритов не удалось обнаружить наличие высших гармоник, интенсивность которых превысила бы уровень собственного шума анализатора спектра (–90 дБ). Эти результаты исследований согласуются с оценками ожидаемого уровня 2-ой гармоники, полученные выше и приведенные в правом столбце табл. 1.

Проведены исследования с использованием образцов из пленочного р.п.м., который представлял собой лавсановую пленку толщиной 35 мкм, на одну из сторон которой общей толщиной ~10 мкм нанесены слои наночастиц окислов железа, кобальта и никеля. Пленочный р.п.м. скручивали в рулон с  $\varnothing_{\text{внеш}} 7$  мм и  $\varnothing_{\text{внут}} 3$  мм и затем изготавливали образцы длиной 12.5 и 25 мм в виде цилиндрических втулок. Диаметры образца позволяли заполнять им все свободное пространство между проводниками коаксиальной измери-



**Рис. 5.** Частотный спектр генерации гармоник образцов длиной 12.5 и 25 мм при зондировании частотой 1.45 ГГц и мощностью  $-8.5$  дБ · м.

тельной камеры, располагая его непосредственно у закороченного конца.

На рис. 5 представлены результаты измерений спектров для образцов, предварительно полностью размагниченных в убывающем до нуля магнитном поле промышленной частоты. На спектрограммах хорошо видны уровни интенсивности вторых гармоник. Уровень интенсивности гармоник более высокого порядка ниже  $-(90-100)$  дБ. При этом интенсивность 2-ой гармоники у длинного образца (25 мм) на 3 дБ ниже, чем у образца длиной 12.5 мм.

На рис. 6 представлены результаты измерений спектров для образцов длиной 12.5 и 25 мм соответственно при увеличенной в 10 раз мощности зондирующей частоты. На спектрограммах хоро-

шо видны значительно возросшие по сравнению со значениями на рис. 5 уровни интенсивности 2-х гармоник. При этом у более длинного образца (25 мм) интенсивность 2-ой гармоники ниже на 2 дБ относительно образца длиной 12.5 мм. Уровень интенсивности гармоник более высокого порядка меньше  $-(90-100)$  дБ.

Значительно более высокая мощность зондирующей частоты выводит рабочую точку на очень нелинейный участок петли гистерезиса. Этим, по-видимому, можно объяснить существенное увеличение (на 20–25 дБ) уровня 2-ой гармоники на спектрограммах рис. 6.

Спектрограммы, приведенные на рис. 5, рис. 6, дают лишь качественную картину исследуемых материалов. Для более объективной оценки нели-

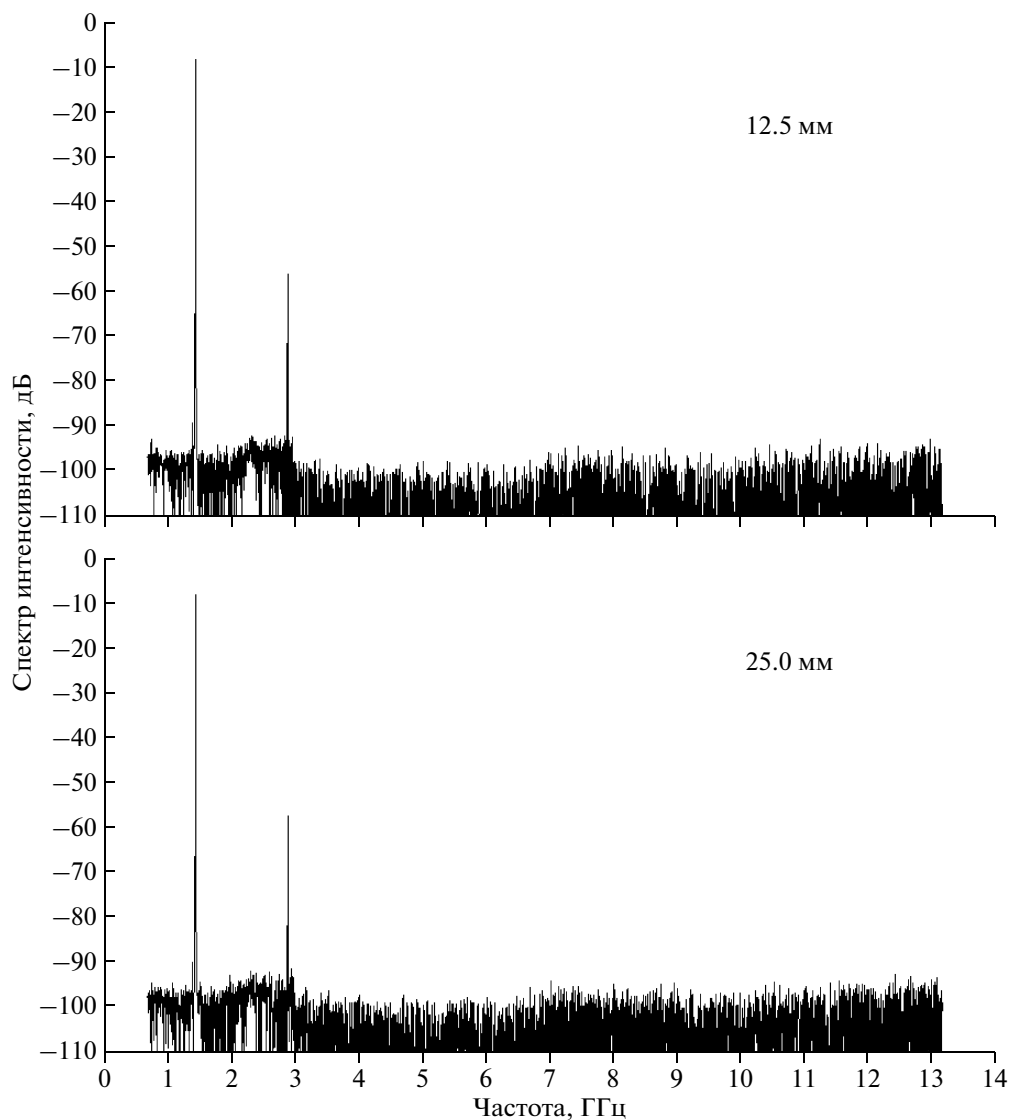


Рис. 6. Частотный спектр генерации гармоник образцов длиной 12.5 и 25 мм при зондировании частотой 1.45 ГГц и мощностью 1.5 дБ · м.

нейности р.п.м. следует воспользоваться выражением (16) и вычислить коэффициенты гармоник, предварительно измерив векторным анализатором цепей и анализатором спектра мощность зондирующего сигнала и интенсивности гармо-

ник, а также необходимые значения коэффициентов передачи и отражения.

Так как в измерительной установке использовался полосовой гребенчатый фильтр с подавлением в полосе режекции  $\geq 90$  дБ, то точность определения коэффициентов генерации гармоник можно оценить по значениям максимальных погрешностей определения коэффициентов гармоник, исходя из формулы (16) и инструментальных погрешностей используемых приборов, которые были приняты равными:

–  $\delta P_1 = 0.01$  дБ – погрешность определения мощности зондирования;

–  $\delta P_i = 0.01$  дБ – погрешность определения мощности  $i$ -ой гармоники;

Таблица 2

Длина образца, мм	$P_1$ , дБ · м	$P_2$ , дБ · м	$R_1$	$R_2$	$K_2$
12.5	-8.5	-57.7	0.89	0.51	$(1.7 \pm 1.5) \cdot 10^{-6}$
25	-8.5	-60.7	0.75	0.53	$(5.2 \pm 5.0) \cdot 10^{-7}$
12.5	1.5	-56.6	0.89	0.51	$(1.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$
25	1.5	-58.7	0.75	0.53	$(5.8 \pm 3.0) \cdot 10^{-5}$

–  $\delta R_1 = 0.002$  – погрешность определения коэффициента отражения измерительной камеры с образцом на частоте 1-ой гармоники;

–  $\delta R_i = 0.002$  – погрешность определения коэффициента отражения измерительной камеры с образцом на частоте  $i$ -ой гармоники;

–  $\delta K_r = 0.01$  дБ – погрешность определения коэффициента передачи тройника.

Результаты измерений и вычислений для образцов из пленочного р.п.м. приведены в табл. 2.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в измерительной схеме полосового гребенчатого фильтра позволило понизить уровень интенсивности собственных гармоник зондирующего генератора дополнительно на 90 дБ. Это обеспечило высокую чувствительность измерительной системы и устранило негативное влияние интерференции на точность получаемых результатов измерения интенсивностей гармоник, генерируемых исследуемым поглощающим материалом.

Показано, что предварительные оценки возможных значений интенсивностей гармоник, полученные в модельных расчетах, не противоречат результатам измерений.

Экспериментальные исследования образцов из пленочного р.п.м. продемонстрировали зависи-

мость коэффициента генерации гармоник от толщины образца и уровня зондирующей мощности.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований №№ 10-02-00053-а; 10-08-00018-а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978.
2. *Рез И.С., Поплавко Ю.М.* Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. М.: Радио и связь, 1989.
3. *Карпман В.И.* Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973.
4. *Бхатнагар П.* Нелинейные волны в одномерных диспергирующих системах. М.: Наука, 1978.
5. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1971.
6. *Михайлова М.М., Филиппов В.В., Мусликов В.П.* Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. М.: Радио и связь, 1983.
7. *Немцов М.В., Шамаев Ю.М.* Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. М.: Энергоиздат, 1981.
8. *Зелях Э.В., Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Брилон В.С.* Миниатюрные устройства УВЧ и ОВЧ диапазонов на отрезках линий. М.: Радио и связь, 1989.