

УДК 621.315.5/6

## КОНСТРУКЦИИ ГИБКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ СВЧ ДИАПАЗОНА

Л.М. ЛЫНЬКОВ, Т.В. БОРБОТЬКО, В.А. БОГУШ, Н.В. КОЛБУН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 9 января 2003*

Рассмотрены основные методы создания экранов электромагнитного излучения и радиопоглощающих материалов. Дано описание гибких конструкций экранов на основе машинно-вязанных полотен. Приведены результаты измерения поглощающих материалов с микропроводом. Описан синтез и исследованы радиопоглощающие конструкции на основе композиционных волокнистых материалов. Приводятся результаты исследований радиопоглотителей с жидкостными наполнителями.

*Ключевые слова:* электромагнитное излучение, машинно-вязаное полотно, металлосодержащие композиты, эффективность экранирования.

### Введение

Неизбежность воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на население и окружающую живую природу стало данью современному техническому прогрессу и все более широкому применению телевидения и радиовещания, радиосвязи и радиолокации, использования сверхвысокочастотных (СВЧ) излучающих приборов и технологий и т.п. И хотя возможна определенная канализация излучения, уменьшающая нежелательное облучение населения, и регламентация работ излучающих устройств, дальнейший технический прогресс все же повышает вероятность воздействия ЭМИ на человека.

Наиболее чувствительными к воздействию электромагнитных полей (ЭМП) являются нервная и сердечно-сосудистая система. Электромагнитные поля вызывают изменения кровотока, нарушения со стороны эндокринной системы, метаболических процессов, заболевания органов зрения.

В последние годы появляются сообщения о возможности индукции ЭМИ злокачественных заболеваний. Еще немногочисленные данные все же говорят, что наибольшее число случаев приходится на опухоли кроветворных тканей и на лейкоз в частности, развитие раковых заболеваний [1].

Самые опасные поля — это поля СВЧ диапазона. Сантиметровые и миллиметровые волны действуют на кожу, а дециметровые, проникая на глубину 10–15 см, уже напрямую воздействуют на внутренние органы [2].

В связи с этим разрабатывается комплекс мер по устранению отрицательного влияния ЭМИ на человеческий организм, а также локализации утечки информации по электромагнитным каналам и противостоянию электромагнитному терроризму и оружию направленной энергии.

Наиболее эффективным методом ослабления электромагнитного излучения является повышение эффективности электромагнитного экранирования.

В процессе разработки экранов учитываются явления поглощения и отражения электромагнитной энергии. Реально электромагнитная энергия частично затухает в толщине экрана, частично отражается и частично проходит через экранирующий материал. Особенно актуальна проблема создания гибких, воздухопроницаемых, технологичных и дешевых материалов, обеспечивающих достаточную степень подавления ЭМИ в широком диапазоне частот.

### Методы создания гибких электромагнитных экранов и радиопоглочителей

Гибкое полотно из волокнистых материалов, используемое в конструкциях радиопоглощающих экранов, может быть изготовлено несколькими способами: в виде ткани, трикотажа, плетеного или нетканого материала и др. Ткацкое и трикотажное производства в качестве сырья для изготовления полотен используют пряжу и различные типы нитей. Нетканые материалы получают

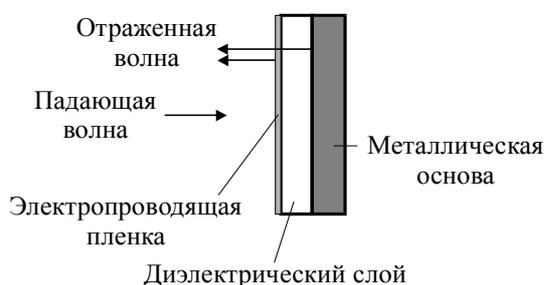


Рис. 1. РПП резонансного типа

из натуральных или химических волокон вязально-прошивным, иглопробивным, вязально-войлочным и клеевым методом. При подготовке пряжи волокнистые материалы проходят технологические операции рыхления, трепания, кордочесания, гребнечесания, прядения и кручения, в результате которых формируют пряжу повышенной ровноты и прочности, требуемого волокнистого состава, обладающую определенными физико-механическими свойствами [3].

Полотна, полученные каждым из перечисленных способов, характеризуются внутренним строением, которое различается по взаимному расположению составляющих полотно волокон или нитей. Для создания эластичных

конструкций экранов ЭМИ наиболее предпочтительным является использование трикотажных полотен, так как производительность трикотажных станков значительно выше производительности ткацкого оборудования, а трудоемкость изготовления трикотажа на 21–28 % меньше трудоемкости изготовления тканей. Основным преимуществом трикотажа является большая экономия сырья и неприхотливость оборудования к качеству используемых нитей, а также высокая эластичность полотен [4]. Кроме того, трикотажное оборудование позволяет реализовать большее количество видов переплетений по сравнению с ткацким и, следовательно, получать полотна с более сложной и разнообразной структурой.

Выделяют четыре основных конструкционных типа радиопоглощающих покрытий (РПП) [5]:

1. РПП резонансного типа. Основаны на явлении суперпозиции отраженных от нескольких поверхностей волн (рис. 1).

В случае, когда волны, отраженные от поверхностей электропроводящей пленки и металлической основы, находятся в противофазе и одинаковы по амплитуде, происходит их взаимная компенсация. Создание разности фаз в полволны осуществляют нанесением  $\lambda/4$  слоя диэлектрика, при этом его толщина определяется по формуле

$$\ell = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon'}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны в материале,  $\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве.

Основными недостатками таких РПП являются узкополосность, ухудшение поглощающих свойств при наклонном падении волны, зависимость от поляризации и необходимость увеличения толщины при уменьшении частоты ЭМИ.

2. Многослойные РПМ, основанные на поглощении многократно переотраженной электромагнитной волны внутри слоистой металл-диэлектрической структуры, причем толщина слоев принимается обычно меньше толщины скин-слоя на рабочей длине волны. Возможно создание такого материала, электрофизические характеристики которого последовательно изменяются от слоя к слою [6]. Слои такого материала располагаются в порядке убывания  $\varepsilon$ , но толщина слоев находится в зависимости от  $\varepsilon$  слоя и определяется соотношением:

$$\frac{\varepsilon_1}{d_1} = \frac{\varepsilon_2}{d_2} = \frac{\varepsilon_3}{d_3} = \frac{\varepsilon_4}{d_4} = \text{const}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  — диэлектрическая проницаемость 1, 2, 3, 4 слоев,  $d_1, d_2, d_3, d_4$  — толщина слоев.

3. РПМ с распределенной проводимостью или поглотители градиентного типа, в которых проводимость, диэлектрическая проницаемость или магнитная проницаемость материала увеличиваются по мере проникновения в глубину материала [7].

4. РПП с геометрическими неоднородностями. Такой тип РПП подразумевает покрытие в виде конусов, пирамид, шахт, клиньев и других геометрических структур, преобразующих плоскую падающую волну в поверхностную, с последующим ее гашением в поверхностном диэлектрическом слое.

Кроме того, радиопоглощающие конструкции (РПК) могут быть выполнены в жесткой и гибкой форме, причем степень гибкости будет зависеть от типа связующего и от структуры самого материала.

Помимо РПП, использующих конструктивные и геометрические особенности, существуют поглотители, обеспечивающие более эффективное поглощение ЭМИ за счет свойств самих материалов. Обычно это материалы со значениями тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь больших единицы, что позволяет уменьшить общую толщину РПП. Поэтому при создании РПМ большое распространение получили композитные материалы, состоящие из частиц порошкового металлического или металлоподобного материала с определенной проводимостью и магнитными свойствами, которые разделены прослойками из диэлектрической фазы. Наиболее перспективным направлением является использование гетерогенных двух и более компонентных материалов, но влияние микроструктуры, химического и фазового состава компонент на электрофизические свойства синтезированных материалов еще практически не изучено.

### Описание конструкций гибких покрытий на основе машинно-вязаных полотен. Полотна на основе микропровода

Условия изготовления и богатый выбор существующих видов переплетений позволяют получать материалы из комплексных текстурированных нитей, дополнительно содержащих упорядоченные структуры из микропровода, которые различаются по способу переплетения, материалу провода и виду рисунка. В первую очередь строение трикотажного полотна определяется видом переплетения и классом машины (соответствует количеству игл в игольнице на единицу длины: английский или саксонский дюйм), на котором оно произведено [8].



Рис. 2. Петля из микропровода с несущей нитью

В процессе вязания трикотажа используются натуральные (хлопок, лен, шерсть), искусственные (вискоза), синтетические (полиамидные, полиэфирные, полиакрилонитрильные и др.) волокна, а также металлические нити, применение которых позволяет осуществлять распределение проводящего материала в объеме полотна.

Одним из способов создания пространственной конфигурации микропровода является прокладывание его вместо одной или нескольких нитей, запровадленных в нитеводы трикотажной вязальной машины. При вязании на кулирных машинах металл будет распределен вдоль петельного ряда, а на основовязаных — вдоль петельного столбика. Таким способом может быть изготовлен полностью металлический трикотаж. В случае использования рисунчатых переплетений может быть сформирована конструкция, содержащая ще-

ли или уплотнения определенной формы и распределения. Однако технология вязания трикотажного полотна из металлической нити обладает повышенной материалоемкостью, а сами полотна теряют эластичность и износостойкость, поэтому ее сложно использовать в конструкциях с часто изменяющейся формой.

При формировании рисунка из металлической нити или микропровода путем провязывания их совместно с ассистирующей нитью (рис. 2) из несущего органического материала износостойкость и гибкость трикотажных полотен значительно увеличиваются.

Исследовались образцы изготовленные основовязаным способом, содержащие микропровод из нержавеющей стали диаметром 0,08 и 0,055 мм, а так же сетчатый экран, выполненный из микропровода с нержавеющей стали.

Проводились измерения эффективности экранирования образцов экранов на основе трикотажных материалов в следующих частотных диапазонах 30–4100 МГц и 37,5–142 ГГц. Измерения эффективности экранирования сетчатого экрана из микропровода с нержавеющей стали проводились в диапазоне 30–4100 МГц. Результаты измерений приведены на рис. 3, 4 и сглаживались для исключения шумовых выбросов на частотных характеристиках.

Данные частотные диапазоны выбраны исходя из того, что большинство радиоэлектронных средств (телевидение, радиосвязь) работают в этих частотных диапазонах.

Параметры исследуемых образцов приведены в таблице:

**Параметры образцов**

Образец	1	2	3
2А, мм	2,32	2,44	2,0
В, мм	0,91	0,75	0,75
R, мм	1,5	1,5	1,5

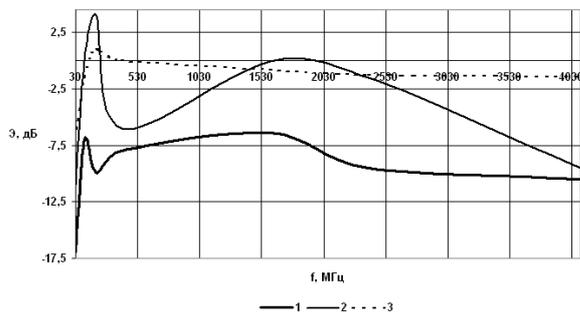


Рис. 3. Эффективность экранирования сетчатых экранов в диапазоне частот от 30 до 4100 МГц для различных образцов: 1 — образец из микропровода из нержавеющей стали; 2 — образец на основе машинно-вязаного полотна с микропроводом диаметром 0,055 мм; 3 — образец на основе машинно-вязаного полотна с микропроводом диаметром 0,08 мм

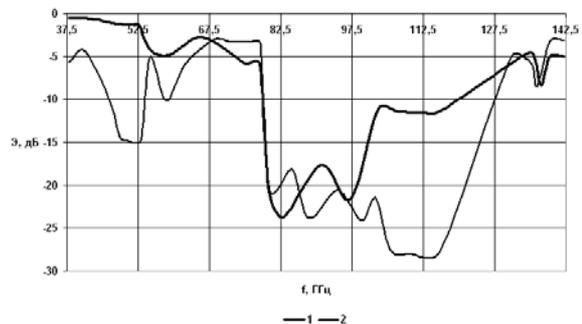


Рис. 4. Эффективность экранирования сетчатых экранов в диапазоне частот от 37,5 до 142 ГГц для различных образцов: 1 — образец на основе машинно-вязаного полотна с микропроводом диаметром 0,055 мм; 2 — образец на основе машинно-вязаного полотна с микропроводом диаметром 0,08 мм

Амплитудно-частотные характеристики эффективности экранирования исследуемых образцов с микропроводом, представленные на рис. 3, 4, имеют неоднородный характер. В частотном диапазоне 30–4100 МГц у экранов, изготовленных машинно-вязаным способом с микропроводом диаметром 0,055 и 0,08 мм в полосе частот от 100 до 400 МГц, максимальное значение эффективности экранирования достигает уровня 4 дБ (рис. 3.). Это объясняется переизлучением ЭМИ, причем в данном случае экраны выступают в роли антенн. Однако, как можно видеть из того же рис. 3, эффект переизлучения ЭМИ уменьшается с увеличением диаметра мик-

ропровода. В данном частотном диапазоне образец с диаметром микропровода 0,08 мм имеет более сглаженную амплитудно-частотную характеристику.

Наличие неоднородностей амплитудно-частотных характеристик эффективности экранов в частотном диапазоне 37,5–142 ГГц (рис. 4) обусловлено влиянием реактивной составляющей сопротивления сетчатой структуры. При увеличении частоты все более значимую роль начинает играть индуктивность проводников и емкостные связи между отдельными участками ячеек, а также поверхностный эффект [5].

При увеличении частоты вклад реактивного индуктивного сопротивления в общее сопротивление провода оказывается значительно больше активной части. Однако на эффективность экрана дополнительно оказывают влияние уменьшение переходных емкостных сопротивлений между проводами и поверхностный эффект.

На низких частотах эффективность экранов можно повысить с помощью использования материалов с высокой электропроводностью. Более эффективными в диапазоне низких частот являются экраны, содержащие микропровод большего диаметра, но при увеличении частоты эффективность экранов с различным диаметром микропровода становится одинаковой.

### Синтез волокнистых металлосодержащих композитов и их применение в конструкциях поглотителей

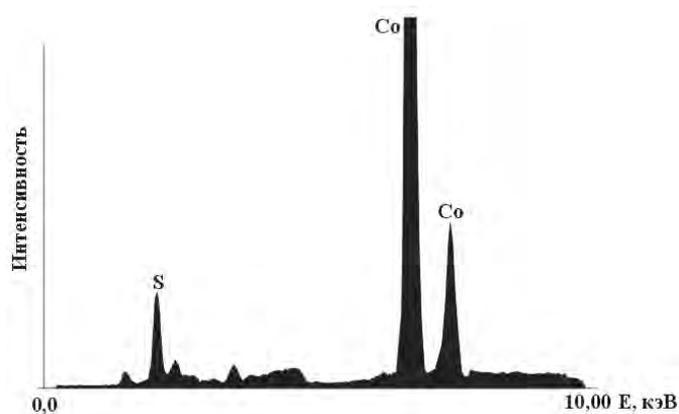


Рис. 5. Спектр синтезированного материала

материалы, обладают экранирующими электромагнитные излучения и радиопоглощающими свойствами [10]. Кобальт обладает схожими с никелем физико-химическими свойствами, однако кобальтсодержащие волокнистые материалы обладают меньшим коэффициентом отражения электромагнитных излучений сверхвысокочастотного диапазона [11], что связано с различиями в структуре материалов.

В качестве основы для синтеза нами использовался подвергнутый полимераналогичным превращениям [12] волокнистый полиакрилонитрил (ПАН), в результате которых повышалась сорбционная емкость волокна по отношению к ионам переходных металлов. Синтез проводился в три стадии. На первой стадии осуществляли сорбцию ионов  $\text{Co}_2^+$  из водного раствора  $\text{CoSO}_4$  указанными волокнами, на второй — формирование каталитических центров металлизации восстановлением сорбированных ионов металла, на третьей — осаждение.

Применение волокнистых материалов в конструкциях электромагнитных экранов позволяет получать гибкие модульные покрытия пониженной толщины и массы с анизотропией электрических и магнитных свойств по толщине [9].

Наиболее перспективным методом является химическое осаждение металлов. Использование химических реакций восстановления ионов металлов из водных растворов позволяет контролировать процесс осаждения и получать покрытия с регулируемыми характеристиками. Показано, что синтезированные методом химического осаждения никеля волокнистые

Кобальт образовывался при восстановлении сорбированных ионов  $\text{Co(II) Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  в присутствии в качестве катализатора металлических частиц кобальта, полученных на второй стадии синтеза. Реакция восстановления является автокаталитической, осаждение проводили при температуре  $55 \pm 5^\circ\text{C}$ . Гравиметрическим методом установлено, что масса осадка лимитируется концентрацией каталитических центров и достигает 15% от массы исходного волокна [13].

Элементный состав и наличие в синтезированном материале атомов кобальта определяли методом рентгеновской спектроскопии, обладающим высокой чувствительностью и селективностью [14]. Была использована установка JVAR (Jordan Valley Applied Radiation), условия анализа: образец — три отрезка машинно-вязаного полотна из синтезированного волокнистого материала массой 500 мг каждый; Si(Li)-детектор размером  $80 \text{ мм}^2 \times 3 \text{ мм}$ ; коллиматор — 2 мм; возбуждение излучением рентгеновской трубки с золотым анодом; напряжение на трубке — 12 кВ, ток 0,4 мА; время анализа 100 с; фильтрация 2-Ti; диапазон регистрации до 10 кэВ; рабочая атмосфера — воздух. На спектре синтезированного материала (рис. 5) обнаружены пики, соответствующие переходам  $K_{\alpha_{1,2}}$  серы (энергия 2308 эВ),  $K_{\alpha_{1,2}}$  (энергия 6929 эВ) и  $K_{\beta_1}$  (энергия 7648 эВ) кобальта, что позволяет сделать заключение о наличии в синтезированном материале атомов кобальта и серы.

Идентификацию химического состава частиц осуществляли методом рентгенофазового анализа с помощью ASTM картотеки [15]. Для проведения исследований использовалась установка ДРОН-3 с фильтрованным  $\text{CuK}_\alpha$  излучением (длина волны  $\lambda = 1,5417737 \text{ \AA}$ ). Запись дифракционной картины на диаграммную ленту производилась со скоростью 1000 имп/с в диапазоне углов от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ . Установлено, что на дифрактограмме синтезированного материала кроме пика, обусловленного влиянием подложки — модифицированного полиакрилонитрила (межплоскостное расстояние  $5,069 \text{ \AA}$ ), присутствуют пики, соответствующие металлическому кобальту кубической модификации, а также соединениям кобальта с серой:  $\text{CoS}_2$  и  $\text{Co}_4\text{S}_3$  (рис. 6).

Синтезированные волокнистые материалы отличались высокой химической активностью

по отношению к парам воды и кислороду воздуха, что отражалось в увеличении удельного электрического сопротивления и окраски волокон.

Удельное электрическое сопротивление синтезированных материалов, измеренное двухконтактным методом [16], не превышало  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Из синтезированных волокнистых материалов машинно-вязаным способом были получены полотна, используемые в многослойных градиентных конструкциях гибких радиопоглощающих покрытий в качестве согласующего слоя. Исследования электромагнитных свойств радиопоглощающих покрытий проводили в частотном диапазоне 1,5–118 ГГц с помощью линейки автоматизированных векторных анализаторов цепей: VNA 1,5-18, VNA 18-25, VNA 25-37, VNA 78-118 и панорамного измерителя модулей коэффициента стоячей волны и коэффициента передачи Я2Р-67. Оценка эффективности поглощения электромагнитной энергии

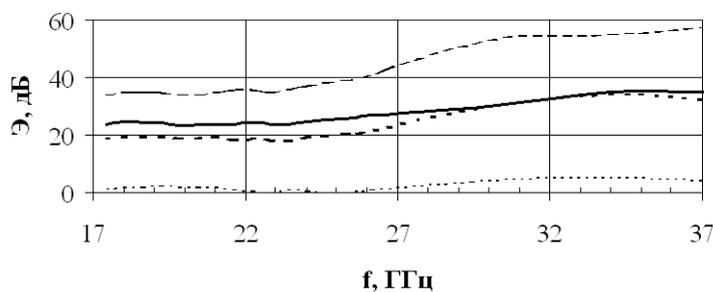


Рис. 7. Зависимость общей эффективности экранирования образцов от частоты: 1 —  $\text{Co}$ ; 2 —  $\text{Ni}$ ; 3 — двухслойный  $\text{Co-Ni}$ ; 4 — двухслойный  $\text{Ni}$

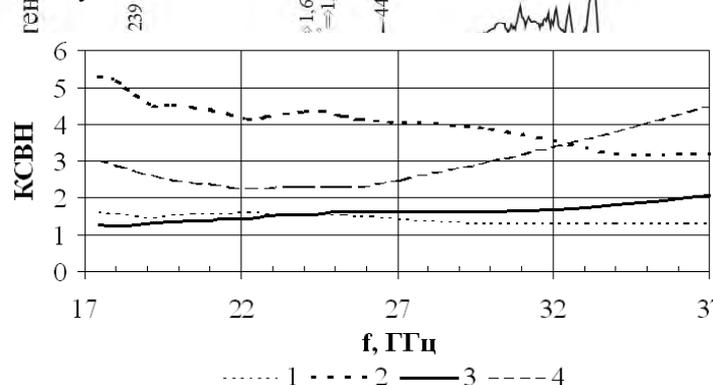


Рис. 8. Зависимость КСВН образцов от частоты: 1 —  $\text{Co}$ ; 2 —  $\text{Ni}$ ; 3 — двухслойный  $\text{Co-Ni}$ ; 4 — двухслойный  $\text{Ni}$

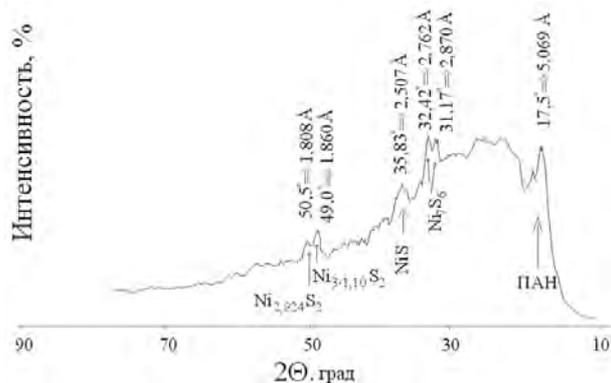


Рис. 9. Дифрактограмма синтезированного материала

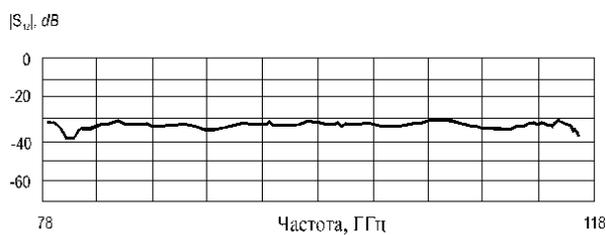


Рис. 10. Частотные характеристики коэффициента передачи для образца с никелевыми кластерами

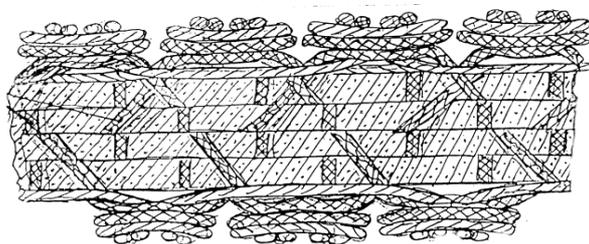


Рис. 11. Строение объемного полотна

в качестве первого слоя материал, обладающий наименьшим коэффициентом отражения. Наблюдаемое увеличение эффективности экранирования с увеличением частоты может быть связано с уменьшением толщины скин-слоя и, следовательно, увеличением затухания ЭМИ в толщине экрана. Для двухслойных никельсодержащих конструкций увеличение эффективности может быть обусловлено отражением волны от границ раздела.

Аналогичным образом были изготовлены образцы с осажденными ионами  $Ni_{2+}$ . Синтез проводился в три стадии, как для образцов с осажденными ионами  $Co_{2+}$ .

Элементный состав и наличие в синтезированном материале атомов никеля определяли методом рентгеновской спектрометрии, обладающим высокой чувствительностью и селективностью [14]. Была использована установка JVAR (Jordan Valley Applied Radiation), условия анализа: образец — три отрезка машинно-вязаного полотна из синтезированного волокнистого материала массой 500 мг каждый; Si(Li)-детектор размером  $80 \text{ мм}^2 \times 3 \text{ мм}$ ; коллиматор — 2 мм; возбуждение излучением рентгеновской трубки с золотым анодом; напряжение на трубке — 12 кВ, ток 0,4 мА;

осуществлялась сравнением измеренных значений модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  и коэффициента передачи  $|S_{12}|$  покрытия, образец которого выступал в качестве исследуемого четырехполосника, закрепляемого между рупорных антенн или фланцев волноводов измерительного тракта [9].

Установлено, что амплитудно-частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи покрытий из кобальтсодержащих волокон в диапазоне 20-118 ГГц имеют нерезонансный характер. Величина модуля коэффициента отражения покрытия в этом диапазоне не превышает уровня – 17 дБ, при этом значение модуля коэффициента передачи уменьшается с – 10 дБ до –30 дБ. Показано, что использование кобальтсодержащих волокнистых материалов для изготовления согласующего слоя многослойного радиопоглотителя позволяет получать покрытия эффективность которых достигает 70 дБ.

Изучение многослойных конструкций волокнистых металлосодержащих композитов показало, что увеличения эффективности можно добиться, используя многослойные структуры или увеличивая количество осаждаемого материала (рис. 7, рис. 8). Наиболее эффективными оказываются многослойные конструкции на основе никелированных волокон, однако сопоставление зависимостей  $\varepsilon(f)$  и  $K_{СВН}(f)$  позволяет сделать вывод, что для создания поглощающих материалов большой интерес представляют конструкции, содержащие

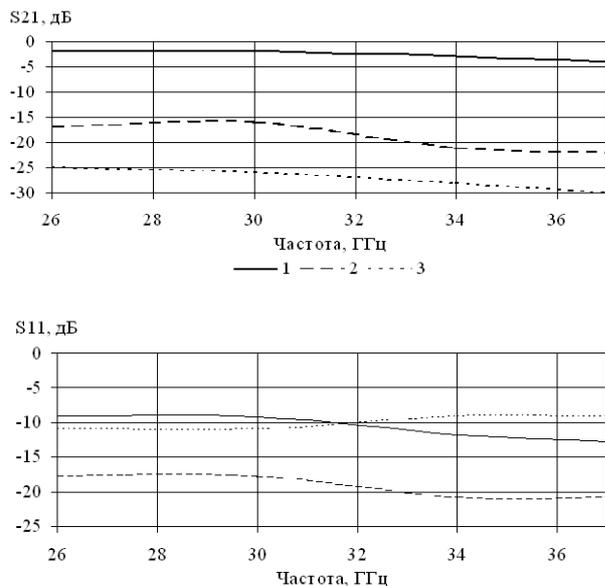


Рис. 12. Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения полотен: 1 — сухой образец; 2 — образец, пропитанный дистиллированной водой; 3 — образец, пропитанный водопроводной водой

модифицированного ПАН с никелем, имеют равномерную зависимость на уровне  $-30 \div -40$  дБ, причем эффективность экранирования зависит от количества металла в материале. Кроме того, при использовании многослойного покрытия результирующий коэффициент подавления увеличивается.

### Радиопоглотители с жидкостными наполнителями

В процессе эксплуатации экраны и особенно маскирующие материалы подвергаются воздействию внешних факторов, одним из которых является влажность. Изучение влияния водных и растворных наполнителей представляется особенно интересным, так как вода, например, сама по себе является хорошим поглотителем энергии ЭМИ, однако ее применение ограничено конструктивными сложностями, связанными с теплоотводом и фиксацией жидкости в определенном объеме.

Кроме того, вода является составляющей живых организмов, клеток растений, животных, человека, и даже малые дозы ЭМИ вызывают изменения в физиологических процессах, протекающих в биосфере [17].

Для исследования влияния жидкого наполнителя использовалось фильтровальное трикотажное полотно с низким гидросопротивлением и высокой гигроскопичностью, имеющее сложное строение (рис. 11). Результаты проведенных измерений показывают перспективность использования пропитанных в жидких средах волокнистых пористых материалов для поглощения ЭМИ СВЧ диапазона. Пропитывание гибких экранов водой увеличивает их эффективность на 10-20 дБ [18, 19].

При пропитке водопроводной водой, которая обладает более высокой электропроводностью по сравнению с дистиллированной, увеличение абсолютной величины коэффициента передачи происходит из-за дополнительного поглощения ЭМВ в материале за счет потерь на проводимость. Таким образом, использование пропитки водой волокон трикотажного экрана увеличивает количество поглощаемой в материале энергии ЭМИ и практически не влияет на отражающие свойства материала. Использование составного наполнителя для таких материалов позволяет повысить эффективность до 40–45 дБ [20, 21].

Машинно-вязаные полотна, пропитанные водой, обеспечивают затухание ЭМИ до 25 дБ, причем поглощающие свойства дистиллированной воды лучше по сравнению с водопроводной,

время анализа 100 с; фильтрация 2-Гі; диапазон регистрации до 10 кэВ; рабочая атмосфера—воздух.

Идентификацию химического состава частиц осуществляли методом рентгенофазового анализа с помощью ASTM картотеки. Для проведения исследований использовалась установка ДРОН-3 с фильтрованным  $\text{CuK}_\alpha$  излучением (длина волны  $\lambda=1,5417737 \text{ \AA}$ ). Запись дифракционной картины на диаграммную ленту производилась со скоростью 1000 имп/с в диапазоне углов от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ . Установлено, что на дифрактограмме синтезированного материала кроме пика, обусловленного влиянием подложки — модифицированного полиакрилонитрила (межплоскостное расстояние  $5,069 \text{ \AA}$ ), присутствуют пики, соответствующие соединениям никеля с серой:  $\text{NiS}$  и  $\text{Ni}_7\text{S}_6$  (рис. 9).

Полученные в результате измерений амплитудно-частотные характеристики модуля коэффициента передачи  $|S_{12}|$  для различных материалов приведены на рис. 10. Образцы, синтезированные на основе моди-

отражение от которой обусловлено ее проводимостью. Амплитудно-частотные характеристики таких полотен представлены на рис. 12.

### Заключение

На основе проведенных измерений машинно-вязаных полотен с микропроводом установлено, что на низких частотах наиболее эффективны экраны с большим диаметром микропровода. На высоких частотах целесообразно использовать меньшие диаметры микропровода, так как здесь все больше сказывается влияние поверхностного эффекта. Исследование поглощающих конструкций на основе синтезированных волокнистых материалов показало, что эффективность синтезированных материалов увеличивается с ростом частоты, что объясняется уменьшением толщины скин-слоя, а следовательно, увеличением затухания электромагнитной волны в толще экрана. Материалы с кобальтсодержащими кластерами имеют меньший коэффициент отражения, чем материалы с никельсодержащими кластерами. Для многослойных конструкций из синтезированных материалов предпочтительно в качестве первого слоя использовать материал с кобальтсодержащими кластерами, так как он имеет меньший коэффициент отражения. Пропитка поглощающих материалов жидкими веществами позволяет повысить эффективность экранирования, снизив при этом коэффициент отражения. Поглощение электромагнитного излучения в таких материалах происходит за счет потерь энергии, происходящих в результате переотражений между капельками жидкости, распределенной по всей площади материала. Снизить коэффициент отражения и значительно увеличить эффективность экранирования можно путем пропитки машинно-вязаных полотен с геометрическими неоднородностями.

## CONSTRUCTIONS OF FLEXIBLE ELECTROMAGNETIC POWER ABSORBERS OF MICROWAVE RANGE

L.M. LYNKOV, T.V. BORBOTKO, V.A. BOGUSH, T.V. KOLBUN

### Abstract

The basic methods of developing shields of electric waves and radioabsorbing materials are surveyed. The description of pliable constructions of shields on the basis of machine-knit fabrics is given. The results of measuring immersing materials with a microwire are given. Synthesis is described and radioabsorbing constructions are investigated on the basis of composition fibroids. The results of the examinations of radioabsorbents with liquid filling compounds are given.

### Литература

1. *Netzer M.* // ITEM UPDATE, 2000. P. 23–27.
2. *Асаенко И.С., Валенко В.С., Лыньков Л.М., и др.* // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Медэлектроника-2002". Минск, 2002. С. 68–70.
3. *Труевцев Н.И., Труевцев Н.Н., Кофман Д.М. и др.* / Механическая технология волокнистых материалов. М., 1969.
4. *Флерова Л.Н., Сурикова Г.И.* Материаловедение трикотажа. М., 1972.
5. *Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А.* Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М., 1982.
6. Пат 10145074 Япония, МПК Н 05 К 9/00. Unwanted radiation absorber / Iwanaga takahiro (Япония); Nec Corp. № 8294797; Заявл. 07.11.96; Опубл. 29.05.98. С. 2.
7. *Miazaki Y., Tanoe K.* Tapered and graded index tipe electromagnetic absorbers using inhomogeneous lossy dielectric layers // Intern. symp. electromagnetic compability. Nagoya. 8-10 sept. 1989. V.2. Nagoya, 1989. P. 504–508.
8. *Гусева А.А.* Кругловязальные двухфактурные жаккардовые машины. М., 1980.
9. *Лыньков Л.М., Богущ В.А., Глыбин В.П. и др.* Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Под ред. Л.М. Лынькова. Мн., 2000.
10. *Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богущ В.А.* // Докл. НАН Беларуси. 1999. Т. 43, № 6. С. 106–107.
11. *Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богущ В.А., Прокопович Д.Н.* // Радиотехника и электроника. 1999. Вып. 24. С. 102-105.

12. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П., Селиверстова Т.С.* // *Материалы, технологии, инструмент.* 1998. Т. 3, № 2. С. 61.
13. *Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богуш В.А., Борботько Т.В.* // *Докл. НАН Беларуси.* 2002. Т. 46, № 3. С. 120–122.
14. *Вольдсет Р.* *Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения.* М., 1977.
15. *Вайнштейн Б.К.* *Современная кристаллография.* Т. 2, 4. М., 1979.
16. *Дроздов Н.Г., Никулин Н.В.* *Электроматериаловедение.* М., 1973.
17. *Синицин Н.И., Петросян В.И., Елкин В.А. и др.* // *Биомедицинская радиоэлектроника.* 1998. № 1. С. 47–51.
18. *Прудник А.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В., и др.* // *Изв. Белорус. инж. акад.* 2002. № 2(14)/2. С. 162–164.
19. *Прокопович Д.Н., Богуш В.А., Лыньков Л.М., Петрова В.А.* // *Изв. Белорус. инж. акад.* 1999. № 1(7)/2. С. 195–197.
20. *Борботько Т.В., Лыньков Л.М.* // *Физика конденсированных сред: Тез. докл. конф. Гродно, 2002.* С. 43–44.
21. *Борботько Т.В.* // *Изв. Белорус. инж. акад.* 2002. № 2(14)/2. С. 117–119.