

УДК 620.22 – 026.61

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНОГО ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ НА ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Х.А.Э. АЙАД, Е.С. БЕЛОУСОВА, Т.А. ПУЛКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220600, Беларусь*

*Поступила в редакцию 23 февраля 2016*

Исследовано влияние состава композиционного покрытия на основе порошкообразного древесного угля с различными связующими компонентами на характеристики экранирования электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17 ГГц. Показано, что нанесение разработанного композиционного покрытия на поверхность конструкции с пирамидальными неоднородностями, приводит к увеличению эффективности экранирования электромагнитного излучения в среднем на 10...12 дБ во всем исследуемом диапазоне частот.

*Ключевые слова:* композиционное покрытие, порошкообразный древесный уголь, конструкции с пирамидальными неоднородностями.

### Введение

Эффективным методом снижения уровня информационных сигналов является экранирование их источников, которое заключается в ограничении распространения электромагнитных волн в определенную область пространства путем рассеяния, переотражения энергии электромагнитных колебаний и преобразования ее в тепловую энергию в экранирующих материалах с резистивными, диэлектрическими или магнитными потерями [1, 2].

Анализ существующих конструкций экранов электромагнитного излучения (ЭМИ) показывает, что эффективность экранирующих устройств определяется электрическими и магнитными свойствами материала экрана, конструкцией экрана, его геометрическими размерами и частотой излучения. Эффективные экраны ЭМИ на основе синтезированных водосодержащих композиционных материалов обладают небольшим весом и гибкостью, а электромагнитные характеристики конструкций зависят от свойств диспергированного наполнителя. Для подавления электромагнитных каналов утечки информации, для защиты жилых, промышленных и выделенных помещений от электромагнитного загрязнения, необходимо создание принципиально новых универсальных композиционных покрытий для конструкций экранов ЭМИ, ослабляющих электромагнитное излучение СВЧ-диапазона [3].

### Обоснование проведения исследования

При экранировании ЭМИ используются такие особенности распространения волн, как поглощение электромагнитной энергии в материале и отражение электромагнитной волны от границы раздела двух сред. Поглощение ЭМИ определяется взаимодействием электромагнитного поля с веществом материала. При распространении ЭМИ на границе раздела сред, характеризующихся различными свойствами (например, различное волновое сопротивление металла и воздуха), электромагнитная энергия частично проходит через них, продолжая распространяться в новой среде, и частично отражается от границы раздела двух сред, причем коэффициент отражения зависит от соотношения волновых сопротивлений смежных сред. Для подавления электромагнитных каналов утечки информации применяются различные способы экранирования на основе материалов, устройств и конструктивных приемов,

снижающих электромагнитное излучение. Важными факторами при выборе материала элемента конструкции экрана ЭМИ являются гигроскопичность, химическая стойкость, смачиваемость. Материалы для изготовления элементов экранирующих конструкций должны обладать достаточной физико-механической и температурной устойчивостью [4].

В качестве основы для конструкций экранов ЭМИ широко применяются нетканые материалы на основе целлюлозы, которые характеризуются впитывающей способностью, воздухопроницаемостью, гигроскопичностью и др., что обуславливается капиллярно-пористым коллоидным характером их структуры. Плотность целлюлозных материалов во многом определяется фракционным составом волокон (волокна меньших размеров заполняют промежутки между большими и тем самым увеличивают плотность), в промежутках которых содержатся включения воздуха и воды. Вследствие этих морфологических особенностей целлюлозные волокнистые материалы представляют собой анизотропные капиллярно-пористые системы.

Свойствами гигроскопичности и гидрофильности обладают углеродные сорбенты, полимеры, природные сорбенты, порометаллы, пористые и капиллярно-пористые материалы или их смеси. Для реализации поставленной цели в рамках проводимых исследований в качестве порошкообразного наполнителя для синтеза экранирующего композиционного покрытия был предложен природный сорбент – древесный уголь, являющийся экологически чистым микропористым высокоуглеродистым продуктом, образующимся при пиролизе древесины без доступа воздуха. Древесный уголь способен поглощать вредные элементы в помещении, улучшая тем самым самочувствие человека [5].

Удельная поверхность 1 г угля составляет 160...400 м<sup>2</sup>, отношение объема пор к объему куска березового угля 72 %, елового – 80 %. Вес одного кубического метра насыпного абсолютно сухого угля составляет: елового 100...120 кг; соснового 130...140 кг; березового 175...185 кг; букового около 195 кг.

При пиролизе древесины сохраняется структура ее проводящих тканей, поэтому в образующемся древесном угле имеется большое количество капилляров и пор, обладающих большой суммарной поверхностью, что способствует его большой адсорбционной способности. При обычной температуре древесный уголь может адсорбировать различные вещества из их растворов, а также различные газы, в том числе инертные. При нагревании адсорбированное вещество древесный уголь выделяет их, вновь приобретая способность адсорбировать. Чтобы увеличить адсорбционную способность угля, его активируют нагреванием без доступа воздуха [2].

Древесный уголь относится к малозольным материалам из-за отсутствия в нем посторонних химических примесей. Он обладает высокой теплоустойчивостью и удельным электрическим сопротивлением. После прокаливания угля увеличивается его электропроводность и за счет этого можно получать продукты с установленными диэлектрическими свойствами.

Диоксид титана (TiO<sub>2</sub>) представляет собой кристаллы белого цвета, которые при перемешивании в воде легко пептизируются с образованием устойчивых коллоидных растворов. Способность TiO<sub>2</sub> легко удерживать водный наполнитель позволяет использовать его для изготовления поглотителей электромагнитного излучения, обладающих высокой эффективностью. Использование влагосодержащих наполнителей способствует увеличению эффективности поглощения электромагнитного излучения, благодаря способности воды взаимодействовать с электромагнитным излучением. Использование порошка диоксида титана в составе экранирующих покрытий позволяет получить величину ослабления электромагнитной энергии в пределах 10,0...18,0 дБ при коэффициенте отражения ЭМИ в пределах –2,0...–6,0 дБ для диапазона 8...12 ГГц [6, 7].

Использование растворных наполнителей различных составов (с добавкой хлористого натрия, глицерина и др.) позволяет регулировать значение коэффициента отражения для конструкций с геометрическими неоднородностями в пределах –9,0...–21,0 дБ, а для конструкций с плоской поверхностью в диапазоне –4,0...–7,0 дБ. Исходя из справочных данных, наибольшей энергией гидратации обладают соли различных металлов. Для стабильного удержания молекул воды в качестве одного из компонентов раствора был выбран кальций хлористый CaCl<sub>2</sub>, представляющий собой нетоксичную хорошо растворимую гигроскопичную

соль щелочноземельного металла. Образование химических связей между ионами диссоциированной соли щелочноземельного металла и молекулами воды приводит к образованию жестких соединений, которые препятствуют испарению молекул воды с поверхности и состава порошкообразного наполнителя, тем самым сохраняя первоначальный уровень влагосодержания композиционного экранирующего покрытия.

Помимо высоких поглощающих свойств воды, водных растворов, природных сорбентов в диапазоне СВЧ снижение коэффициента отражения достигается также за счет формирования геометрически неоднородной поверхности экрана, что приводит к возникновению многочисленных переотражений в объеме экрана и затуханию энергии ЭМИ [8–10].

### Методика проведения эксперимента

Для реализации поставленной цели были сформированы две группы образцов комбинированных конструкций с плоской и пирамидальной формой поверхности, для чего использовался нетканый материал, на основе целлюлозы (рис. 1). Площадь основания образцов двух групп составила  $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$ . Высота пирамидальных элементов конструкции (полых внутри) составила порядка 0,45 м, что коррелирует с рабочими длинами волн разработанной конструкции (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид покрытия на основе краски «Агнитерм» с порошкообразным древесным углем на целлюлозной основе с плоской и пирамидальной поверхностью

Для синтеза композиционного покрытия на основе порошкообразных материалов производили помол древесного угля до размера частиц 30–40 мкм на электрической малогабаритной мельнице. Затем производили смешивание порошка угля с 45 масс. % раствором соли щелочноземельного металла. Для увеличения поглощающей способности синтезируемых покрытий в составе композита использовался дополнительный компонент – диоксид титана  $\text{TiO}_2$ . Для пластичности покрытия в качестве связующих компонентов использовались: водно-дисперсионный состав «Агнитерм», поливинилацетатный клей, глицерин  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ . Компонентный состав синтезированных композиционных покрытий представлен в таблице.

#### Компонентный состав синтезированных композиционных экранирующих покрытий

Образец	Тип поверхности	Наполнитель порошкообразный	Наполнитель водосодержащий	Наполнитель связующий
№ 1	плоская	древесный уголь	–	водно-дисперсионный состав «Агнитерм»
№ 2	плоская	древесный уголь	45 масс. % $\text{CaCl}_2$	водно-дисперсионный состав «Агнитерм»
№ 3	плоская	древесный уголь, $\text{TiO}_2$	45 масс. % $\text{CaCl}_2$	глицерин $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
№ 4	пирамидальная	древесный уголь, $\text{TiO}_2$	45 масс. % $\text{CaCl}_2$	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$
№ 5	пирамидальная	древесный уголь	45 масс. % $\text{CaCl}_2$	поливинилацетатный клей

На поверхности образцов двух групп наносился слой синтезированного композиционного покрытия толщиной 2 мм. По времени процесс объемной полимеризации покрытия составлял от 10 до 24 ч в зависимости от типа используемого связующего наполнителя. Измерения экранирующих характеристик проводились с помощью измерителя модуля коэффициентов передачи и отражения SNA 0.01–18 в диапазоне 0,7...17,0 ГГц.

Измеритель имеет коаксиальный СВЧ измерительный тракт сечением 7/3,04 мм и рупорные антенны 6П-23М. Полосы качания частоты измерителя: при измерении коэффициента отражения  $S_{11}$  – 0,5...3,0 ГГц и 2...18 ГГц, при измерении коэффициента передачи  $S_{21}$  – 0,01...3,0 ГГц и 2...18 ГГц. Количество частотных точек, в которых проводятся измерения, составляет 256 в каждом из указанных диапазонов.

### Обсуждение результатов

Исследовались экранирующие характеристики двух групп образцов с синтезированными композиционными покрытиями на плоской (рис. 3, 4) и пирамидальной (рис. 5, 6) поверхностях в диапазоне частот 0,7...18 ГГц.

На основании полученных зависимостей ослабления ЭМИ от частоты было установлено, что образцы с покрытиями на основе древесного угля, нанесенными на плоскую поверхность в диапазоне 0,7...3,0 ГГц, характеризуются значениями ослабления ЭМИ в пределах от 0,1 дБ до 1,5 дБ (рис. 2: 1 – образец покрытия с использованием порошкообразного наполнителя (древесный уголь); 2 – образец покрытия с использованием порошкообразного наполнителя (древесный уголь), пропитанного 45 % масс. раствором  $\text{CaCl}_2$ ; 3 – образец покрытия с использованием комбинированного порошкообразного наполнителя (древесный уголь,  $\text{TiO}_2$ ), пропитанного 45 % масс. раствором  $\text{CaCl}_2$ ). При формировании комбинированного покрытия с использованием порошка  $\text{TiO}_2$  наблюдается характерное изменение значений ослабления ЭМИ в пределах от 1, дБ до 4,0 дБ. При этом коэффициент отражения ЭМИ для групп образцов с наполнителем на основе древесного угля колеблется в пределах  $-5,0...-30,0$  дБ в диапазоне частот 0,7...3,0 ГГц. Для группы образцов с комбинированным покрытием с использованием порошка  $\text{TiO}_2$  наблюдается изменения значений коэффициента отражения ЭМИ в среднем на 10,0 дБ, что соответствует значениям  $-3,0...-15,0$  дБ.

В режиме короткого замыкания наблюдается значительное увеличение значений коэффициентов отражения ЭМИ независимо от типа используемого наполнителя на плоских поверхностях всех групп образцов и с использованием порошка  $\text{TiO}_2$  находятся в пределах  $-0,1...-4,0$  дБ во все исследуемом диапазоне частот 0,7...3,0 ГГц.

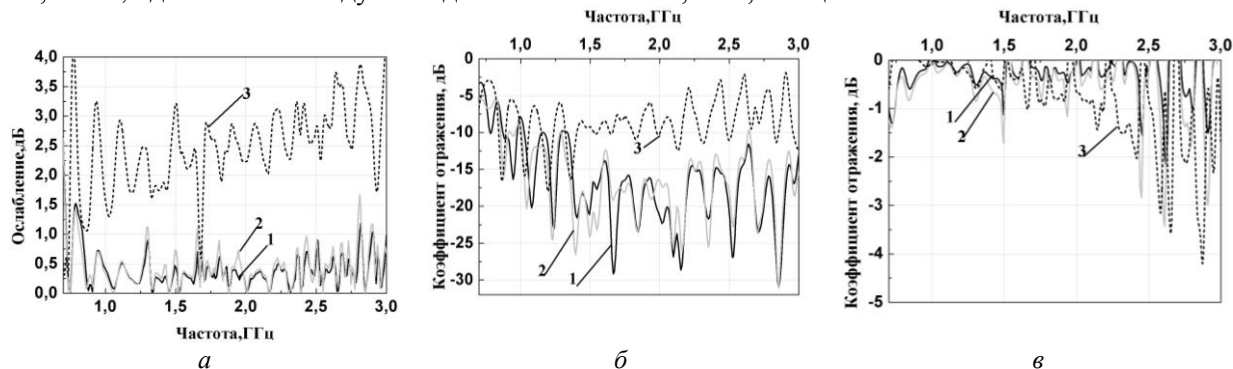


Рис. 2. Частотная зависимость экранирующих характеристик в диапазоне 0,7...3,0 ГГц образцов с синтезированными композиционными покрытиями на плоской поверхности: *а* – ослабление ЭМИ; *б* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме согласованной нагрузки; *в* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме короткого замыкания

С ростом частоты наблюдается увеличение значений величины ослабления ЭМИ на 2,0...4,0 дБ для всех групп образцов с плоской поверхностью (рис. 3: 1 – образец покрытия с использованием порошкообразного наполнителя (древесный уголь); 2 – образец покрытия с использованием порошкообразного наполнителя (древесный уголь), пропитанного 45 % масс. раствором  $\text{CaCl}_2$ ; 3 – образец покрытия с использованием комбинированного порошкообразного наполнителя (древесный уголь,  $\text{TiO}_2$ ), пропитанного 45 % масс. раствором  $\text{CaCl}_2$ ). Так, в диапазоне частот 7,0...10,0 ГГц значение величины ослабления ЭМИ для групп образцов с наполнителем на основе древесного угля составляет порядка 1,0...3,0 дБ, тогда как при использовании комбинированного наполнителя с добавлением порошка  $\text{TiO}_2$  в состав древесного угля, установлено, что в диапазоне 7,0...17,0 ГГц значение величины ослабления ЭМИ составляет порядка 4,0...8,0 дБ. При этом значения коэффициента отражения ЭМИ при

увеличении частоты составляют  $-0,1 \dots -20,0$  дБ для первых двух групп образцов и  $-2,0 \dots -10,0$  дБ для группы образцов с комбинированным покрытием на основе древесного угля и  $TiO_2$ .

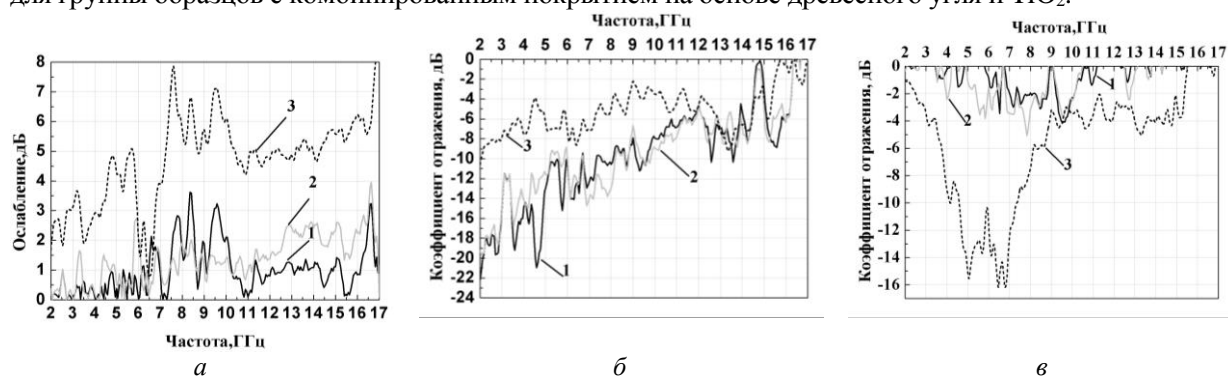


Рис. 3. Частотная зависимость экранирующих характеристик в диапазоне  $2,0 \dots 17,0$  ГГц образцами с синтезированными композиционными покрытиями на плоской поверхности: *а* – ослабление ЭМИ; *б* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме согласованной нагрузки; *в* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме короткого замыкания

Для обеспечения наименьшего отражения от внешней поверхности образца, обращенной к источнику ЭМИ, требуется реализовать плавный переход волновых характеристик от воздуха к рабочему материалу экрана. Для этих целей образцу придается структура или форма, увеличивающая его активную поверхность. Падая на такую поверхность, ЭМВ многократно отражается и теряет значительно больше энергии, чем при падении на ровную поверхность. Подобного эффекта добиваются, когда слои поглощающего материала располагают в порядке возрастания их плотности по мере удаления от внешней поверхности экрана, т.е. при постепенном увеличении концентрации проводящих добавок по мере удаления от поверхности материала. Исследовались экранирующие характеристики образцов с синтезированными композиционными покрытиями на пирамидальных поверхностях в диапазоне частот  $0,7 \dots 18,0$  ГГц (рис. 4, 5: 4 – образец покрытия с использованием комбинированного порошкообразного наполнителя (древесный уголь,  $TiO_2$ ), пропитанного 45 % масс. раствором  $CaCl_2$ ; 5 – образец покрытия с использованием порошкообразного наполнителя (древесный уголь), пропитанного 45 % масс. раствором  $CaCl_2$ ). На основании полученных зависимостей ослабления ЭМИ от частоты было установлено, что образцы с покрытиями на основе древесного угля, нанесенными на пирамидальную поверхность в диапазоне  $0,7 \dots 3,0$  ГГц, характеризуются значениями ослабления ЭМИ в пределах  $2,0 \dots 17,0$  дБ (рис. 4). Причем разница в значениях ослабления ЭМИ в зависимости от состава наполнителя находится в пределах 2,0 дБ. Установлено, что значение коэффициента отражения ЭМИ находится в пределах  $-4,0 \dots -22$  дБ на частотах  $0,7 \dots 3,0$  ГГц независимо от состава покрытий, что определяется пирамидальной поверхностью образцов. В режиме короткого замыкания в диапазоне частот  $0,7 \dots 1,5$  ГГц разрыв в значениях коэффициентов отражения ЭМИ значительный. Так, для покрытий с использованием древесного угля в составе покрытия значение коэффициента отражения ЭМИ находится в пределах  $-8,0 \dots -26,0$  дБ, тогда как для образцов с комбинированным покрытием (древесный уголь,  $TiO_2$ ) значения коэффициента отражения находятся в пределах  $-2,0 \dots -10,0$  дБ. С увеличением частоты в диапазоне частот  $2,0 \dots 17,0$  ГГц наблюдается значительное увеличение значений ослабления ЭМИ в пределах  $2,0 \dots 10,0$  дБ для группы образцов с покрытием из комбинированного порошкообразного наполнителя (древесный уголь,  $TiO_2$ ), пропитанного 45 % масс. раствором  $CaCl_2$ . Для группы образцов покрытия с использованием порошкообразного наполнителя (древесный уголь), пропитанного 45 % масс. раствором  $CaCl_2$ , значения ослабления ЭМИ находятся в пределах  $6,0 \dots 14$  дБ во всем исследуемом диапазоне частот  $2,0 \dots 17,0$  ГГц. Измерения в режиме короткого замыкания показывают, что значение коэффициента отражения ЭМИ составляет  $-4,0 \dots -18,0$  дБ в диапазоне частот  $2,0 \dots 17,0$  ГГц, независимо от состава покрытия на пирамидальной поверхности.

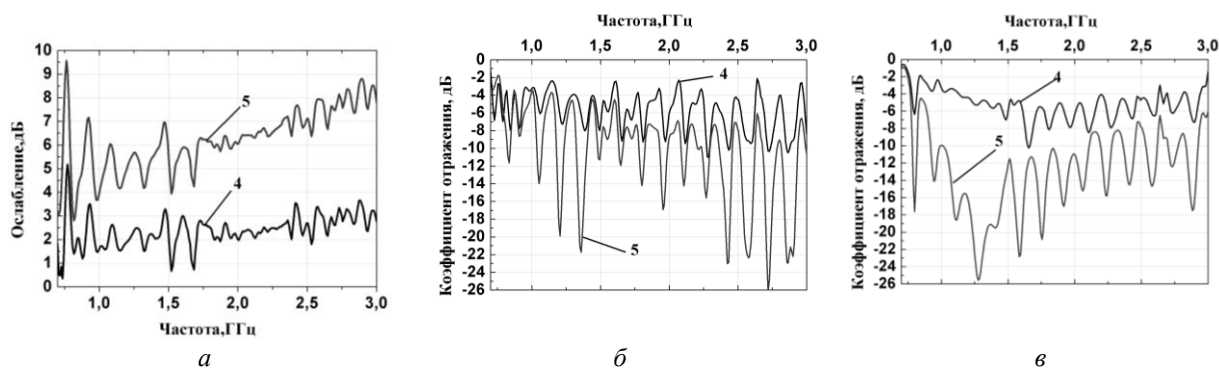


Рис. 4. Частотная зависимость экранирующих характеристик в диапазоне 0,7...3,0 ГГц образцами с синтезированными композиционными покрытиями на пирамидальной поверхности: *а* – ослабление ЭМИ; *б* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме согласованной нагрузки; *в* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме короткого замыкания

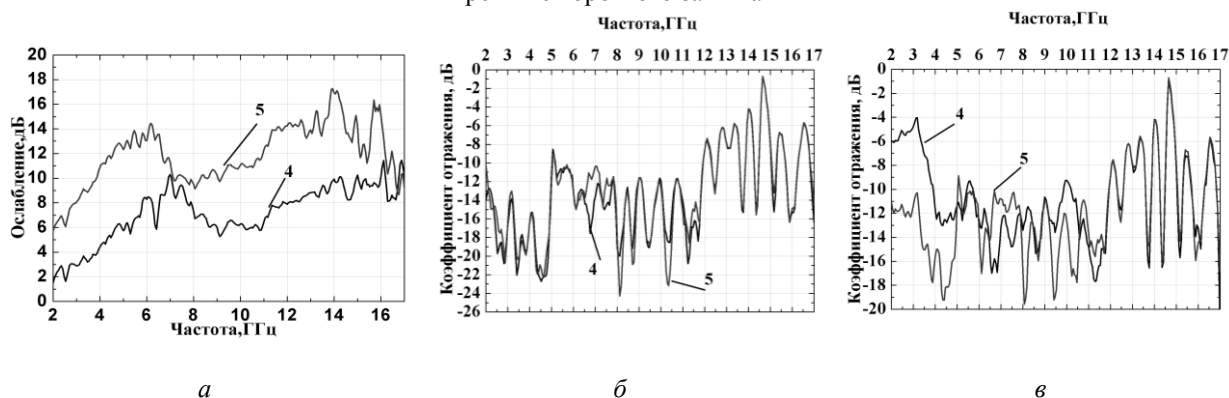


Рис. 5. Частотная зависимость экранирующих характеристик в диапазоне 2,0...17,0 ГГц образцами с синтезированными композиционными покрытиями на пирамидальной поверхности: *а* – ослабление ЭМИ; *б* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме согласованной нагрузки; *в* – коэффициент отражения ЭМИ в режиме короткого замыкания

Показано повышение общей эффективности экранирования ЭМИ покрытиями за счет дополнительного рассеяния падающих электромагнитных волн и переотражения их между гранями пирамид. При этом доля энергии электромагнитных волн, распространяющихся в направлении источника, существенно снижается и коэффициент отражения такой конструкции меньше по сравнению с экраном с плоской поверхностью, эффективность которого обеспечивается за счет диэлектрических потерь растворного наполнителя и типа порошкообразного наполнителя покрытий.

### Заключение

Исследовано влияние состава композиционного покрытия на основе порошкообразного древесного угля с различными связующими компонентами на характеристики экранирования электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,3...17 ГГц. В результате проведенных исследований показана возможность нанесения разработанного композиционного покрытия на поверхность конструкции с пирамидальными неоднородностями, что приводит к увеличению эффективности экранирования электромагнитного излучения в среднем на 10...12 дБ во всем исследуемом диапазоне частот.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную методику создания образцов для формирования отделочных панелей для электромагнитного экранирования СВЧ-источников и обеспечения экологической защиты обслуживающего персонала и пользователей ПК и медицинских и промышленных установок. Помимо высоких поглощающих свойств растворного и порошкообразного наполнителей в диапазоне СВЧ снижение коэффициента отражения достигается также за счет формирования геометрически неоднородной поверхности экрана, что приводит к возникновению многочисленных переотражений в объеме экрана и затуханию энергии ЭМИ.

Формирование пирамидальных конструкций экранов из разработанных влагосодержащих материалов обеспечивает ослабление ЭМИ порядка 2,0...9,0 дБ в диапазоне частот 0,7...3,0 ГГц и 6,0...17,0 дБ в диапазоне частот 2,0...17,0 ГГц, при коэффициенте отражения -4,0...-22,0 дБ во всем исследуемом диапазоне частот. Таким образом, пирамидальная конструкция влагосодержащих экранов с разработанными комбинированными покрытиями на основе древесного угля позволяет повысить эффективность экранирования ЭМИ в частотном диапазоне 2,0...8,0 ГГц в среднем на 10,0 дБ по сравнению с экраном с плоской поверхностью, что можно учесть при создании высокоэффективных экранов и поглотителей ЭМИ диапазона СВЧ.

## INFLUENCE OF COMPOSITE COATINGS BASED ON POWDERED CHARCOAL ON ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDING

H.A.E. AYAD, E.S. BELOUSOVA, T.A. PULKO

### Abstract

The influence of composite coating composition based on powdered charcoal with different binders on the characteristics of electromagnetic radiation shielding in the frequency range 0,7...17 GHz are researched. It is shown that the deposition of a composite coating on the developed surface structure with pyramidal irregularities increases the efficiency of electromagnetic radiation shielding an average of 10...12 dB throughout the investigated frequency range.

*Keywords:* composite coating, powdered charcoal, pyramidal structure with irregularities.

### Список литературы

1. Radiowave absorbers for microwave bands Vol.2. Commercial information / Tokin EMC engineering Co. Ltd [http. \[Электронный ресурс\].](http://www.tee.tokin.jp/eng/ansitu/kyushu.html) – Режим доступа: <http://www.tee.tokin.jp/eng/ansitu/kyushu.html>. – Дата доступа: 02.06.2015.
2. Лопатин А.В., Казанцева Н.Е., Казанцев Ю.Н. // Радиотехника и электроника. 2008. № 5 (53). С. 517–526.
3. Гагулин В.В., Шевчук Ю.А., Корчагина С.К. Радиопоглощающий материал / Патент РФ №2189954.
4. Суляев В.И., Найденов Е.П., Коровин Е.Ю. Способ получения многослойного радиопоглощающего материала и радиопоглощающий материал, полученный этим способом / Патент РФ №2423761.
5. Устименко Л.Г., Хандогина Е.Н., Владимиров Д.Н. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2009. № 2. С. 81–85.
6. Устименко Л.Г., Владимиров Д.Н., Сергеев М.С. Средство защиты от электромагнитного излучения / Патент РФ № 87046.
7. Серебрянников С.В., Китайцев А.А., Чепарин В.П. Композиционный радиопоглощающий материал / Патент РФ № 2380867.
8. Николайчук Г., Иванов В., Яковлев С. // Электроника. 2010. № 1. С. 92–95.
9. Банный В.А., Царенко И.В. // Вестн. Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2009. № 4. С. 3–8.
10. Грищенко В.А., Владимиров Д.Н., Фукина В.А., Хандогина Е.Н., Шаповалова Е.И. Ткань для защиты от электромагнитных излучений / Патент РФ 2411315.