

УДК 621.318.3.01

А.В. Мачулянский, канд. техн. наук, В.В. Пилинский, канд. техн. наук, О.В. Теличкина,
В.Б. Швайченко, канд. техн. наук, М.В. Родионова, канд. техн. наук

Основы применения наноструктурных материалов для обеспечения электромагнитной совместимости электронных устройств

Рассмотрены процессы экранирования электрических, магнитных и электромагнитных полей в диапазоне частот от единиц, десятков килогерц до единиц, десятков гигагерц. Показаны особенности экранов, выполненных из металлов с высокой проводимостью и ферромагнитных материалов. Сформулированы требования к наноструктурным композиционным материалам для электромагнитного экрана. Определены методы реализации экранов на основе отражающих или широкополосных поглощающих наноконструктивных структур.

The processes of screening of electric, magnetic and electromagnetic fields in the frequency range from few-tens kHz to few-tens GHz are considered. The features of screens made of metal with high conductivity and of ferromagnetic materials are shown. The requirements to the nanostructure composite materials for electromagnetic screening are pointed out. Methods for the screens implementation on the basis of reflecting or absorbing broadband nanocomposite structures are identified.

Введение

В связи со стремительным развитием телекоммуникационных и информационных технологий, повышаются требования к чувствительности, быстродействию, степени интеграции, надежности функционирования электронных устройств. Решение этих задач непосредственно связано с проблемой обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств. Отметим, что кроме инженерных аспектов проблемы обеспечения ЭМС необходимо учитывать весьма актуальные вопросы, связанные с биологической и информационной безопасностью [1,2].

В частности, биологический аспект состоит в негативном влиянии электромагнитной энергии на окружающую среду, биологические объекты и здоровье людей [3].

Для снижения уровня нежелательных электромагнитных полей с целью обеспечения ЭМС применяют следующие методы [1-4]: экранирование, фильтрация, рациональная компоновка (пространственное размещение и ориентация

электронных компонентов), заземление, балансировка и др. При этом применяемые средства защиты должны удовлетворять комплексу необходимых технологических, эксплуатационных и др. требований и нормативов. На практике выполнение этих требований представляет сложную задачу, в связи с необходимостью применения материалов, обладающих соответствующими характеристиками для экранирования в диапазоне частот от десятков килогерц до единиц, десятков гигагерц. Поэтому перспективное направление для обеспечения ЭМС состоит в разработке новых материалов на основе наноструктурных композитных систем [5,6]. В этой связи целью работы является анализ применения наноструктурных материалов для обеспечения эффективного экранирования электрических, магнитных, электромагнитных полей.

Анализ особенностей применения экранирующих материалов

Физические явления, обуславливающие эффект экранирования – поглощение и отражение – количественно характеризуют коэффициентами поглощения $K_{\text{полгл}}$, отражения $K_{\text{отр}}$ и многократного отражения $K_{\text{мнотр}}$ [4]:

$$K_{\text{Э}} = K_{\text{полгл}} + K_{\text{отр}} + K_{\text{мнотр}}, \quad (1)$$

Эффект многократного отражения при $K_{\text{полгл}} > 10 \text{ дБ}$ можно не учитывать [4].

Эффект поглощения обусловлен затуханием электромагнитного поля и/или его составляющих (в зависимости от характера поля, частоты и расстояния) в ближней и дальней зонах [4]

$$K_{\text{полгл}} = \frac{d}{\delta} 20 \lg e = 8,69 \frac{d}{\delta} = 0,131d \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \text{ дБ}, \quad (2)$$

где d – толщина экрана в миллиметрах;

δ – глубина проникновения;

f – частота электромагнитного поля;

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\sigma_{Cu}}; \quad \sigma_{Cu} = 5,7 \cdot 10^7 \frac{\text{СМ}}{\text{М}};$$

σ_r – относительная удельная проводимость;

σ – удельная проводимость;

σ_{Cu} – удельная проводимость меди;

μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Ориентировочно граница между ближней (индукции) и дальней (излучения) зонами для элементарного излучателя, обобщенный размер l которого значительно меньше длины волны λ , $r_{ep} = \frac{\lambda}{2\pi}$; для произвольного излучателя $r_{ep} = \frac{2l^2}{\lambda}$.

Эффект экранирования в результате явления отражения поля на границе раздела двух сред обусловлен разными значениями параметров сред $(\varepsilon_1, \mu_1, \sigma_1)$ и $(\varepsilon_2, \mu_2, \sigma_2)$, которые определяют соотношение

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon + \sigma}}, \quad (3)$$

где μ, ε – магнитная и диэлектрическая проницаемость соответственно.

При условии $Z_1 \gg Z_2$ коэффициент экранирования в результате отражения поля на границе раздела двух сред:

$$K_{отр} = 20 \lg \frac{Z_1}{4Z_2}, \quad (4)$$

где Z_1 – модуль импеданса окружающей среды (Z_w); Z_2 – модуль импеданса экрана ($Z_э$).

Для магнитного поля с учетом относительных параметров среды и материала экрана в ближней зоне:

$$K_{отр}^M = 14,6 + 10 \lg \frac{f \sigma_r r^2}{\mu_r} \text{ [дБ]}. \quad (5)$$

Для электрического поля с учетом относительных параметров среды и материала экрана в ближней зоне:

$$K_{отр}^E = 314 - 10 \lg \frac{f^3 \mu_r r^2}{\sigma_r} \text{ [дБ]}. \quad (6)$$

Эффективность экранирования в результате отражения в дальней зоне:

$$K_{отр} = 168 - 10 \lg \frac{f \mu_r}{\sigma_r} \text{ [дБ]}. \quad (7)$$

Результаты численного моделирования коэффициента экранирования вследствие отражения и поглощения в зависимости от частоты поля по соотношениям (2),(5),(6),(7) представлены в таблице 1 и на рис. 1. Расчет проведен для электромагнитных экранов толщиной $d=5 \times 10^{-5}$ м из высокопроводящих материалов ($\sigma_r=1, \mu_r=1$ и $\sigma_r=1,05, \mu_r=1$) и ферромагнитного материала ($\sigma_r=0,1, \mu_r=100$) при расстоянии от источника поля до экрана $r=0,1$ м.

Необходимо отметить, что моделирование электромагнитных экранов с использованием соотношений (2), (5), (6), (7) справедливо для бесконечного и сплошного экрана на пути распространения поля. Эти приближения не отражают реальных условий работы экрана, поскольку не учитывают соотношения между длиной волны и линейными размерами экрана, характера источника поля, неравномерности распределения поля внутри экрана, неоднородности материала и конструкции самого экрана. Теоретические значения эффективности экранирования (100 - 150 дБ и выше), для реальных устройств недостижимы. Это обусловлено тем, что в реальных конструкциях имеют место неплотности в механических соединениях, элементы крепления, отверстия и т. д.

Из результатов численного моделирования следует, что поглощение в электромагнитном экране из высокопроводящего материала увеличивается с ростом частоты поля, толщины, магнитной проницаемости и проводимости металла экрана, а отражение определяется неравенством волновых сопротивлений свободного пространства и металла. Электромагнитный экран из высокопроводящего материала обеспечивает потери на поглощение на уровне 60 дБ при толщине экрана 5×10^{-5} м на частоте 1 МГц, но почти не вносит потерь на частотах ниже 1 кГц.

Таблица 1 Показатели эффективности экранирования сплошных плоских электромагнитных экранов

Материал	Частота, кГц	Потери поглощения, дБ	Потери отражения, дБ		
			ближняя зона		дальняя зона
			магнитного поля	электрического поля	плоской волны
ферромагнитный ($\mu_r=100, \sigma_r=0,1$)	<1	0-10	0-10	>90	>90
	1-10	30-60	0-10	>90	>90
	$10 \cdot 10^2$	60-90	10-30	>90	60-90
	$>10^2$	>90	30-90	60-90	30-90
высокопроводящий ($\mu_r=1, \sigma_r=1$)	<1	0-10	10-30	>90	>90
	1-10	0-10	10-60	>90	>90
	$10 \cdot 10^2$	10-30	30-60	>90	>90
	$>10^2$	30-60	60-90	>90	>90

Электромагнитный экран из ферромагнитного материала обеспечивает уровень потерь на поглощение в исследуемом диапазоне частот выше, чем экран из высокопроводящего материала. Причем, уровень поглощения ферромагнитным материалом на частотах порядка 1 кГц повышается при увеличении толщины экрана.

При применении ферромагнитного материала для экранирования необходимо учитывать следующие особенности:

- потери в результате поглощения возрастут, поскольку у большинства магнитных материалов относительная магнитная проницаемость μ_r растет более интенсивно, чем уменьшается относительная удельная проводимость σ_r ;

- потери в результате отражения уменьшаются вследствие увеличения сопротивления экрана;

- в случае магнитных полей в диапазоне частот до 1 МГц потери в результате отражения очень малы и основным механизмом экранирования являются потери в результате поглощения;

- для низкочастотного электрического поля и плоских волн экранирование обусловлено главным образом отражением, поэтому магнитный материал с низким значениям σ может снизить эффективность экранирования в результате увеличения импеданса экрана.

Анализ эффективности экранирования электромагнитного поля экранами с применением традиционных материалов позволил определить их основные особенности.

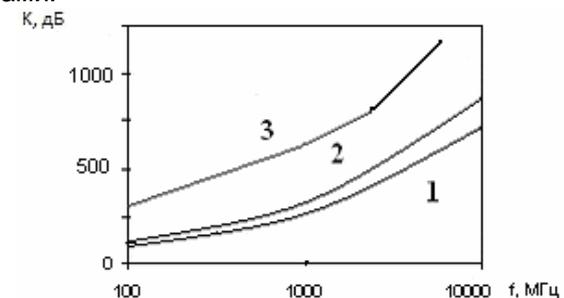
Электромагнитные экраны на основе высокопроводящих металлов не эффективны в ближней зоне на низких частотах для защиты от магнитных полей. В результате значительного отражения в металле происходит перераспределение электромагнитного поля внутри объекта, что может привести к резонансным явлениям, и, как следствие, к нарушению функционирования электронных устройств.

Недостатком электромагнитных экранов из ферромагнитных материалов (железо, никель, кобальт, специальные магнитомягкие сплавы, ферриты) является их высокая стоимость, значительные массо-габаритные показатели и нетехнологичность (хрупкость), что приводит к увеличению толщины экрана. Кроме этого, также необходимо учитывать следующие особенности ферромагнитных материалов:

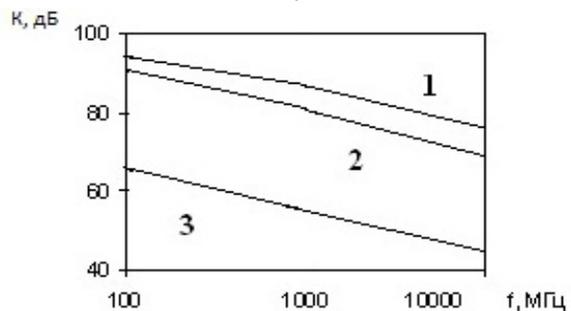
- уменьшение магнитной проницаемости с ростом частоты (рис.2);
- возможное изменение магнитных свойств в результате технологической обработки;

- зависимость магнитной проницаемости от значения напряженности поля, что приводит к эффекту насыщения.

Необходимо отметить, что для обеспечения высокой эффективности экранирования к конструкции экрана предъявляется требование электромагнитной герметизации, или обеспечения минимального омического контакта (низкого переходного сопротивления) между его элементами.



а



б

Рис.1. Частотная зависимость коэффициента эффективности экранирования вследствие потерь на поглощение (а) и отражение (б) электромагнитных экранов в диапазоне частот от 10^2 до 10^4 МГц:

1- $\sigma_r = 1, \mu_r = 1, d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$;

2- $\sigma_r = 1.05, \mu_r = 1, d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$;

3- $\sigma_r = 0.1, \mu_r = 100, d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

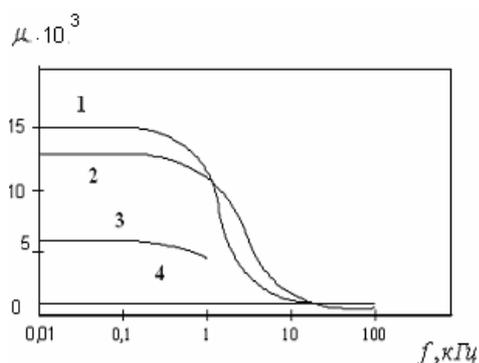


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от частоты: 1 – пермаллой; 2 – Мю-металл; 3 – никелевая сталь; 4 - сталь(5% Si) [4]

Отметим, что при защите объекта от нежелательных внешних помех целесообразно использовать как эффекты отражения, так и поглощения, тогда как для ослабления нежелательных внутренних помех, поступающих во внешнюю среду, – целесообразно использовать эффект поглощения.

В связи с указанными недостатками традиционных материалов для экранирования, и все в большей степени применяют новые материалы. К традиционным решениям ряда современных экранирующих материалов относят:

- фольгированные материалы и металлизированные сетки;
- электропроводящие пластики, стекла, эмали, компаунды;
- аморфные металлы, сплавы, ферриты;
- многослойные структуры.

Необходимо отметить, что одним из перспективных направлений для решения задач ЭМС электронных устройств является применение широкополосных поглощающих (радиопоглощающих) структур (ШПС). Такие материалы позволяют уменьшить характерные для металлов резонансные явления в защищаемой зоне, а также обеспечить электрогерметичность экрана.

Как показал анализ эффективности экранирования электромагнитных полей, для достижения высоких значений коэффициента экранирования в широком диапазоне частот материал экрана должен одновременно удовлетворять следующим условиям:

- низкое удельное сопротивление;
- высокая магнитная проницаемость;
- требуемое соотношение волновых импедансов окружающей среды и материала экрана.

Реализовать такие противоречивые условия представляется возможным на основе многокомпонентной системы, которая включает компоненты с высокой магнитной проницаемостью и компоненты с низким удельным сопротивлением, распределенные в связующей матрице [5].

В то же время эффективным и качественно новым направлением в обеспечении экранирования является применение наноструктурных материалов, которые включают в себя малые фазы вещества нанометрового размера (так называемые наночастицы или нанокластеры) [5,6].

Наноструктурные материалы с высокой электропроводностью

Как показали проведенные авторами исследования, синтезировать многокомпонентную

систему с необходимыми электрофизическими свойствами можно на основе смесевых наноструктурных композитов (НСК) [7] или пленочных нанодисперсных металлодиэлектрических структур [8].

В результате исследований электрофизических свойств электропроводящих НСК [7] на основе нанодисперсной системы «Ag – полимер» экспериментально достигнуто значение удельного сопротивления $8,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На рис.3 представлена микроструктура композита, полученная в результате электронно-микроскопических исследований. Анализ микроструктуры типичных образцов НСК показал, что при получении композита успешно решена задача равномерного распределения наночастиц металла в полимерной матрице.

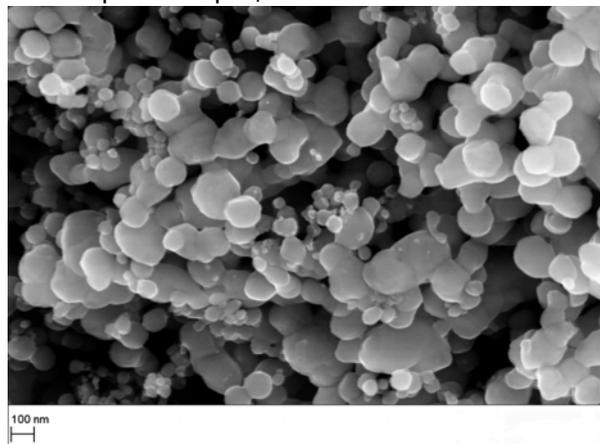


Рис. 3. – Микроструктура композита Ag – полимер

Как следует из [6], перспективным методом создания электропроводящей структуры в диэлектрической матрице является синтез НСК на основе углеродного нановолокна.

Наноструктурные магнитные материалы

Для достижения в многокомпонентных НСК условия высокой магнитной проницаемости в качестве одного из компонентов вводят наночастицы ферромагнитного материала, которые распределяются в матрице. Материал матрицы не должен химически взаимодействовать с наночастицами материала: металла, полупроводника, диэлектрика [9].

Известно [10,11], что уменьшение размеров наночастиц таких гранулированных структур приводит к изменению их электромагнитных свойств по сравнению с макроскопическими объемами твердого тела. Такие изменения имеют место, если средний размер наночастиц не превышает 100 нм, и наиболее проявляются при размере частиц 10 нм. Помимо этого новые свойства возникают при объединении наночастиц в наноструктуру, т.е. при формировании

матричных наносистем или наноструктурных композитов. Так, при воздействии электромагнитного поля на гранулированные наноструктуры, которые содержат ферромагнитные и металлические наночастицы (Fe/ Cr, Co/Cu, Ni/Ag и др.), наблюдается гигантский магнитно-резистивный эффект [9]. При этом интерес представляют частицы, размер которых сопоставим с размером магнитного домена, средней длиной свободного пробега электронов [10,11,12].

Таким образом, учет соответствующих размерных зависимостей электромагнитных свойств наночастиц в наноструктурной системе позволяет целенаправленно изменять электромагнитные характеристики синтезируемых на их основе наноструктурных композитов с помощью регулирования размеров, формы их структурных элементов [8,10].

Волновой импеданс электромагнитного экрана на основе наноструктурного материала

Процессы взаимодействия электромагнитных полей на границе раздела двух сред обусловлены разными значениями параметров сред (ϵ, μ, σ), которые определяют соотношения E/H (5) - (7). Чем больше различие волновых сопротивлений сред, тем больше значение коэффициента отражения. При применении материалов с высокой проводимостью для экранов, имеющих низкие значения волнового сопротивления по сравнению с окружающим пространством, эти экраны обладают лучшими отражающими свойствами.

При создании широкополосных поглощающих структур (ШПС), основной задачей является согласование волновых импедансов поглощающей структуры с окружающим пространством, при котором интегральный эффект отражения минимален. При этом, для более эффективного поглощения СВЧ-излучения предпочтительно использовать материалы, имеющие высокие значения мнимых частей диэлектрической и / или магнитной проницаемостей. В этом смысле наиболее эффективным поглощением обладают металлы. Вместе с тем при использовании в качестве радиопоглощающих структур металлов необходимо согласование низких значений волнового сопротивления металла с волновым сопротивлением свободного пространства.

Существует ряд способов уменьшения отражения электромагнитных волн от отражающих поверхностей.

Наиболее простой способ уменьшения отражения основан на резонансном принципе [2]. Конструкция такого поглотителя представляет структуру, состоящую из слоя поглощающего материала, перед которым располагают согласующий четвертьволновый слой из не поглощающего материала. Отметим, что такой поглотитель эффективно работает только на фиксированной частоте при нормальном падении волны на поверхность, поэтому применение этого способа на практике малоэффективно и практически невозможно.

Широкие возможности для достижения минимальной разности волновых сопротивлений на границе раздела ШПС–воздух открывает применение наноструктурных материалов. Выбором нужного соотношения μ, ϵ можно получить волновое сопротивление поглотителя равным сопротивлению свободного пространства.

На этом принципе основано, например, формирование многослойных ферритовых поглотителей. Их применяют, как правило, в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц. [13]. Эти материалы имеют заметный резонанс, но они недостаточно эффективно поглощают в широком диапазоне частот. На рис.4 показана зависимость коэффициента отражения R от частоты для ШПС на основе ферромагнитного материала [13]. Для существующих в настоящее время ферритовых материалов согласование импеданса со свободным пространством обеспечивают в сравнительно узкой полосе частот. Использование многослойной структуры из различных материалов и с различной морфологией слоев позволяет расширить частотный диапазон и оптимизировать покрытие по толщине. При этом слой феррита располагают на высокопроводящей поверхности, что увеличивает эффект поглощения. Аналогичные ШПС можно реализовать на основе НСК, в частности, используя систему феррит-полимер с включенными в них (для получения высокой диэлектрической проницаемости) металлическими частицами различной формы [14].

Значительный интерес представляют ШПС градиентного типа. В их структуре волновое сопротивление постепенно изменяется по толщине от значения волнового сопротивления и удельной проводимости свободного пространства на поверхности ШПС до значений соответствующих высокопроводящему металлу. Такое постепенное изменение может быть достигнуто варьированием свойств многокомпонентного материала и геометрической формы наполнителя. Такие ШПС характеризуются широкой полосой частот при малых значениях коэффици-

ента отражения и небольшой толщине, однако являются наиболее сложными для практической реализации. Электродинамический расчет этих ШПС основан на использовании теорий эффективной среды. Основы методики расчета таких металлodieлектрических структур приведены в работах [8,15]. Отметим, что НСК с постепенно изменяющимися свойствами по толщине структуры, кроме выполнения функции согласования поверхностного импеданса, имеют малые поверхностные токи, которые могли бы создавать паразитные излучения на соединительных элементах конструкции экрана [4].

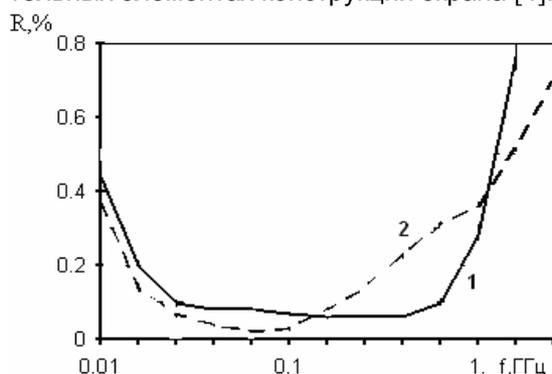


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения для ШПС на основе материала Ferramic E: 1- структура феррит - воздух - металл; 2 - структура феррит - металл.

Для ШПС на основе НСК одним из важных является вопрос о микроструктуре материала (размера, формы и объемной концентрации наночастиц). Экспериментальные оценки электромагнитных характеристик нанодисперсных систем в зависимости от размера наночастиц и микровключений приведены в [7,10,11]. Также в [16] на модельных гранулярных металлodieлектрических композитах показано, что эффективную глубину скин-слоя можно изменять, варьируя размер изолированных друг от друга металлических частиц. Из [10,13] следует, что максимальное поглощение в структуре металлodieлектрик наблюдается при весовом содержании в структуре металлической составляющей 40 - 50%. При увеличении процентного содержания металлической компоненты эффект поглощения исчезает падающая волна отражается. Такие закономерности справедливы для широкого диапазона частот и углов падения волн. Поэтому другим важным аспектом изучения ШПС на основе НСК является исследование перколяционных свойств таких металлodieлектрических структур.

Таким образом, реализовать ШПС с учетом выше рассмотренных условий можно на основе многокомпонентной композиционной структуры

с металлической наногранулированной фазой, которая имеет плавный (постепенный) переход значений волнового импеданса от свободного пространства к слоям с достаточно большими значениями проницаемостей и потерь. При этом для увеличения поглощения может быть использовано резонансное поглощение энергии электромагнитного поля в отдельных структурных элементах. В ШПС также могут формироваться элементы создающие дополнительное рассеяние электромагнитного поля и повышающие механическую прочность и улучшающие отвод тепла. Оптимальное согласование волновых импедансов можно обеспечить при определенных соотношениях между значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей компонентов ШПС. Для обеспечения стабильности электрических характеристик в НСК необходимо применять материалы, удовлетворяющие требованиям взаимной химической совместимости.

Разработка и проектирование ШПС основаны на методах математического моделирования и комплексных экспериментальных исследованиях. При этом необходимо учитывать дисперсионные и размерные зависимости электромагнитных параметров составляющих НСК компонент.

Выводы

Анализ физических механизмов потерь при экранировании электромагнитного поля в диапазоне частот от единиц, десятков килогерц до единиц, десятков гигагерц позволяет сформулировать основные требования к электромагнитным экранам на основе наноструктурных композиционных материалов для обеспечения максимальной эффективности решения задач ЭМС электронных устройств.

НСК материал должен удовлетворять одновременно следующим условиям:

- значения волнового импеданса материала экрана (Z_e) и окружающей среды (Z_w) должно соответствовать следующим соотношениям: для широкополосных поглощающих структур $Z_e = Z_w$, для отражающих экранов $Z_e \ll Z_w$;

- нанодисперсная структура, сформированная в связующей матрице, должна обладать высокой электропроводимостью, что обеспечивает низкие значения удельного сопротивления НСК;

- композиционная структура должна содержать наночастицы ферромагнитной компоненты для обеспечения высоких значений магнитной проницаемости;

- дополнительное ослабление электромагнитного поля в связующей матрице обеспечи-

вается формированием рассеивающих и резонансных структур, а также выбором материала матрицы;

– химической и электрофизической стабильности характеристик, что определяется свойствами компонент композита и связующей матрицы (взаимная химическая стойкость, нерастворимость и значительная разность в поверхностных энергиях компонент и матрицы).

Показано, что для обеспечения ЭМС электронных устройств целесообразно использовать широкополосные поглощающие структуры на основе НСК. Их применение позволяет повысить эффективность экранирования в результате устранения резонансных отражательных эффектов в защищаемой зоне, а также упростить конструкцию и технологию изготовления экрана за счет электрогерметичности. Кроме того, использование НСК увеличивает отвод тепла в результате повышения теплоизлучательных характеристик [15,17].

Таким образом, в работе показано, что в процессе разработки НСК подбором специальных сред и оптимизацией распределения их электродинамических и электрофизических характеристик по фазовому пространству материала можно достичь необходимых значений эффективности экранирования для обеспечения ЭМС электронных устройств.

Литература

1. *Кечиев Л.Н.*, Степанов П.В. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций: – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.
2. *Зайцев Е.С.*, Пилинский В.В. Технические средства предотвращения несанкционированного доступа к информации через цепи электропитания // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники», Ч.1, 2008. – С. 249-257.
3. *Шевель Д. М.* Электромагнитная безопасность. К.: Век+, НТИ, 2002. – 432 с.
4. *Henry W. Ott.* Noise Reduction Techniques in Electronic Systems.- New York, I. Wiley & Sons, 1988. – 429 p.
5. *Дидковский В.С.*, Мачулянский А.В., Пилинский В.В., Попов В.А., Родионова М.В., Швайченко В.Б. Перспективы применения наноструктурных материалов для электромагнитного экранирования // Технічна електродинаміка, тем.вип. «Силова електроніка та енергоефективність», Ч.3, 2008. – С.39-42.
6. *Азаренков Н.А.*, Береснев В.М., Погребняк А.Д., Маликов Л.В., Турбин П.В. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: – Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009.– 209 с.
7. *O. Telychkina*, B. Boehme, M. Heimann, J. E. Morris, and K.-J. Wolter. Study of Nanosilver Filled Conductive Adhesives and Pastes for Electronics Packaging. // The 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2009).
8. *Мачулянский А.В.* Моделирование ультрадисперсных металлodieлектрических систем. // Электроника и связь.– 2000.– №9– С.123–125.
9. *Золотухин И.В.*, Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Нанокompозитные структуры на пути в нанoeлектронику // Природа.– 2006.- №1.– С.11-19.
10. *Мачулянский А.В.* Размерные зависимости динамической поляризуемости ультрадисперсных частиц никеля и хрома // Электроника и связь. – 2001. – №10. – С. 78–80.
11. *Мачулянский А.В.* Высокочастотная проводимость наноразмерных металлических частиц. // Электроника и связь. – 2007.– Ч.1 – С.41–45.
12. *Непийко С.А.* Физические свойства малых металлических частиц. – Киев, Наук. думка, 1985.- 247 с.
13. *Wallace J.L.* Broadband magnetic microwave absorbers: Fundamental limitations// IEEE Trans. Magn.- 1993.- 29, N6, Pt 3.- P.4209-4214.
14. *Bohren Craig F.*, Luebbers Raymond, Langdon H. Scott Microwave- absorbing chiral composites: chirality essential or accidental// Appl. Opt. J.- 1992.- 31, N30.- P.6403-6407.
15. *Мачулянский А.В.*, Попов В.А., Борисов А.В., Яганов П.А. Применение наноструктурных материалов для улучшения теплоотвода в устройствах силовой электроники // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», Ч. 3. – 2006. – С. 27 – 29.
16. *Michielseen E.*, Sajer J., Ranjithan S.// IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.- 1993.- 41,N6-7.- P.1024-1031.
17. *Мачулянский А.В.*, Попов В.А. Терморегулирующие покрытия в устройствах силовой электроники // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електроніки», Ч. 5. – 2006. – С. 87 – 88.