

УДК 539.421:620.179.17

Исследование геометрических критериев электромагнитных экранов

Глыва В.А., Панова Е.В.

Проведена оценка существующих подходов экранирования электромагнитных полей и излучений. Установлено: метрологическая база неудовлетворительна. Предложен новый подход к этой проблематике. Разработана классификация электромагнитных экранов по их конструктивным особенностям для предварительной оценки их эффективности в зависимости от частотного диапазона экранированного поля при нескольких источниках электромагнитных полей. Рассчитанные геометрические критерии позволяют выбрать наиболее рациональную форму защитного экрана в зависимости от локализации источника поля, его частотных и амплитудных характеристик. Выполненные экспериментальные исследования и теоретические расчёты позволяют выбрать технические характеристики материала с необходимыми коэффициентами поглощения и отражения в зависимости от целей экранирования, а также выбрать геометрические параметры электромагнитного экрана, исходя из разработанных критериев. Произведены расчёты преимуществ данного метода, установлены ограничения и недостатки для конкретных условий работающих и условия безопасности в техносфере.

Ключевые слова: электромагнитное поле, экранирование, измерение.

The study of geometric criteria for electromagnetic shielding

Glyva V.A, Panova E.V.

The paper deals with the estimation of existing approaches to electromagnetic fields and radiation shielding. The metrological base has proved to be insufficient. The new approach to solving this problem has been offered. The paper presents the electromagnetic shields classification in accordance with their structural features for preliminary efficiency estimation, depending on the screened field frequency range with multiple sources of electromagnetic fields. Geometric criteria calculation provides an opportunity to choose the most efficient form of shielding depending on the field source location, its frequency and amplitude characteristics. The experimental study performance and theoretical calculation make it possible to select the technical characteristics of the material meeting the absorption requirements and reflection ratios depending on the screening purposes, as well as to select the geometrical parameters of the electromagnetic screen, based on the criteria developed. Calculations of the advantages of this approach have been performed, restrictions and disadvantages for specific working conditions and safety conditions in the technosphere have been identified.

Keywords: electromagnetic field, screening, measurement.

Введение

Экспериментальные исследования по организации защиты работающих в производственных условиях показали, что наиболее сложной задачей является учет переизлучений, возникающих из-за наличия в производственных помещениях отражающих поверхностей и резонирующих элементов. Влияние переизлучений определяется экспериментально с использованием измерительного оборудования для соответствующих частотных диапазонов.

Электромагнитные экраны в виде полых цилиндрических, сферических, прямоугольных оболочек, внутрь которых помещают экранированное устройство, выполняют две функции: защищают устройство, помещенное в экран, от внешнего электромагнитного поля; защищают внешнее пространство от электромагнитного поля, созданного устройством, помещенным в экран. Первый пункт касается электромагнитной совместимости технических средств и опосредованного влияния электромагнитных полей на персонал. Второй

пункт касается защиты работающих от электромагнитных полей, созданных техническими средствами. Учитывая возможность переизлучений экраном внутреннего поля, экранирование такими оболочками целесообразно только для линейных электропотребителей.

Цель работы – провести исследование геометрических критериев электромагнитных экранов.

Эффективность электромагнитных экранов в зависимости от их технических характеристик и физических составляющих излучаемых полей

При выборе формы и материала для изготовления экрана следует учитывать: механическую прочность, тип постоянного поля, компоненты переменного электромагнитного поля и т.д.

Для случая, когда используется сплошной электромагнитный экран (экранируется источник магнитных полей больших амплитуд), целесообразно проводить предварительный расчет глубины проникновения электромагнитного поля в тело экрана [1]. Для высокочастотных полей расчет должен учитывать действительную и мнимую часть магнитной проницаемости. В низкочастотной области (в т.ч. промышленной частоты 50 Гц) главную роль играет действительная часть магнитной проницаемости, которая практически не отличается от абсолютной. В общем случае под глубиной проникновения следует считать расстояние вдоль направления распространения волны, на которой амплитуда падающей волны уменьшается в e раз ($e \approx 2,7$):

$$e^{-k\delta} = e^{-1},$$

$$k \cdot \delta = 1, \quad \delta = 1/k,$$

где k – волновое число, δ – глубина проникновения волны.

Глубина проникновения зависит от свойств среды (μ и σ) и частоты экранированной волны f :

$$\omega = 2\pi \cdot f,$$

где ω – циклическая частота, σ – проводимость материала экрана, μ – абсолютная магнитная проницаемость материала экрана.

Для низкочастотных магнитных полей важным является определение граничных условий для потенциалов на металлических оболочках. Наиболее рациональным подходом к расчету напряженности поля в пространстве, частично заполненном проводящим материалом, является решение уравнения для напряженности поля в оболочке и в окружающей воздушной среде с учетом граничных условий для напряженности на поверхности границы сред. В зависимости от геометрических характеристик экранов и толщины поверхностного слоя (глубины проникновения падающего поля), оболочки делятся на толстостенные (толщина Δ которых превышает глубину проникновения поля $\delta < \Delta$) и тонкостенные (толщина Δ которых меньше глубины проникновения поля $\delta > \Delta$). В случае $\delta < \Delta$ для расчета напряженности поля по таким оболочкам (экранам) необходимо выполнять интегрирование уравнений Максвелла. В случае, когда $\delta > \Delta$ – решение задачи можно получить, используя приближенные граничные условия для потенциалов поля в оболочке (экране). Преимуществом такого подхода является то, что результаты расчетов имеют точные результаты.

Экранирующие устройства, используемые в охране труда и техносфере, как правило, являются тонкостенными. Результаты расчетов напряженности поля до экранирования и после экранирования, в диапазоне низких частот $f < 10^4$ Гц экранов, которые имеют конечные размеры, показали незначительные погрешности [2]. Для тонких слоев и оболочек целесообразен способ решения задачи, при котором условие малой толщины слоя или оболочки учитывается в процессе решения. Реализация возможна путем преобразования граничных условий для напряженности поля на поверхности оболочки и установление связи между величинами, характеризующими поля по обе

стороны экрана. В случае квазистационарных полей, уравнения Максвелла имеют вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= i \omega \mu \mathbf{H}, \end{aligned}$$

где σ – проводимость материала экрана, ω – циклическая частота экранированного поля, μ – магнитная проницаемость.

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \\ &+ \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \\ &+ \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \end{aligned}$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – единичные векторы.

Расчеты выполнены для тонкой металлической оболочки, расположенной между плоскостями $z = \Delta/2$ и $z = -\Delta/2$. По направлению распространения поля z в случае плоского ортогонального поля вычисления дали следующую структуру поля:

$$\begin{aligned} \{H, E\} &= \frac{\operatorname{sh} \bullet k(z + \Delta/2)}{\operatorname{sh} \bullet k\Delta} \{H_2; E_2\}^-, \\ &- \frac{\operatorname{sh} \bullet k(z - \Delta/2)}{\operatorname{sh} \bullet k\Delta} \{H_1; E_1\} \end{aligned}$$

где H_1, E_1 – напряженность магнитного и электрического полей перед экраном; H_2, E_2 – напряженность магнитного и электрического полей за экраном; K – волновой вектор; z – направление отчисления расстоянии; Δ – толщина экрана.

При определении эффективности электромагнитных экранов для обеспечения необходимых параметров необходимо учитывать: уровень отражения, затухания, обусловленного проникновением энергии через материал экрана, наличие дифракционных явлений и отдельно стоящих крупных радиоотражательных поверхностей, отдельных излучателей. Для выполнения такой работы целесообразно исходить из геометрических соображений [3]. Схема влияния геометрической конфигурации экрана с учетом дифракционных явлений приведены на рис. 1.

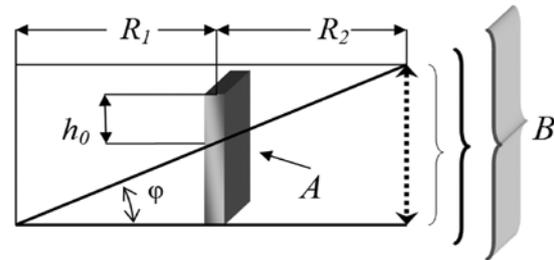


Рис.1. Схема взаимного расположения электромагнитного экрана A и источника поля.

B – зона защиты.

Для количественного учета дифракции был введён безразмерный параметр коэффициента полезного действия η :

$$\eta = h_0 \cdot \cos \varphi = \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

где h_0 – расстояние между кромкой экрана и осью источника, λ – длина волны; R_1 – расстояние от источника до экрана; R_2 – расстояние от экрана до зоны защиты.

На рис.2 приведены экспериментальные зависимости дифракционного затухания в зависимости от интегрального параметра η , который определяется расстоянием от экрана к источнику и защищаемой зоны (R_1, R_2), а также длины электромагнитной волны λ и расстояния h_0 между кромкой экрана и осью источник – предел защищенной зоны рис.2.

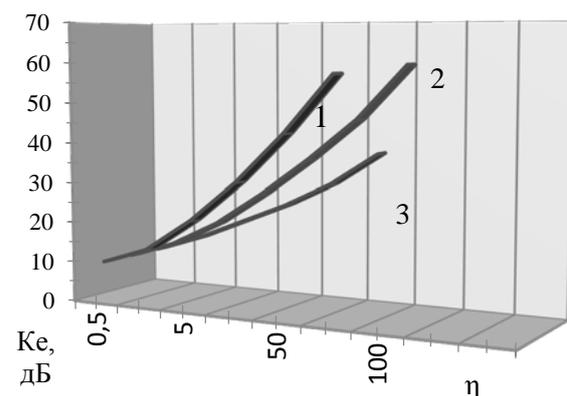


Рис.2. Зависимость коэффициента экранирования от геометрических соотношений расположения источника поля и размеров экрана: 1 – для параллельной экрана составляющей поля; 2 – интегральное экранирование; 3 – для составляющей поля, перпендикулярной экрана.

Анализ рис.2 показывает, что сплошные экраны дают большие затухания электромагнитного излучения, что не всегда нужно для полей малых амплитуд. Поэтому для защиты можно использовать перфорированные поверхности, металлические решетки, которые дают достаточное снижение уровней поля, но имеют меньший вес и стоимость. Эффективности таких экранов зависят, в основном, от диаметров отверстий d и расстояниями между ними ℓ . Экспериментальные данные зависимости коэффициента экранирования перфорированных поверхностей и длины электромагнитной волны λ и параметров перфорации - рис.3.

Для решетчатых и линейных периодических структур (чередование металлических проводов с определенным шагом) коэффициенты экранирования зависят от диаметров проводов и расстояниями между их осями, а также от длины экранированной волны. Зависимости защитных свойств таких экранов от упомянутых параметров приведены на рис.4.

Для низких и сверхнизких частот структуры из меди и алюминия эффективнее стальные за счет более высокой удельной проводимости. Эффективность функционирования электромагнитного экрана обеспечивается надежным гальваническим контактом в местах соединений отдельных элементов решетки. В низкочастотной области решения краевой задачи для напряженности электромагнитного поля можно использовать краевую задачу для скалярного потенциала, расчёт которой предложен в [4]. Размещение экранирующей оболочки данными поверхностями решает задачу экранирования поля независимо от его амплитуды [5]. Проектированию электромагнитной оболочки должно предшествовать определение относительного уровня высших пространственных гармоник в магнитном поле электрооборудования. Если расчетным или опытным путем определить достаточное количество пространственных гармоник поля,

то этим будет определено поле во всем пространстве вокруг объекта.

Обязательным является расчет защитных экранов с переменной электрической проводимостью при изменении толщины. Наши разработки по металлополимерным экранам [6] доказали, что есть технологические трудности по соблюдению толщины, поэтому необходимо рассчитать возможные отклонения уровней экранированного поля за экраном (исходя из соотношений отражения и преломления электромагнитного поля [4]):

$$\Delta A_x = a^2 \exp(-2k \frac{z-z_1}{z_0}) \cdot (\partial A_x / \partial t)$$

$$\Delta A_y = a^2 \exp(-2k \frac{z-z_1}{z_0}) \cdot (\partial A_y / \partial t)$$

где a – амплитуда векторного потенциала; z – расстояние по направлению в ортогональной системе отсчета; k – целое число.

Низкие значения коэффициентов экранирования являются результатом нарушений непрерывности экрана в местах соединения компонентов (лент). Более эффективным экраном является экран тканого плетения из элементов меньшей ширины и с большим количеством слоев. При высокой технологичности [7] использование экранов тканого плетения из металлизированных нитей имеет недостаток: высокая эффективность экрана только для частот от 0,1 МГц. Технология напыления металла на полимерные нити как сорбционная, так и с использованием палладиевого катализатора сложная, что экономически нецелесообразно.

С целью преодоления этих недостатков нами были изготовлены металлосодержащие шнуры диаметрами 0,3-0,5 мм по технологии, алогично использованной в [6]. Защитные поверхности из этого материала при стандартном двух-, трехслойном плетении имеют преимущество: удовлетворительные коэффициенты экранирования за практически отсутствующим отражением в широкой частотной

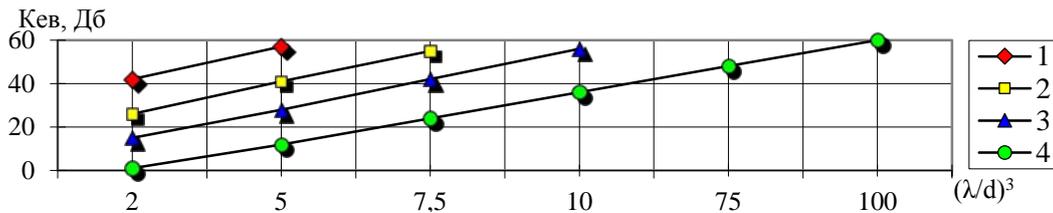


Рис.3. Зависимость защитных свойств электромагнитного экрана от параметров перфорации отверстий ℓ , где 1 - 50мм, 2 - 20мм, 3 - 10 мм, 4 - 5 мм.

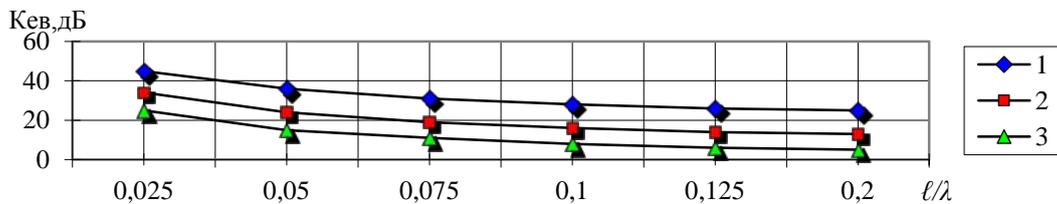


Рис.4. Зависимость коэффициента экранирования электромагнитного поля от параметров решетчатой структуры ℓ - расстояние между осями проводов, d - диаметр проволок, λ - длина волны, 1, 2, 3 - соответствуют соотношениям $\ell / d = 2, 5, 10$.

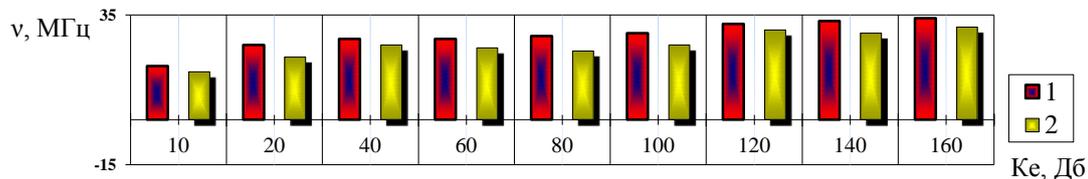


Рис.5. Зависимость коэффициента экранирования материала с металлосодержащих шнуров от частоты экранированного поля. 1 - трехслойное тканое плетение, 2 - двухслойное тканое плетение.

полосе (рис.5). Но если для замкнутых экранирующих оболочек задача практически всегда однозначна, то для незамкнутых экранов существует несколько вариантов их использования. Параметры плоских экранов в большинстве случаев можно изменять по толщине (в зависимости от амплитуды экранированного поля), а их размеры оговариваются размерами помещения, отдельной стены или технического средства.

Во многих случаях использование замкнутого электромагнитного экрана вокруг источника магнитного поля сверхнормативного значения невозможно из-за необходимости доступа к нему при эксплуатации и контроля технического состояния. В этих случаях используется не полностью замкнутые оболочки различной степени незамкнутости. Основным параметром для экранов правильной формы (сферических, цилиндрических) степень незамкнутости целесообразно определять по углу

раскрытия относительно геометрического центра (рис.6).

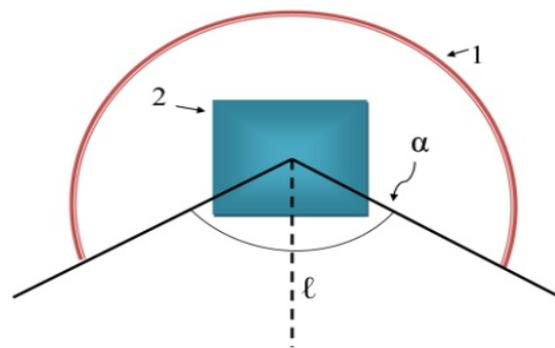


Рис.6. Незамкнутый электромагнитный экран цилиндрической формы: 1 - поверхность экрана, 2 - источник электромагнитного поля, α - угол раскрытия.

Размеры источника поля (которые приблизительно равны радиусу экрана), изменения параметров электромагнитного поля за его пределами имеют сложную зависимость как от расстояния до центра экрана l , так и угла раскрытия α . Изменения индукции магнитного

поля для этих параметров оболочки радиусом 1, 2 м для источника, выходная излучательная способность которого равна относительной единицы, на расстоянии от 1,5 м от геометрического центра и зависимость индукции магнитного поля от расстояния до геометрического центра экрана с угла раскрытия $\pi/2$, приведены на рис.7 на рис.8.

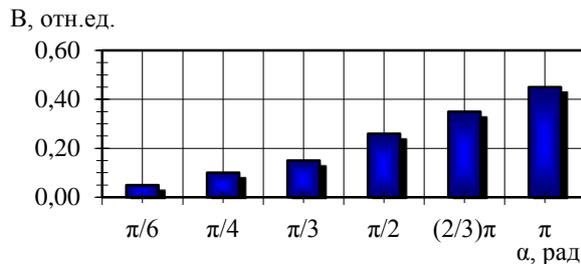


Рис.7. Зависимость индукции магнитного поля от угла раскрытия оболочки.

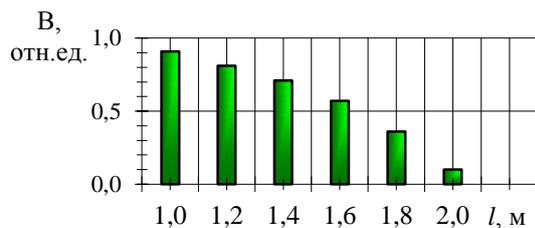


Рис.8. Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до геометрического центра оболочки (угол раскрытия $\pi/2$).

Наиболее эффективными для практического использования являются электромагнитные экраны с максимально минимизированным коэффициентом отражения: композитные электромагнитные экраны с управляемыми защитными свойствами, многослойные электромагнитные экраны с распределенной проводимостью (или поглотители градиентного типа), геометрические экраны с геометрическими неоднородностями, электромагнитные экраны резонансного типа.

В случае, когда волны, отраженные от поверхности электропроводной пленки и металлической прокладки, находятся в противофазе и имеют одинаковые амплитуды, происходит их взаимная компенсация. Создание разности фаз в $\lambda/2$ (λ – длина электромагнитной волны)

реализуется нанесением слоя диэлектрика толщиной $\lambda/4$. Его толщина, определяется:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon'}}$$

где λ_0 – длина падающей волны; λ – длина волны в материале; ϵ' – относительная электрическая проницаемость материала.

При высокой эффективности такая конструкция имеет ряд недостатков. Она приемлема для монохромного излучения. Эффективность экрана снижается с отклонением угла падения электромагнитной волны от нормали и зависит от ее поляризации. Толщина нанесенного слоя должна увеличиваться с уменьшением частоты электромагнитного излучения. Создание широкополосных электромагнитных экранов с малыми коэффициентами отражения базируется на согласовании поглощающей структуры материала экрана со свойствами среды распространения электромагнитной волны, при которой общий коэффициент отражения – минимальный. Это возможно при условии, когда волновое сопротивление диэлектрического слоя Z соответствует соотношению:

$$Z = (\mu/\epsilon)^{1/2},$$

где μ и ϵ – магнитная и электрическая проницаемость материала соответственно.

Выбрав нужное соотношение магнитной диэлектрической проницаемости, волновое сопротивление можно сделать таким, которое будет равняться сопротивлению пространства распространения электромагнитной волны. Такие структуры целесообразно изготавливать на основе ферритовых материалов. Недостатком является достижение минимальных коэффициентов отражения при нормальном падении электромагнитной волны на экран. Коэффициенты отражения таких экранов возрастают с ростом угла падения электромагнитной волны на экран (относительно нормали к поверхности экрана) – рис.9. и коэффициенты отражения зависят от параметра Z и от частоты падающей электромагнитной волны рис.10.

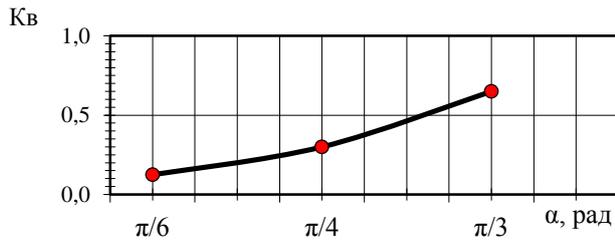


Рис.9. Зависимость коэффициента отражения от угла падения электромагнитной волны на поверхность экрана ($\nu = 30$ МГц).

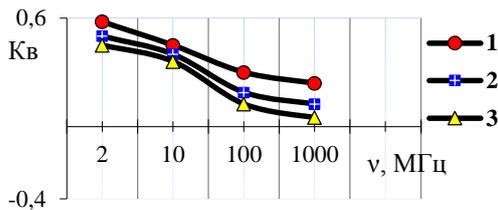


Рис.10. Зависимость коэффициентов отражения электромагнитного поля от частоты экранированного электромагнитного поля (графики 1; 2; 3 соответствуют значениям $Z - 2; 1; 0,5$, соответственно).

Заключение

Наиболее эффективными электромагнитными экранами из электротехнических сталей являются стали класса 2011. В низкочастотной области наибольшие коэффициенты экранирования (K_e от 9 до 10) достигаются на частотах $6 \div 7$ кГц. В высокочастотной области (K_e от 55 до 60) – достигаются на частотах $160 \div 3000$ МГц.

Защитные свойства пермаллоя с различным содержанием никеля совпадают на частотах $0,6 \div 0,9$ кГц и значительно снижаются с ростом частоты.

Эффективными металлическими экранами являются магнитомягкие аморфные сплавы ($K_e = 1000 \div 400$) при изменении индукции внешнего магнитного поля от $5 \div 100$ мкТл, при индукции поля от $200 \div 100$ мкТл коэффициенты экранирования практически стабильны ($K_e = 500$) и защитные свойства увеличиваются после термомагнитной обработки (до 30%).

Преимуществом композитных металлополимерных материалов является: управляемость

защитных свойств от 10 до 70 дБ; малые коэффициенты отражения (до 0,3). Эластичные композитные материалы толщиной от 5 мм и концентрацией металлической субстанции $30 \div 35\%$ обеспечивают резкий рост показателя коэффициента экранирования (от 40 до 60 дБ).

Перспективными защитными материалами являются металлосодержащие шнуры. Преимущество – стабильность защитных свойств ($20 \div 30$ дБ) в широком частотном диапазоне (50 Гц $\div 160$ МГц).

Литература

1. Glyva V.A. Method of electromagnetic screen shielding properties determination / V.A. Glyva, E.V. Panova // Science & military, 2013, №2.
2. Аполлонский С.М. Построение моделирующих устройств для исследования внешних электрических полей источников / С.М. Аполлонский, И.Д. Логинова // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 2009, № 1. – С. 104-110.
3. Островский О.С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Одаренко, А.А. Шматько // Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина, 2003. [электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.bnti.ru/>
4. Глива В.А. Засоби підвищення безпечної експлуатації сучасного комп'ютерного обладнання / В.А.Глива, А.В. Лук'янчиков, Л.О. Левченко, О.В. Панова // Проблеми охорони праці в Україні. – К., 2008, Вип. 15. – С. 98-105.
5. Волохов С.А. Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудований / С.А. Волохов, П.Н. Добродеев // Электротехника, 2006, № 4. – С.28 –33.
6. Патент 74857 Україна, МПК G12B17/00. Електромагнітний екран з керованими захисними властивостями / Глива В.А., Назаренко М.В., Подобед І.М., Матвеева О.Л., Панова О.В.; заявник і патентоотримувачі; заявлено 12.05.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.
7. Лыньков Л.М. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л.М. Лыньков, В.А. Богуш, В.П. Глыбин и др. Под.ред. Л.М. Лынькова. – Минск, 2000. – 284 с.

References

1. Glyva V.A. Method of electromagnetic screen shielding properties determination / V.A. Glyva, E.V. Panova // *Science & military*, 2013, №2.
2. Apollonskiy S.M. Postroenie modelirujushhih ustrojstv dlja issledovanija vneshnih jelektricheskikh polej istochniko [Building simulators to explore sources of external electric fields] / S.M Apollonskiy, I.D Loginov // *Izvestija AN SSSR. Jenergetika i transport* [Math. USSR Academy of Sciences. Energy and transport], 2009, № 1. – P. 104-110.
3. Ostrovsky O.S. Zashhitnye jekrany i poglotiteli jelektromagnitnyh voln [Protective shields and absorbers of electromagnetic waves] / O.S Ostrovsky, E.N Odarenko, A.A Shmatko // *Kharkiv National University V.N Karazina, Ukraine, 2003. URL: <http://www.bnti.ru/>*
4. Gliva V.A. Zasobi pidvishhennja bezpechnoi ekspluatacii suchasnogo komp'juternogo obladnannja [Means to improve the safe operation of modern computer equipment] / V.A. Gliva, A.V Luk'yanchikov, L.O Levchenko, O.V Panova // *Problemi ohoroni praci v Ukraini* [Problems in Ukraine parts receptionists]. – Kiev, 2008, № 15. – P. 98-105.
5. Volohov S.A. Zakonomernosti raspredelenija vneshnego magnitnogo polja jelektrooborudovanij [Patterns of distribution of an external magnetic field of electrical equipment] / S.A. Volohov, P.N Dobrodeev // *Jelektrotehnika* [Electrical engineering], 2006, № 4. – P.28 -33.
6. Patent 74857 Ukraine, IPC G12V17/00. Elektromagnitnij ekran z kerovanimi zahisnimi vlastivostjami [Electromagnetic shield with controlled barrier properties] / Gliva V.A., Nazarenko M.V., Podobed I.M., Matveeva O.L., Panova O.V.; Representative and patent owners; stated 12.05.2012, published 12.11.2012, Bull. № 21.
7. Lynkov L.M. Gibkie konstrukcii jekranov jelektromagnitnogo izluchenija [Flexible design screens EMI] / L.M Lynkov V.A Bogush, V.P Glybin. Ed. L.M. Lynkov. – Minsk, 2000. – 284 p.

Статья поступила в редакцию 27 января 2014 г.

Глыва Валентин Анатольевич – профессор, доктор технических наук НАУ, Национального авиационного университета, г. Киев, Украина. E-mail: larlevch@mail.ru

Панова Елена Васильевна – ассистент Киевского национального университета строительства и архитектуры (КНУСА), г. Киев, Украина. E-mail: elena_panova@list.ru

Glyva Valentyn Anatoliyevich – Professor, Doctor of Technical sciences NAU, National aviation university, Kiev, Ukraine. E-mail: larlevch@mail.ru

Panova Elena Vasilievna – Assistant of Kiev national university of construction and architecture, Kiev, Ukraine. E-mail: elena_panova@list.ru