

Е.В. Панова

(Киевский Национальный университет строительства и архитектуры;
e-mail: elena_panova@list.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

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.

Ключевые слова: электромагнитное поле, экранирование, измерение.

O.V. Panova

THE STUDY OF GEOMETRIC CRITERIA ELECTROMAGNETIC SHIELDING

The classification of electromagnetic shields for their design features for a preliminary assessment of their effectiveness, depending on the frequency range of the screened field with multiple sources of electromagnetic fields. Calculated geometric criteria used to select the most efficient form of shielding depending on the location of the field source, its frequency and amplitude characteristics.

Key words: an electromagnetic field, screening, measurement.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 24 января 2014 г.

Электромагнитные экраны в виде полых цилиндрических, сферических, прямоугольных оболочек, внутрь которых помещают экранируемое 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 непосредственно защиты работающих от электромагнитных полей, созданных техническими средствами. Учитывая возможность переизлучений экраном внутреннего поля, экранирование такими оболочками целесообразно только для линейных электропотребителей (электродвигатели, трансформаторы и т.п.). Для электронных нелинейных устройств такие электромагнитные экраны не только неэффективны, но и вредны.

Электромагнитная волна в металле практически полностью угасает на расстоянии, сравнимом с длиной волны, что обуславливает эффективность экранирования металлом электромагнитных излучений сверхвысоких и очень высоких частот. Для низкочастотной области это неприемлемо, поэтому металлические экраны имеют ограниченную эффективность.

При выборе формы и материала для изготовления экрана следует учитывать механическую прочность, тип постоянного поля, компоненты переменного электромагнитного поля, стоимость и т.д. Экранирование электростатического поля заключается в компенсации внешнего поля зарядами, которые появляются на стенках экрана проводящего материала вследствие электростатической индукции.

Экранирование в магнитном поле постоянного тока происходит за счёт прохождения силовых линий электромагнитного поля через участки с меньшим магнитным сопротивлением, чем магнитное сопротивление стенок экрана. **Экранирование переменного электромагнитного поля** обеспечивается главным образом тем, что электромагнитная волна в стенках экрана угасает, тратя энергию на покрытие потерь, обусловленных вихревыми токами в стенках экрана. Исходя из этого, толщина стенки является критическим показателем по эффективности экранирования.

Для **квазистационарных магнитных полей**, которыми являются, в частности, магнитные поля промышленной частоты 50 Гц , экранирование достигается как за счёт затухания волны в стенках экрана, так и за счёт прохождения линий магнитного поля через участки с меньшим магнитным сопротивлением. Для случая, когда используются сплошной электромагнитный экран (экранируется источник магнитных полей больших амплитуд), целесообразен предварительный расчёт глубины проникновения электромагнитного поля в тело экрана [1].

Для высокочастотных магнитных полей такой расчёт должен учитывать как действительную, так и мнимую часть магнитной проницаемости. В **низкочастотной области** (в том числе промышленной частоты 50 Гц) главную роль играет действительная часть магнитной проницаемости, которая практически не отличается от абсолютной.

В общем случае глубиной проникновения следует считать расстояние вдоль направления распространения волны, на котором амплитуда падающей волны уменьшается в e раз ($e \approx 2,7$):

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

где k – волновое число;

δ – глубины проникновения волны.

Глубина проникновения волны 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 расчёту напряжённости поля в пространстве, частично заполненном проводящим материалом (электромагнитные экраны конечных размеров и, в частности, замкнутые оболочки, на которых рассеивается

поле), является решение уравнения для напряжённости поля в оболочке и в окружающей воздушной среде, а также совокупность этих решений с учётом граничных условий для напряжённости 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 расчёта напряжённости 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 расчётов имеют точные результаты.

Экранирующие устройства, используемые в инженерной и трудовой практике, как правило, являются тонкостенными. Для тонких слоёв и оболочек целесообразен такой способ решения задачи, при котором условие малой толщины слоя или оболочки учитывается в процессе решения. Реализовать это возможно путём соответствующего преобразования граничных условий для напряжённости поля на поверхности оболочки, а именно путём изъятия из этих условий величин, характеризующих напряжённость поля в самой оболочке, и установление непосредственной связи между величинами, характеризующими поле по обе стороны оболочки (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.

Расчёты выполняются для тонкой металлической оболочки, расположенной между плоскостями $z = \Delta/2$ и $z = -\Delta/2$. По направлению распространения поля z , в случае плоского ортогонального поля, выполнение стандартной процедуры вычислений даёт такую структуру поля:

$$\{H, E\} = \frac{sh \cdot k(z + \Delta/2)}{sh \cdot k\Delta} \{H_2; E_2\} - \frac{sh \cdot k(z - \Delta/2)}{sh \cdot k\Delta} \{H_1; E_1\},$$

где H_1, E_1 – напряжённость магнитного и электрического полей перед экраном;

H_2, E_2 – напряжённость магнитного и электрического полей за экраном;
 K – волновой вектор;
 z – направление отсчёта расстояния;
 Δ – толщина экрана.

При определении эффективности электромагнитных экранов для обеспечения необходимых параметров необходимо учитывать: уровень отражения, затухания, обусловленного проникновением энергии через материал экрана, и наличие дифракционных явлений. Последнее касается перфорированных и решётчатых экранирующих поверхностей и экранов ограниченных размеров (по длине и ширине).

Кроме того, необходимо учитывать отдельно стоящие крупные радиоотражательные поверхности и отдельные излучатели, которые в некоторых случаях повышают уровень поля. Решение этих задач целесообразно выполнять с использованием как теоретических, так и экспериментальных методов.

Использование приемлемых по точности математических методов при выбранном варианте защиты позволяет существенно сократить затраты времени и средств для обеспечения необходимых уровней защиты. Для выполнения такой работы целесообразно исходить из геометрических соображений [3]. Схема к расчёту влияния геометрической конфигурации экрана с учётом дифракционных явлений приведена на рис. 1.

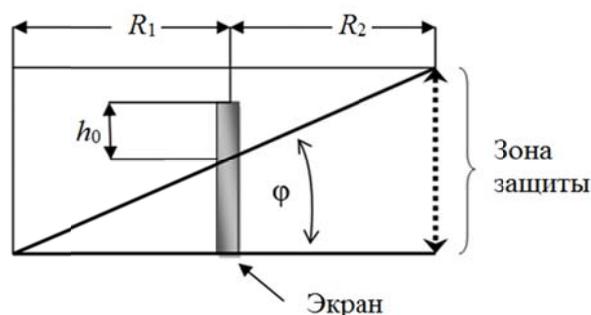


Рис. 1. Схема взаимного расположения электромагнитного экрана и источника поля

Для количественного учёта дифракции целесообразно ввести безразмерный параметр – коэффициент полезного действия η :

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

где h_0 – расстояние между кромкой экрана и его частью, огибаемой волной, достающей границы зоны защиты,

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 , а также длины электромагнитной волны λ и расстояния h_0 .

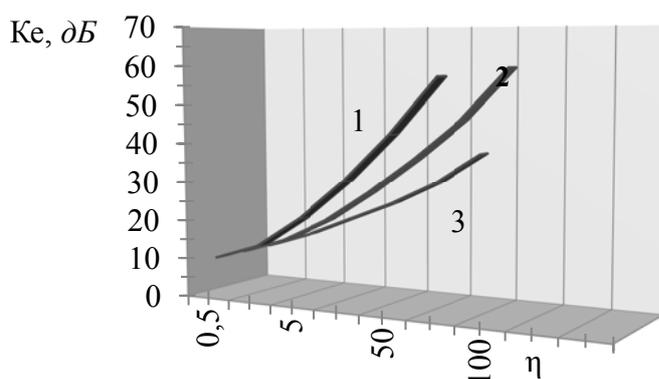


Рис. 2. Зависимость коэффициента экранирования от геометрических соотношений расположения источника поля и размеров экрана:

- 1 – для параллельной экрану составляющей поля;
- 2 – интегральное экранирование;
- 3 – для составляющей поля, перпендикулярной экрану

Анализ рис. 2 показывает, что сплошные экраны обеспечивают достаточно большие затухания электромагнитного излучения, что не всегда нужно для полей малых амплитуд. Поэтому для защиты можно использовать перфорированные поверхности, металлические решётки, которые обеспечивают достаточное снижение уровней поля, но имеют меньшие вес и стоимость. Конструкции перфорированных экранов должны удовлетворять условиям, обеспечивающих необходимый минимум защиты. Эффективности таких экранов зависят в основном от диаметров отверстий d и расстояний между ними ℓ . Экспериментальные зависимости коэффициента экранирования перфорированных поверхностей и длины электромагнитной волны λ и параметров перфорации приведены на рис. 3.

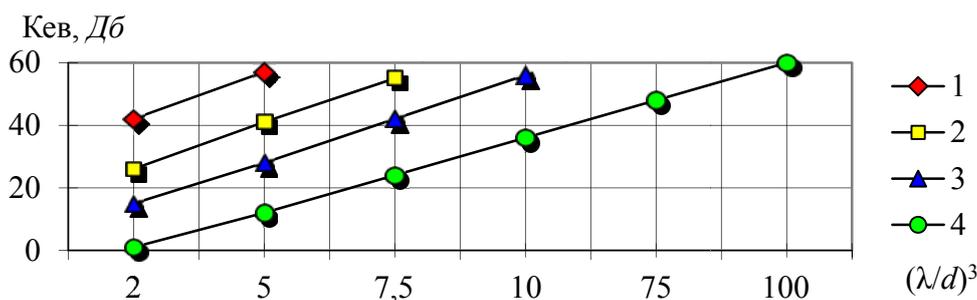


Рис. 3. Зависимость защитных свойств электромагнитного экрана от параметров перфорации отверстий ℓ :
1 – 50 мм; 2 – 20 мм; 3 – 10 мм; 4 – 5 мм

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

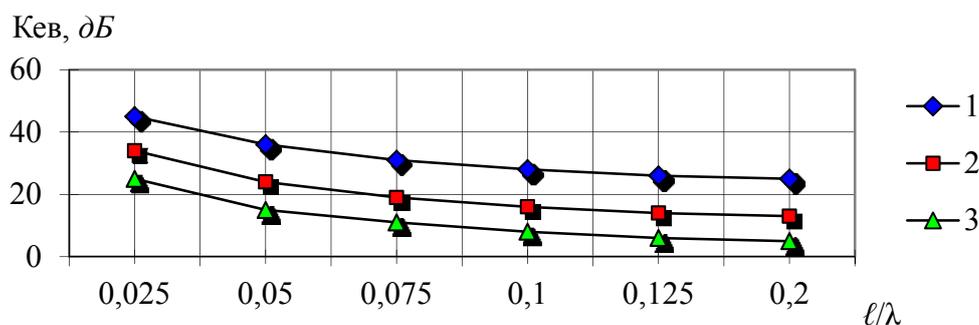


Рис. 4. Зависимость коэффициента экранирования электромагнитного поля от параметров решетчатой структуры:
 l – расстояние между осями проводов; d – диаметр проводов; λ – длина волны;
 1, 2, 3 – соответствуют соотношениям $l/d = 2, 5, 10$

Материал, из которого изготовлены провода, практически не влияет на коэффициенты экранирования в высокочастотной области, поэтому в практической трудовой деятельности проводимостью проводов можно пренебречь.

Для низких и сверхнизких частот структуры из меди и алюминия эффективнее чем стальные за счёт более высокой удельной проводимости. Эффективность функционирования электромагнитного экрана обеспечивается надёжным гальваническим контактом в местах соединений отдельных элементов решетки.

В низкочастотной области решения краевой задачи для напряжённости электромагнитного поля при приемлемой приближенности можно использовать краевую задачу для скалярного потенциала [4].

Проектированию электромагнитной оболочки должно предшествовать определение относительного уровня высших пространственных гармоник в магнитном поле электрооборудования. Если расчётным или опытным путем определить достаточное количество пространственных гармоник поля, то этим будет определено поле во всем пространстве вокруг объекта. Таким образом можно:

- определить характеристики поля в любой точке вокруг объекта;
- построить графики его изменений с расстоянием от объекта;
- определить достаточное количество пространственных гармоник для характеристики поля в заданной области.

Обязательным является расчёт защитных экранов с переменной электрической проводимостью при изменении толщины экрана. Наши наработки по металлополимерным экранам с управляемыми защитными свойствами показали, что есть определённые технологические трудности по соблюдению толщины экрана, поэтому есть необходимость расчётов возможных отклонений уровней экранированного поля за экраном.

Эти расчёты сводятся к решению двух уравнений:

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

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

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

Низкие коэффициенты экранирования является, в основном, результатами нарушений непрерывности экрана в местах соединения компонентов (лент). Более эффективным является экран тканого плетения из элементов меньшей ширины, но с большим количеством слоёв.

Наработки в этом направлении [5, 6] показали, что при высокой технологичности использования экраны тканого плетения из металлизированных нитей имеют ряд недостатков, главными из которых являются:

- высокая эффективность только для частот от 0,1 МГц;
- технология напыления металла на полимерные нити как сорбционная, так с использованием палладиевого катализатора достаточно сложна, что значительно удорожает меры по экранированию электромагнитных полей и во многих случаях делает их экономически нецелесообразными.

С целью преодоления указанных недостатков нами были изготовлены металлосодержащие шнуры диаметрами 0,3-0,5 мм по технологии, алогичной использованной в [6]. Защитные поверхности из этого материала при стандартном двух-, трёхслойном плетении имеют ряд преимуществ, главными из которых являются удовлетворительные коэффициенты экранирования за практически отсутствующим отражением в широкой частотной полосе (рис. 5).

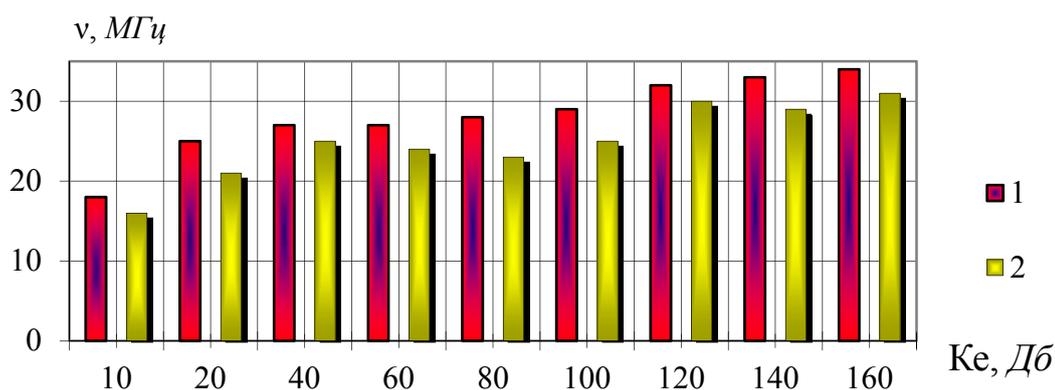


Рис.5. Зависимость коэффициента экранирования материала из металлосодержащих шнуров от частоты экранированного поля: 1 – трёхслойное тканое плетение; 2 – двухслойное тканое плетение

Использование теоретических соображений и экспериментальных данных в трудовой охране имеет определённые ограничения. 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 определяются 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 неполностью замкнутые оболочки различной степени незамкнутости. Основным параметром экранов правильной формы (сферических, цилиндрических) – степень незамкнутости – целесообразно определять по углу раскрытия относительно геометрического центра (рис. 6).

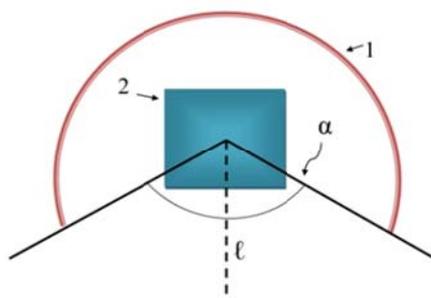


Рис. 6. Незамкнутый электромагнитный экран цилиндрической формы:
1 – поверхность экрана; 2 – источник электромагнитного поля;
 α – угол раскрытия; ℓ – расстояние от центра экрана

Наиболее эффективными для практического использования являются электромагнитные экраны с максимально минимизированным коэффициентом отражения. В общем случае эти экраны можно классифицировать по пяти группам:

1. **Композитные** электромагнитные экраны с управляемыми защитными свойствами.

2. **Многослойные** электромагнитные экраны. Физический принцип их действия основан на поглощении многократно переотражённой электромагнитной волны в середине слоистой металл-диэлектрической структуры. Причем толщина слоев принимается обычно меньше толщины скин-слоя для определённой длины волны. Возможно создание такого материала, электрофизические характеристики которого последовательно меняются от слоя к слою. Слои такого материала располагаются в порядке убывания ϵ , а толщины слоёв зависят от ϵ слоя и определяются соотношением:

$$\frac{\epsilon_1}{d_1} = \frac{\epsilon_2}{d_2} = \dots = \frac{\epsilon_n}{d_n} = \text{const},$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_n$ – диэлектрические проницаемости слоёв;
 d_1, d_2, d_n – толщины слоёв.

3. Электромагнитные экраны *с распределённой проводимостью* (поглотители градиентного типа), в которых диэлектрическая или магнитная проницаемость увеличивается с проникновением излучения в тело материала. Такие покрытия могут быть разновидностью композитных электромагнитных экранов с управляемыми защитными свойствами, при условии изменения концентрации металлической субстанции в материале по толщине. Реализация такого похода не составляет значительных технологических трудностей.

4. Геометрические экраны *с геометрическими неоднородностями*. Поверхности таких материалов состоят из конусообразных, клиновидных, пирамидальных и других геометрических структур, которые превращают плоскую падающую волну в поверхностную с последующим угасанием в поверхностном диэлектрическом слое.

5. Электромагнитные экраны *резонансного типа*. Принцип их действия основан на суперпозиции волн отражённых от нескольких поверхностей.

В случае, когда волны, отражённые 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) обеспечивается нанесением слоя диэлектрика толщиной $\lambda/4$. Его толщина определяется из фундаментальных соотношений:

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

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 (узкополосного). Эффективность экрана снижается с отклонением угла падения электромагнитной волны от нормали и зависит от её поляризации. Толщина нанесенного слоя должна увеличиваться с уменьшением частоты электромагнитного излучения. Создание широкополосных электромагнитных экранов с малыми коэффициентами отражения базируются на согласовании поглощающей структуры материала экрана со свойствами среды распространения электромагнитной волны, при которой общий коэффициент отражения минимален. 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, который будет равняться сопротивлению пространства распространения электромагнитной волны. Такие структуры целесообразно изготавливать на основе ферритовых материалов. Наибольшая их эффективность достигается при экранировании ВЧ, СВЧ и УВЧ диапазонов. Недостатком такого построения электромагнитного экрана является

ся достижение минимальных коэффициентов отражения при нормальном падении электромагнитной волны на экран.

Коэффициенты отражения таких экранов значительно возрастают с ростом угла падения электромагнитной волны на экран (относительно нормали к поверхности экрана), рис. 7. Следует учитывать, что коэффициенты отражения зависят как от параметра Z , так и от частоты падающей электромагнитной волны рис. 8.

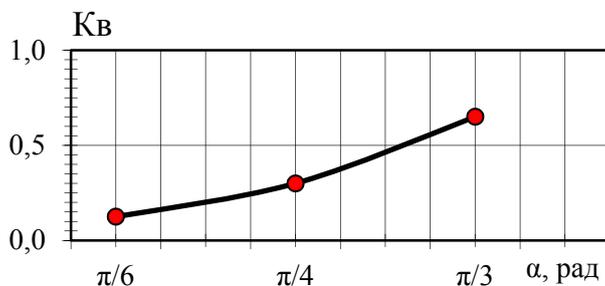


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от угла падения электромагнитной волны на поверхность экрана ($\nu = 30$ МГц)

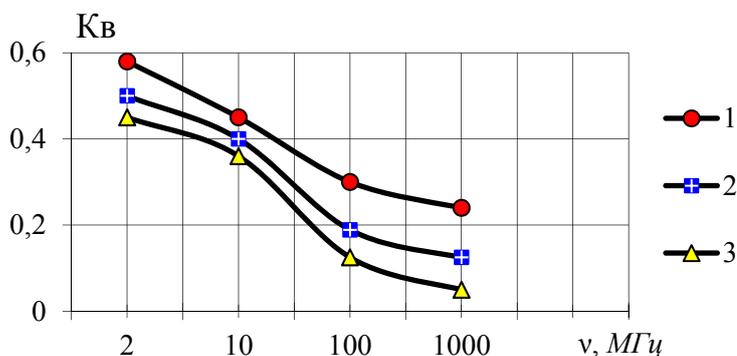


Рис. 8. Зависимость коэффициентов отражения электромагнитного поля от частоты экранированного электромагнитного поля: графики 1, 2, 3 соответствуют значениям Z – 2; 1; 0,5

Использование слоистых электромагнитных экранов [3, 7], с учётом приведённых выше соотношений, имеют как преимущества, так и недостатки. Использование тонкослойных экранов на основе ферритов с высокой магнитной проницаемостью имеет преимущества: малая толщина и незначительная зависимость экранирующих свойств от частоты. Недостатком является теоретическая ограниченность рабочего диапазона низких частот. Избрание этих параметров для конкретной трудоохранной задачи целесообразно с учётом графического материала, приведённого выше.

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

Проведённые экспериментальные исследования и теоретические расчёты позволяют выбрать защитный материал для изготовления электромагнитного экрана в зависимости от частоты и амплитуды экранированного электромагнитного поля. Они позволяют выбрать технические характеристики материала (с необходимыми коэффициентами поглощения и отражения) в зависимости от целей экранирующих мероприятий, а также выбрать геометрические параметры электромагнитного экрана, исходя из разработанных критериев.

Выводы

1. Из электротехнических сталей наиболее эффективными материалами для электромагнитных экранов являются стали класса 2011. В низкочастотной области наибольшие коэффициенты экранирования (Ke от 9 до 10) достигаются на частотах 6-7 $кГц$, в высокочастотной области (Ke от 55 до 60) – на частотах 160-3000 $МГц$.

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

3. Наиболее эффективными материалами для металлических экранов являются магнитомягкие аморфные сплавы ($Ke = 1000-400$) при изменении индукции внешнего магнитного поля от 5-100 $мкТл$ при индукции поля от 200 до 100 $мкТл$ коэффициенты экранирования практически стабильны на уровне $Ke = 500$. Защитные свойства аморфных магнитомягких сплавов значительно увеличиваются после термомагнитной обработки (до 30 %). Такая обработка обеспечивает управляемость защитных свойств этих материалов.

4. Наиболее эффективными и перспективными материалами для изготовления электромагнитных экранов являются **композитные металлополимерные материалы**. Их преимуществом является управляемость защитных свойств изменением содержания металлической субстанции полимерной матрицы (от 10 до 70 $дБ$). Значительное повышение коэффициента экранирования происходит при концентрации металлической субстанции до 10-12 весовых процентов. Преимуществом таких электромагнитных экранов являются малые коэффициенты отражения (до 0,3). **Эластичные** композитные материалы толщиной от 5 $мм$ и концентрации металлической субстанции 30-35 % обеспечивают резкий рост коэффициента экранирования (от 40 до 60 $дБ$). Коэффициенты отражения не превышают 0,16-0,17.

5. Композитные электромагнитные экраны с управляемыми защитными свойствами наиболее приемлемы для снижения негативного влияния электромагнитных полей на персонал за счёт обеспечения стабильного функционирования используемых технических средств. Разработанный математический аппарат позволяет рассчитать параметры защитного экрана в зависимости от амплитудных и частотных характеристик экранированных полей.

6. Наиболее перспективным материалом для защиты от электромагнитных полей и излучений являются материалы из металлосодержащих шнуров. Основным их преимуществом является стабильность защитных свойств (20-30 $дБ$) в широком частотном диапазоне (от 50 $Гц$ до 160 $МГц$).

Литература

1. *Glyva V.A., Panova E.V.* Method of electromagnetic screen shielding properties determination // Science y military. 2013. № 2.
2. *Аполлонский С.М., Логинова И.Д.* Построение моделирующих устройств для исследования внешних электрических полей источников // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 2009. № 1. С. 104-110.
3. *Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А.* Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн // Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина. 2003. <http://www.bnti.ru>.
4. *Волохов С.А., Добродеев П.Н.* Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудований // Электротехника. 2006. № 4. С. 28-33.
7. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П. и др.* Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения. Мн., 2000. 284 с.
8. *Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько П.В., Украинец Е.А., Колбун Н.В.* Широкодиапазонные экраны СМЧ для систем защиты информации и защиты биологических объектов // Докл. НАН Беларуси, Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники. 2004. № 3. С. 152-167.
9. *Ерофеев В.Т., Чушкевич Г.Ч., Грабчиков С.С., Бондаренко В.Ф.* Модель экранирования постоянных магнитных полей многослойным цилиндрическим экраном // ННЦ НАН Беларуси по материаловедению. Минск. 2012. № 3. С. 80-93.