

**Д.Н. ШАПИРО**



# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ**



**«ЭНЕРГИЯ»**

*Выпуск 58*

Д. Н. ШАПИРО

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ



«ЭНЕРГИЯ»

Ленинградское отделение 1975

6Ф2

Ш 23

УДК 621.318.3.01

Шапиро Д. Н.

**Ш23** Основы теории электромагнитного экранирования. Л., «Энергия», 1975 г.

112 с. с ил. (Б-ка по радиоэлектронике. Вып. 58).

В книге описываются основные физические процессы, происходящие в электромагнитных экранах и определяющие их экранирующее действие. Рассматривается зависимость эффективности экранирования от размеров экрана, от материала и толщины стенок и от частоты. Большое внимание уделяется влиянию, оказываемому на эффективность экранирования отверстиями и щелями в экранах. Даются расчетные формулы и практические рекомендации по проектированию экранов.

Книга рассчитана на широкие круги инженерно-технических работников в области радиоэлектроники и электросвязи, а также на преподавателей и студентов соответствующих высших учебных заведений.

Ш  $\frac{30404-143}{051(01)-75}$  327-75

6Ф2

Рецензент Л. М. Кононович

Ш  $\frac{30404-143}{051(01)-75}$  327-75

© Издательство «Энергия», 1975

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электромагнитные экраны широко используются в современной электротехнике и, в первую очередь, в технике электросвязи. Они являются: средством ослабления вредных влияний одних элементов данного аппарата или прибора на другие его элементы; средством защиты различных аппаратов и приборов в целом от воздействия электромагнитных полей, создаваемых посторонними устройствами; средством подавления промышленных радиопомех у источников их возникновения, т. е. средством локализации высокочастотных полей, создаваемых различного рода электроустройствами, не предназначенными для целей излучения электромагнитной энергии; средством защиты обслуживающего персонала от электромагнитных полей, создаваемых мощными высокочастотными генераторами. Они используются для создания производственных и лабораторных помещений, защищенных от посторонних электромагнитных влияний, в которых можно разрабатывать, налаживать и испытывать высокочувствительные приемные устройства различного назначения.

Из сказанного следует, что все специалисты, занимающиеся проектированием и изготовлением аппаратуры связи, должны быть знакомы с принципом действия электромагнитных экранов, с основными правилами их конструирования, с порядком эффективности, которую они могут обеспечить, и с возможной реакцией их на источники поля и защищаемые объекты. Вместе с тем, в выс-

ших учебных заведениях этим вопросам почти не уделяется внимания, а очень малочисленная специальная литература или слишком сложна [1, 2, 3], или слишком популярна [4, 5, 6], чтобы служить хорошим пособием для широких кругов инженеров, сталкивающихся с этими вопросами на практике.

Настоящая книга имеет целью восполнить указанный пробел и помочь инженерам, у которых возникает такая необходимость, овладеть основами теории электромагнитного экранирования.

Чтобы сократить объем книги и сосредоточить внимание читателя на существе основных физических процессов, не отвлекать его громоздкими математическими преобразованиями, большая часть расчетных формул дана без выводов.

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

*Автор*

## Глава первая

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНАХ

#### 1. Определение термина «электромагнитный экран»

Электромагнитными экранами называют конструкции, предназначенные для ослабления электромагнитных полей, создаваемых какими-либо источниками в некоторой области пространства, не содержащей этих источников. В подавляющем большинстве случаев электромагнитные экраны делаются из металла: меди, алюминия, стали. Однако для защиты от постоянных и очень низкочастотных магнитных полей в настоящее время иногда применяют и ферриты. В данной книге рассматриваются только металлические экраны. Если металлическая конструкция не предназначена специально для экранирования, но попутно с выполнением своих основных функций решает и эту задачу, то говорят, что она работает как экран, служит экраном и т. п.

В практике и литературе часто противопоставляют друг другу понятия «электростатический экран», «магнитостатический экран» и «электромагнитный экран». Такое противопоставление вряд ли уместно: подобно тому как электростатическое и магнитостатическое поля являются частными случаями электромагнитного поля, электростатический и магнитостатический экраны являются частными видами электромагнитного экрана. Более детально этот вопрос рассматривается в § 4 и в гл. 3 и 4.

#### 2. Принцип действия электромагнитного экрана

На вопрос о принципе действия электромагнитного экрана можно дать два ответа, которые внешне отличаются друг от друга, но в сущности одинаковы.

Первый ответ формулируется следующим образом. Под действием первичного поля (поля источников) на поверхности экрана индуцируются заряды, а в его толще — токи и магнитная поляризация. Эти заряды, токи и поляризация создают вторичное поле (точнее, с ними связано вторичное поле). От сложения вторичного поля с первичным образуется результирующее поле, которое в защищаемой области пространства оказывается слабее первичного.

Второй ответ гласит: принцип действия электромагнитного экрана состоит в том, что, отражая и направляя поток электромагнитной энергии, создаваемый источниками поля, экран отводит его от защищаемой области пространства, не допускает в эту область.

Первый ответ проще, так как понятие об индуцированных зарядах, токах и связанных с ними вторичных полях хорошо знакомо практически каждому специалисту электрику. Кроме того, этот ответ позволяет рассматривать работу экрана при любых частотах, включая частоту, равную нулю. Недостаток этого ответа — некоторая физическая небезупречность.

Действительно, в области пространства, где напряженность поля отлична от нуля, существует некоторый запас энергии. Можно говорить о наложении и взаимной компенсации полей, но нельзя говорить о наложении и взаимной компенсации запасов энергии. Поле в некоторой области может не возникнуть, если электромагнитная энергия в эту область не допущена; оно может стать слабее или вовсе исчезнуть, если запас энергии частично или полностью изъят из этой области.

Второй ответ с указанной точки зрения более правилен. Однако непосредственное представление об отражении и направлении потоков электромагнитной энергии для большинства специалистов менее привычно. Кроме того, такое представление неприменимо в статических случаях и вынуждает нас рассматривать процесс установления статического режима.

Единое существо обоих ответов ясно из того, что самый механизм отражающего и направляющего действия металлических конструкций на потоки электромагнитной энергии неразрывно связан с возникновением на поверхности и в толще этих конструкций зарядов, токов и магнитной поляризации.

Наиболее целесообразно и вполне законно, применяясь к конкретным условиям задачи и к целям анализа, использовать то или иное из двух рассмотренных представлений.

### 3. Количественная оценка эффективности экрана

Количественно эффективность электромагнитного экрана или, что то же самое, эффективность экранирования можно характеризовать отношением напряженностей поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана ( $E_0$  или  $H_0$ ) и при наличии его ( $E$  или  $H$ ). Ниже мы будем обозначать это отношение буквой  $\mathcal{E}$ .

$$\mathcal{E} = \frac{E_0}{E} \text{ или } \mathcal{E} = \frac{H_0}{H}. \quad (1)$$

Величина  $\mathcal{E}$  может быть выражена в простых отношениях или децибелах.

В общем случае экран не только ослабляет, но и искажает в большей или меньшей степени поле источника в защищаемой области пространства. Поэтому его эффективность, определенная указанным выше способом, оказывается различной для электрической и магнитной составляющих поля и зависит от координат точки измерения. Это обстоятельство существенно затрудняет ее количественную оценку.

Только в простейших случаях эффективность экрана определяется однозначно. К таким случаям относятся: экранирование полупространства от плоской электромагнитной волны бесконечным плоским однородным экраном; экранирование однородным шаровым экраном точечного источника, расположенного в его центре; экранирование однородным бесконечно протяженным цилиндрическим экраном линейного источника, лежащего на его оси. В теории электромагнитного экранирования рассматриваются в первую очередь именно такие случаи, а реальные случаи сводятся к ним путем большей или меньшей идеализации. Естественно, что при этом в соответствующей степени страдает точность оценки.

В особо сложных случаях приходится прибегать при оценке эффективности экрана к ряду условностей, например, определять ее для области защищаемого пространства, лежащей на достаточно большом расстоянии



от экрана, для худшей точки этой области, для худшего из возможных расположений источника поля. В таких случаях точность оценки еще более снижается и можно с уверенностью судить на основании расчетов лишь о порядке наименьшей возможной эффективности.

#### **4. Зависимость эффективности экрана от характера источника поля; виды экранов**

Эффективность экрана существенно зависит от характера источника поля. Разнообразие возможных источников бесконечно; однако любой реальный источник может быть с необходимой степенью точности представлен в виде более или менее сложной совокупности электрических диполей и витков (рамок) с током (магнитных диполей). В основе различия поведения экрана по отношению к разным реальным источникам лежит различие в его поведении по отношению к электрическому и магнитному диполям. Последнее различие является следствием разной структуры полей этих двух источников.

В свободном пространстве при

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (2)$$

где  $r$  — расстояние от источника, а  $\lambda$  — длина волны, различие в структурах полей обоих источников стирается: в любой точке пространства  $E$  и  $H$  практически синфазны, а их отношение оказывается почти таким же, как в плоской волне, т. е.

$$E/H = 120\pi, \text{ Ом.} \quad (3)$$

При

$$r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4)$$

$E$  и  $H$  оказываются почти в квадратуре, а их отношение зависит от положения точки наблюдения. В экваториальной плоскости (плоскости, проходящей через центр диполя перпендикулярно его оси) оно приближенно определяется следующими формулами: для электрического диполя

$$\frac{E}{H} = 120\pi \frac{\lambda}{2\pi r}; \quad (5)$$

для магнитного диполя

$$\frac{E}{H} = 120\pi \frac{2\pi r}{\lambda}. \quad (6)$$

Таким образом, с уменьшением  $r$  или с увеличением  $\lambda$  (с уменьшением частоты  $f$ ) отношение  $E$  к  $H$  в случае электрического диполя растет, роль магнитной составляющей убывает, и оказывается возможным рассматривать поле как квазиелектростатическое. При  $f = 0$  поле оказывается электростатическим. В случае магнитного диполя отношение  $E$  к  $H$  уменьшается, убывает роль электрической составляющей и появляется возможность рассматривать поле как квазимагнитостатическое. При  $f = 0$  поле оказывается магнитостатическим.

Если экран обеспечивает требуемое ослабление электростатического (или квазиелектростатического) поля, но практически не ослабляет магнитостатического (или квазимагнитостатического) поля, то его называют электростатическим. Такие экраны используются, например, когда надо устранить емкостную связь между двумя катушками, сохранив между ними индуктивную связь.

Если экран должен существенно ослаблять магнитостатическое (или квазимагнитостатическое) поле, то его называют магнитостатическим. При этом редко интересуются тем, способен ли этот экран ослаблять также и электростатическое поле. В очень многих, если не в большинстве случаев, эффективность такого экрана по отношению к электростатическому полю значительно выше, чем по отношению к магнитостатическому.

В том случае, когда рассмотрение поля как квазистатического может привести к грубым ошибкам в оценке эффективности экранирования, экран называют электромагнитным. Хороший электромагнитный экран может оказаться, и в большинстве случаев оказывается, плохим магнитостатическим экраном, но очень хорошим электростатическим экраном. Иначе говоря, при стремлении частоты к нулю эффективность электромагнитного экрана по отношению к полю магнитного диполя может стремиться к единице, а по отношению к полю электрического диполя — беспредельно возрастать.

## **5. Резонансные явления при экранировании**

Любой электромагнитный экран, будь то простой металлический лист, металлическая оболочка кабеля, металлическая коробка, закрывающая источник поля или защищаемую область пространства, или какая-либо другая металлическая конструкция, может рассматриваться как система с распределенными постоянными, обладающая рядом собственных частот. Когда частота электромагнитного поля, которое необходимо ослабить, приближается к одной из собственных частот экрана и становится равной ей, эффективность экранирования резко уменьшается. Не исключена возможность, что в результате резонансных явлений неудачный по конструкции экран не только не ослабит, а даже усилит поле в защищаемой области пространства.

Экранирующая оболочка кабеля может оказаться настроенным отрезком длинной линии. Экран-коробка может оказаться настроенным полым резонатором. Отверстия и щели в экране могут оказаться эффективными щелевыми антеннами. Об этом необходимо помнить при проектировании и, если возможно возникновение нежелательных резонансных явлений, принимать эффективные меры борьбы с ними: следить за тем, чтобы размеры отверстий и щелей были много меньше наименьшей из длин волн рабочего диапазона; увеличивать, если нужно, толщину стенок экрана; более часто заземлять экранирующие оболочки кабелей и т. п.

## **6. Обратимость экрана**

Электромагнитный экран — система линейная; отсюда следует, что для него справедлив принцип взаимности перемещений. Сказанное, в частности, означает, что эффективность экрана-коробки сохраняется одной и той же, независимо от того, расположен ли внутри него источник поля или защищаемая область пространства. Это положение имеет большое практическое значение, так как при изучении эффективности экранирования позволяет ограничиться случаем расположения источника поля внутри экрана.

Необходимо, однако, избегать неправильного истолкования этого положения. Чтобы стало ясно, о какой возможной ошибке идет речь, обратимся к рис. 1.

На рис. 1, *а* электрический диполь, расположенный внутри шарового экрана, возбуждается источником задающего переменного напряжения  $U$ , имеющим нулевое внутреннее сопротивление. Индикатором поля служит виток (рамка) с включенным в него микроамперметром.

Согласно теореме о взаимности перемещений показания микроамперметра не изменяются, если поменять его и источник  $U$  местами, как показано на рис. 1, *б*. Так как это утверждение сохраняет силу и при отсутствии экрана, то можно заключить, что эффективность экрана в случае, показанном на рис. 1, *а* (источник поля внутри экрана), и в случае, показанном на рис. 1, *б* (источник поля вне экрана), одна и та же.

Однако если вынести из экрана не только источник  $U$ , но и диполь, и внести в него не только микроамперметр, но и виток, как показано на рис. 1, *в*, то показания микроамперметра изменятся. Следовательно, эффективность экрана в случаях, показанных на рис. 1, *а* и 1, *в*, различна.

Причина указанного различия не в том, что в первом случае источник поля находится внутри, а во втором случае — вне экрана, а в том, что в первом случае внутри экрана расположен электрический диполь, а во втором — виток (потенциальный магнитный диполь).

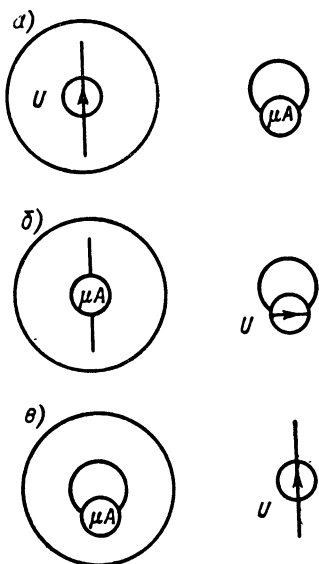


Рис. 1. Иллюстрация к теореме об обратимости экрана

## 7. Реакция экрана на источник электромагнитного поля и защищаемый объект

Одновременно с выполнением своей основной функции электромагнитный экран может оказывать более или менее сильное нежелательное воздействие на источник

поля и защищаемый объект (т. е. объект, расположенный в защищаемой области пространства). Так, в частности, экран-коробка, закрывающая катушку колебательного контура (независимо от того, является ли эта катушка источником поля или защищаемым объектом), несколько изменяет индуктивность этой катушки и уменьшает ее добротность.

Между эффективностью экрана и степенью оказываемого им нежелательного воздействия нет прямой зависимости. Например, если экранировать катушку с высокочастотным током шаровым экраном, то с увеличением радиуса этого экрана эффективность экранирования будет возрастать, а потери в экране — уменьшаться, т. е. будет уменьшаться влияние экрана на добротность катушки. Но если заменить латунный или алюминиевый экран стальным той же толщины, то эффективность экранирования тоже возрастет, но и потери сильно возрастут — добротность катушки уменьшится.

Правильным выбором материала, размеров и конструкции экрана его нежелательные побочные действия могут быть ослаблены до допустимых значений.

## Глава вторая

### **ЭКРАНИРОВАНИЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВА ОТ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ БЕСКОНЕЧНЫМ ПЛОСКИМ ЭКРАНОМ**

#### **8. Отражение плоской электромагнитной волны от плоской проводящей поверхности**

Изучение работы электромагнитных экранов удобно начать с гипотетического случая экранирования полупространства от плоской электромагнитной волны бесконечным плоским однородным экраном. При этом легко раскрывается физическая сущность основных явлений, очень просто выводятся некоторые важные формулы, а эффективность такого экрана входит сомножителем в выражения для эффективности шаровых и цилиндрических экранов.

Прежде чем исследовать эффективность бесконечного плоского экрана, рассмотрим, что происходит при от-

весном падении плоской электромагнитной волны на плоскую поверхность раздела двух сред — свободного пространства и металла.

Уравнения плоской моногармонической электромагнитной волны с частотой  $\omega$ , распространяющейся вдоль оси  $x$  в положительном направлении в однородной безгистерезисной среде с абсолютными магнитной и диэлектрической проницаемостями  $\mu_a$  и  $\epsilon_a$  и удельной проводимостью  $\sigma$ , имеют вид:

$$\frac{d\dot{E}}{dx} = -j\omega\mu_a\dot{H}; \quad \frac{d\dot{H}}{dx} = -j\omega\epsilon'\dot{E}, \quad (7)$$

где

$$\epsilon' = \epsilon_a + \frac{\sigma}{j\omega}. \quad (8)$$

Эти уравнения совершенно аналогичны уравнениям распространения колебания частоты  $\omega$  вдоль однородной длинной линии:

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = -Z\dot{I}; \quad \frac{d\dot{I}}{dx} = -Y\dot{U}, \quad (9)$$

где  $Z$  и  $Y$  комплексное сопротивление и проводимость 1 м линии.

Поэтому так же, как для длинной линии, для однородного пространства по отношению к плоской волне можно ввести в рассмотрение коэффициент распространения

$$\gamma = \sqrt{ZY} = j\omega \sqrt{\mu_a\epsilon'} \quad (10)$$

и характеристическое сопротивление

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon'}}. \quad (11)$$

Для свободного пространства  $Z_0 = 120 \pi$  Ом [см. формулу (3)].

Задача о явлениях, возникающих при падении плоской электромагнитной волны на бесконечную плоскость, разделяющую две различные однородные бесконечно протяженные среды и расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, сводится, таким образом, к задаче о явлениях при падении волны на стык

двух бесконечно протяженных (от места стыка) длинных линий с характеристическими сопротивлениями  $Z_{01}$  и  $Z_{02}$  (рис. 2).

Известно, что волна частично отражается от стыка, частично же проникает во вторую линию. Рассмотрим сначала отражение.

Если обозначить через  $\dot{U}_1^+$ ,  $\dot{I}_1^+$  напряжение и ток падающей волны (в месте стыка), а через  $\dot{U}_1^-$ ,  $\dot{I}_1^-$  напряжение и ток отраженной волны и принять условно поло-

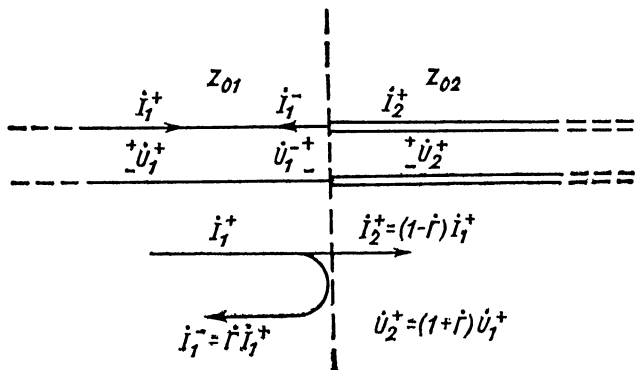


Рис. 2. Отражение электромагнитной волны от стыка двух длинных линий

жительные направления, показанные на рис. 2, то можно написать

$$\dot{U}_1^- = \dot{\Gamma} \dot{U}_1^+; \quad \dot{I}_1^- = \dot{\Gamma} \dot{I}_1^+, \quad (12)$$

где  $\dot{\Gamma}$  — коэффициент отражения, который определяется формулой:

$$\dot{\Gamma} = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}}. \quad (13)$$

Для отражения плоской волны от плоской поверхности раздела двух сред (рис. 3) по аналогии с (12) можно написать:

$$\dot{E}_1^- = \dot{\Gamma} \dot{E}_1^+; \quad \dot{H}_1^- = \dot{\Gamma} \dot{H}_1^+. \quad (14)$$

Коэффициент отражения и в этом случае определяется формулой (13).  $\dot{P}_1^+$ ,  $\dot{P}_1^-$  и  $\dot{P}_2^+$  на рис. 3 представляют собою векторы Умова—Пойнтинга соответственно

падающей, отраженной и проникшей во вторую среду волн.

Векторы поля, проникшего во вторую среду, определяются (у поверхности раздела) формулами:

$$\dot{E}_2^+ = (1 + \dot{\Gamma}) \dot{E}_1^+; \quad \dot{H}_2^+ = (1 - \dot{\Gamma}) \dot{H}_1^+. \quad (15)$$

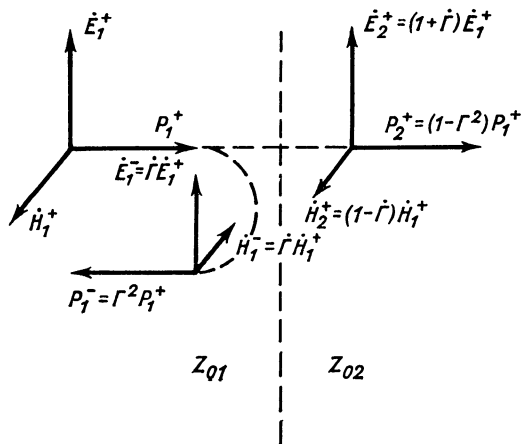


Рис. 3. Отражение плоской волны от плоской границы двух сред

Из формул (15) и (13) легко получить:

$$\frac{\dot{E}_2^+}{\dot{H}_2^+} = \frac{\dot{E}_1^+}{\dot{H}_1^+} \frac{Z_{02}}{Z_{01}}. \quad (16)$$

А так как для первой среды по аналогии с длинной линией

$$\frac{\dot{E}_1^+}{\dot{H}_1^+} = Z_{01}, \quad (17)$$

то, как и следовало ожидать, для второй среды

$$\frac{\dot{E}_2^+}{\dot{H}_2^+} = Z_{02}. \quad (18)$$

Будем интересоваться, как сказано ранее, случаем, когда одна из сред — свободное пространство, а вто-



рая — металл. Для металлов, как для свободного пространства,

$$\varepsilon_a = \frac{10^{-9}}{36\pi}, \quad \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

Значения удельной проводимости  $\sigma$ , См/м, для трех металлов, представляющих наибольший интерес в качестве материалов для экранов, приведены ниже:

Медь . . . . .	$5,9 \cdot 10^7$
Алюминий . . . . .	$3,6 \cdot 10^7$
Сталь . . . . .	$1,0 \cdot 10^7$

Даже для стали, имеющей самую малую проводимость, и даже для такой высокой частоты, как 1000 ГГц, имеем:

$$\frac{\sigma}{\omega} = \frac{10^{-5}}{2\pi}.$$

Это отношение более чем на пять порядков превышает  $\varepsilon_a$ . Следовательно, с очень большой точностью можно считать для металлов на всех интересующих нас частотах

$$\varepsilon' = \frac{\sigma}{j\omega}. \quad (19)$$

Из формулы (11) далее следует, что характеристическое сопротивление металлов при тех значениях относительной магнитной проницаемости ( $\mu \leq 10^4$ ) и на тех частотах ( $f < 10^{12}$  Гц), которые нас могут интересовать, много меньше, чем характеристическое сопротивление свободного пространства. Поэтому коэффициент отражения от плоскости раздела свободного пространства и металла очень близок к единице.

## 9. Проникновение плоской электромагнитной волны в толщу проводника; поверхностный слой

Обратимся к волне, проникшей во вторую среду — металл.

Приняв для поверхности раздела  $x = 0$ , сможем написать для этой волны в плоскости с координатой  $x$ :

$$E_{2x}^+ = E_2^+ e^{-\gamma x}; \quad H_{2x}^+ = H_2^+ e^{-\gamma x}, \quad (20)$$

Из (10) и (19) следует, что

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu_a\sigma} = \frac{1+j}{\delta}, \quad (21)$$

где

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_a \sigma}}. \quad (22)$$

Нетрудно увидеть, что  $\delta$  представляет собою дистанцию, при распространении на которую электромагнитная волна (векторы  $\vec{E}_{2x}^+$  и  $\vec{H}_{2x}^+$ ) ослабевает в  $e$  раз и получает поворот по фазе (отстает) на  $\pi/2$ . Эту дистанцию принято называть толщиной поверхностного слоя.

Обратим внимание на то, что с понятием о толщине поверхностного слоя приходится сталкиваться также при изучении распределения плотности переменного тока по поверхности сечения различных проводников. В сущности физические процессы при этом те же, что в рассматриваемом нами случае плоской волны: электромагнитная энергия, распространяясь в диэлектрической среде вдоль проводника, частично проникает в проводник.

По мере углубления в толщу проводника поле ослабевает. Однако дистанция, на которой напряженность поля и соответственно плотность тока уменьшаются в  $e$  раз, отличается от величины  $\delta$ , определенной по формуле (22). Так, в случае цилиндрического провода, по мере проникновения поля от поверхности к оси происходит концентрация энергии из-за уменьшения радиуса; вследствие этой концентрации ослабление поля в  $e$  раз происходит на дистанции, несколько превышающей  $\delta$ . Впрочем, если радиус провода много больше  $\delta$ , то различие практически несущественно.

Так как  $\mu_a$  и  $\sigma$  зависят только от свойств рассматриваемой проводящей среды, то формуле (22) можно придать следующий удобный для практики вид:

$$\delta = \frac{A}{\sqrt{f}}. \quad (23)$$

Значения  $A$ , м·Гц<sup>1/2</sup>, для меди, алюминия и стали приведены ниже (предполагается, что относительная магнитная проницаемость стали  $\mu = 100$ ):

Медь . . . . .	$6,6 \cdot 10^{-2}$
Алюминий . . . . .	$8,4 \cdot 10^{-2}$
Сталь . . . . .	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Обращает на себя внимание то, что у стали коэффициент  $A$ , а следовательно, и толщина поверхностного слоя много меньше, чем у меди и алюминия. Это результат большой магнитной проницаемости.

## 10. Эффективность бесконечного однородного плоского экрана. Расчетные формулы

На рис. 4 представлен в разрезе бесконечный однородный плоский экран толщиной  $d$ . Слева на поверхность  $1-1$  этого экрана перпендикулярно к ней падает плоская электромагнитная волна.  $\dot{E}_1^+$  — электрическая составляющая этой волны на поверхности  $1-1$ . Все стрелки указывают направление движения потоков энергии.

Основная масса энергии отражается от поверхности  $1-1$ , но некоторая ее часть проникает в толщу экрана. Электрическая составляющая отраженного поля равна  $\dot{G}_1 \dot{E}_1^+$ , а электрическая составляющая поля, проникшего в толщу экрана, —  $(1 + \dot{G}_1) \dot{E}_1^+$ .

В толще экрана плоская волна движется от поверхности  $1-1$  к поверхности  $2-2$ . У этой поверхности ее электрическая составляющая оказывается равной  $(1 + \dot{G}_1) \dot{E}_1^+ e^{-\gamma d}$ .

От поверхности  $2-2$  опять происходит отражение. Коэффициент отражения при этом равен  $\dot{G}_2$ . Так как за экраном вновь следует свободное пространство, то, как нетрудно заключить из (13),  $\dot{G}_2 = -\dot{G}_1$ .

Электрические составляющие волны, отраженной от  $2-2$ , и волны, проникшей через эту поверхность за экран, соответственно равны:  $\dot{G}_2 (1 + \dot{G}_1) \dot{E}_1^+ e^{-\gamma d}$  и  $(1 + \dot{G}_2) (1 + \dot{G}_1) \dot{E}_1^+ e^{-\gamma d}$ .

Отраженная волна достигает поверхности  $1-1$ , где ее электрическая составляющая оказывается равной  $\dot{G}_2 (1 + \dot{G}_1) \dot{E}_1^+ e^{-2\gamma d}$ . Здесь она опять отражается, после чего вновь движется вправо, причем коэффициент

отражения опять равен  $\dot{\Gamma}_2$ . Небольшая часть энергии возвращается в пространство слева от экрана.

В итоге бесконечной последовательности отражений и проникновений потока энергии из толщи экрана в левую и правую половину свободного пространства образуется множество волн, суммы которых представляют

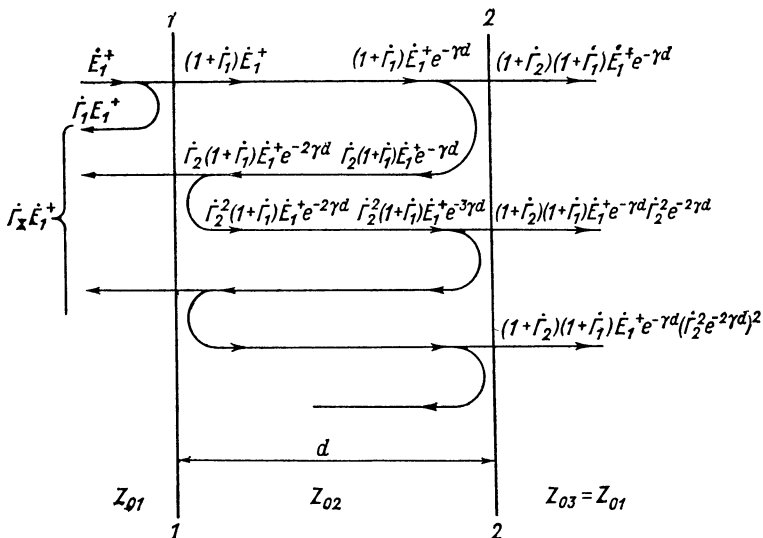


Рис. 4. Экранирование полупространства плоским экраном

собой результирующую волну, отраженную от экрана, и результирующую волну, проникшую сквозь экран.

Легко убедиться в том, что электрическая составляющая результирующей волны, проникшей сквозь экран, у поверхности 2—2 может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{3\Sigma}^+ = (1 + \dot{\Gamma}_2)(1 + \dot{\Gamma}_1) \dot{E}_1^+ e^{-\gamma d} [1 + \dot{\Gamma}_2^2 e^{-2\gamma d} + (\dot{\Gamma}_2^2 e^{-2\gamma d})^2 + \\ + (\dot{\Gamma}_2^2 e^{-2\gamma d})^3 + \dots] . \end{aligned} \quad (24)$$

Так как вещественная составляющая  $\gamma$  согласно (21) положительна (т. е. по мере движения в толще экрана волна затухает), то сумма членов геометрической прогрессии в правой части (24) равна

$$\frac{1}{1 - \dot{\Gamma}_2^2 e^{-2\gamma d}} .$$

Воспользовавшись этим и учтя, что  $\dot{r}_2 = -\dot{r}_1$ , причем с очень большой степенью точности  $\dot{r}_1 = -1$ , можно переписать (24) в виде:

$$\dot{E}_{3\Sigma}^+ = \dot{E}_1^+ \frac{1 - \dot{r}_1^2}{2 \operatorname{sh} \gamma d}. \quad (25)$$

С помощью (13) легко получить:

$$1 - \dot{r}_1^2 = \frac{4Z_{01}Z_{02}}{(Z_{01} + Z_{02})^2}. \quad (26)$$

Вследствие того что  $Z_{01} \gg Z_{02}$ , можно с большой степенью точности принять вместо (26)

$$1 - \dot{r}_1^2 = \frac{4Z_{02}}{Z_{01}}. \quad (27)$$

Но первая среда в нашем случае — свободное пространство; поэтому  $Z_{01} = 120 \pi$  Ом. Воспользовавшись этим и формулами (11), (19) и (22), чтобы выразить  $Z_{02}$ , легко преобразовать (27) в формулу:

$$1 - \dot{r}_1^2 = \frac{1}{30\pi} \sqrt{\frac{j\omega\mu_{a2}}{\sigma_2}} = \frac{1+j}{30\pi\sigma_2\delta_2}, \quad (28)$$

где  $\delta_2$  — толщина поверхностного слоя для материала экрана.

Подставив (28) в (25), учтя (21) и опустив для упрощения записи индексы 2 при  $\sigma$  и  $\delta$ , получим:

$$\dot{E}_{3\Sigma}^+ = \dot{E}_1^+ \frac{(1+j) \frac{d}{\delta}}{60\pi\sigma d \operatorname{sh} \left[ (1+j) \frac{d}{\delta} \right]}. \quad (29)$$

Из последнего выражения непосредственно вытекает, что эффективность рассматриваемого экрана определяется формулой:

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = 60\pi\sigma d \left| \frac{\operatorname{sh} \left[ (1+j) \frac{d}{\delta} \right]}{(1+j) \frac{d}{\delta}} \right|. \quad (30)$$

Для практических расчетов удобно пользоваться следующими приближенными выражениями:

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = 60\pi\sigma d \times \begin{cases} 1 & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \frac{\delta}{2\sqrt{2}d} e^{\frac{d}{\delta}} & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (31)$$

# **11. Отражение электромагнитной волны от поверхности экрана и ослабление ее при проникновении сквозь толщину стенки**

Величину  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  можно рассматривать как произведение двух сомножителей:

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = \mathcal{E}_{\text{пл. отр}} \mathcal{E}_{\text{пл. осл}}. \quad (32)$$

Первый из этих сомножителей характеризует эффективность отражения первичной падающей волны электрического поля от поверхности  $I—I$  экрана. Численно он равен модулю отношения  $\vec{E}_1^+$  к  $\vec{E}_{2\Sigma}$  — результирующей электрической составляющей поля в толще стенки экрана у поверхности  $I—I$ . Последняя равна сумме электрических составляющих всех волн, движущихся от  $I—I$  вправо и падающих на эту поверхность справа.

Путем преобразований, аналогичных выполненным в § 10, можно показать, что

$$\mathcal{E}_{\text{пл. отр}} = 60\pi\sigma d \left| \frac{\text{th} \left[ (1+j) \frac{d}{\delta} \right]}{(1+j) \frac{d}{\delta}} \right| \quad (33)$$

или приближенно

$$\mathcal{E}_{\text{пл. отр}} = 60\pi\sigma \times \begin{cases} d & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \delta & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (34)$$

Из последних формул видно, что с увеличением толщины экрана  $\mathcal{E}_{\text{пл. отр}}$  сначала растет, а потом почти

не меняется. Это и понятно, так как при  $d > \delta$  явления на поверхности 1—1 практически перестают зависеть от  $d$ .

Более интересна частотная зависимость. С повышением частоты эффективность отражения сначала сохраняется неизменной, потом начинает уменьшаться и при  $d > \delta$  оказывается практически обратно пропорциональной  $\sqrt{f}$ . Причина в том, что из-за поверхностного эффекта возрастает поверхностное сопротивление экрана.

Второй сомножитель правой части (32) характеризует степень ослабления электрической составляющей при проникновении поля сквозь толщу стенки экрана. Численно он равен модулю отношения  $\dot{E}_{2\Sigma}$  к  $\dot{E}_{3\Sigma}^+$ .

Из (30) и (33) следует, что

$$\mathcal{E}_{\text{пл. осл}} = \left| \operatorname{ch} \left[ (1 + j) \frac{d}{\delta} \right] \right| \quad (35)$$

или приближенно

$$\mathcal{E}_{\text{пл. осл}} = \begin{cases} 1 & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \frac{1}{2} e^{\frac{d}{\delta}} & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (36)$$

Последний результат тоже вполне понятен. Действительно, если толщина экрана много меньше толщины поверхностного слоя, то практически никакого ослабления электрической составляющей при проникновении сквозь толщу стенки не происходит. Если же толщина экрана достаточно велика, то это ослабление весьма зна-

чительно, но оно вдвое меньше, чем  $e^{\frac{d}{\delta}}$ , так как при отражении от поверхности 2—2 электрическая составляющая поля удваивается (вследствие того, что  $\dot{G}_2 = 1$ ).

Представление (32) наглядно и полезно. Обратим, однако, внимание на условность определения участвующих в нем величин  $\mathcal{E}_{\text{пл. отр}}$  и  $\mathcal{E}_{\text{пл. осл}}$ . Эти величины не отражают энергетики процесса экранирования. Если определить  $\mathcal{E}_{\text{пл. отр}}^2$  как отношение мощности первичной падающей волны (на единицу поверхности) к мощ-

ности результирующей волны, проникающей за поверхность  $I-I$  в толщу экрана, то получим:

$$\mathcal{E}_{\text{пл. отр. } P}^2 = 30\pi\sigma \times \begin{cases} d & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \delta & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (37)$$

Соответственно, определив  $\mathcal{E}_{\text{пл. осл. } P}^2$  как отношение мощности результирующей волны, проникающей за поверхность  $I-I$ , к мощности волны, прошедшей сквозь экран, получим:

$$\mathcal{E}_{\text{пл. осл. } P}^2 = 120\pi\sigma \times \begin{cases} d & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \delta \frac{1}{8} e^{2\frac{d}{\delta}} & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (38)$$

Таким образом оказывается, что при  $\frac{d}{\delta} < 0,1$  волна, прошедшая сквозь экран, оказывается ослабленной в большей степени за счет потерь в экране, чем за счет отражения от экрана ( $\mathcal{E}_{\text{пл. осл. } P}^2 = 4 \mathcal{E}_{\text{пл. отр. } P}^2$ ), несмотря на то, что  $\mathcal{E}_{\text{пл. осл.}} = 1$ , т. е. ослабление при проникновении сквозь толщу экрана, определяемое формулами (36), отсутствует.

Как следует из формул (34) и (37), стальной экран на всех частотах, а особенно на высоких (при  $\frac{d}{\delta} > 1$ ), отражает хуже медного и алюминиевого (из-за меньшей величины удельной проводимости и много меньшей глубины проникновения). Но зато на высоких частотах в нем значительно больше ослабление при проникновении (из-за много меньшей глубины проникновения). Вследствие допущений, сделанных при выводе, формулы (30), (31) и (33) — (38) верны лишь при не слишком малых  $d$ , при которых  $\mathcal{E}_{\text{пл.}} > 1$ . Естественно, что при  $d \rightarrow 0$  имеет место не  $\mathcal{E}_{\text{пл.}} \rightarrow 0$ , что означало бы бесконечное усиление поля за экраном, а  $\mathcal{E}_{\text{пл.}} \rightarrow 1$ . Следовательно,  $\mathcal{E}_{\text{пл. отр.}} \rightarrow 1$ ,  $\mathcal{E}_{\text{пл. осл.}} \rightarrow 1$ . Однако на практике приходится всегда иметь дело с такими значениями  $d$ , при которых  $\mathcal{E}_{\text{пл.}} > 1$ .



## 12. Сравнение различных металлов как материалов для экрана.

### Рекомендации по выбору материала для экрана

Формулы (31) позволяют сравнить между собою различные металлы как материалы для экрана. Действительно, при  $\frac{d}{\delta} < 0,1$  эффективность экрана пропорциональна удельной проводимости  $\sigma$  и не зависит от магнитной проницаемости материала. Следовательно, при равных толщинах медный экран лучше алюминиевого и намного лучше стального.

Однако с ростом  $d$  или частоты картина изменяется: существенную роль при определении  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  начинает играть член  $e^{\frac{d}{\delta}}$ . А так как у стали толщина поверхностного слоя много меньше, чем у меди и алюминия, то стальной экран оказывается более эффективным.

Граничная частота  $f_{\text{гр}}$ , при которой эффективность бесконечного плоского стального и медного экранов по отношению к отвесно падающей на них плоской электромагнитной волне одна и та же, зависит от  $d$  и определяется формулой

$$f_{\text{гр}} = \frac{0,48}{\mu d^2}, \quad (39)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость стали.

На рис. 5 представлена графически зависимость  $f_{\text{гр}}$  от  $d$  для случаев  $\mu = 100$  и  $\mu = 500$ . Ниже соответствующих прямых находятся области значений  $f$  и  $d$ , при которых более эффективен медный экран, а выше — стальной экран. Как видим, при  $d \geq 0,2$  мм и  $f \geq 100$  кГц стальной экран эффективнее медного.

Необходимо, однако, еще раз подчеркнуть, что пока речь идет лишь о бесконечно протяженном плоском экране при отвесном падении на него плоской же электромагнитной волны. Этот случай наиболее прост для анализа и практически интересен тем, что полученная для него величина  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  входит во все формулы для расчета эффективности замкнутых (без отверстий и щелей) экранов реальной формы при экранировании сосредоточенных источников поля. Но кроме  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  в упомянутые формулы, как будет видно, входят дополнительные члены.

Они могут внести существенную поправку в выводы о сравнительных достоинствах различных металлов как материалов для экранов. Так, если источником поля является магнитный диполь (катушка с током), то на очень низких частотах, как и на очень высоких, сталь экранирует лучше меди. Чем меньше размеры экрана,

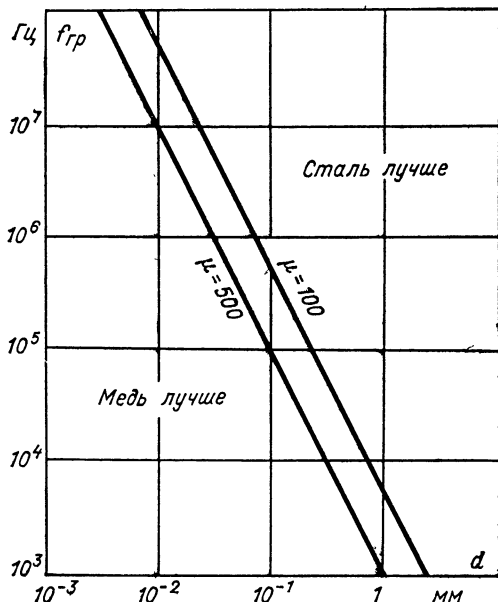


Рис. 5. Зависимость граничной частоты от толщины экрана

толще его стенки и больше магнитная проницаемость стали, тем шире область низких частот, в которой сталь экранирует лучше. Верхняя граница этой области может оказаться выше частоты  $f_{гр}$ , определенной по формуле [39]. Тогда стальной экран окажется на всех частотах эффективнее медного.

### 13. Эффективность двухстенного экрана.

#### Рекомендации по применению двухстенного экрана

На рис. 6 схематически представлена работа бесконечного плоского двухстенного экрана с параллельными стенками. Расстояние между стенками  $d_{12}$ . В общем случае стенки могут быть из различных материалов и неодинаковой толщины.

Нетрудно понять, что эффективность двухстенного экрана не равна произведению эффективностей двух одностенных экранов. Действительно, поток электромагнитной энергии, проникающий сквозь первую стенку, претерпевает бесконечный ряд отражений в пространстве между стенками. В результате сквозь вторую стенку проникает значительно большая часть этого потока, чем в том случае, когда после первого же отражения поток энергии более не возвращается к этой стенке.

Под  $\dot{E}_{3\Sigma}^+$  на рис. 6 понимается сумма электрических составляющих всех волн, движущихся вправо от первой стенки ко вто-

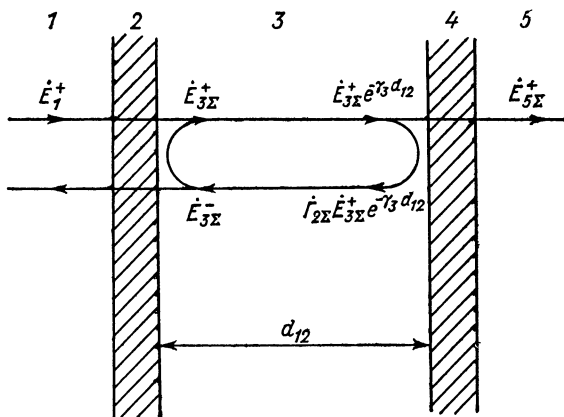


Рис. 6. Работа двухстенного экрана

рой (у поверхности первой стенки), под  $\dot{E}_{3\Sigma}^-$  — сумма составляющих всех волн, падающих справа на эту стенку (у этой же стенки), наконец, под  $\dot{E}_{5\Sigma}^+$  — сумма составляющих всех волн, проникших сквозь вторую стенку.

Между электрической составляющей первичной волны, падающей слева на первую стенку ( $\dot{E}_1^+$ ), и величинами  $\dot{E}_{3\Sigma}^+$ ,  $\dot{E}_{3\Sigma}^-$  и  $\dot{E}_{5\Sigma}^+$  существует следующая связь:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{3\Sigma}^+ &= \frac{1}{\dot{\mathcal{A}}_1} \dot{E}_1^+ + \dot{\Gamma}_{1\Sigma} \dot{E}_{3\Sigma}^-, \\ \dot{E}_{3\Sigma}^- &= \dot{E}_{3\Sigma}^+ \dot{\Gamma}_{2\Sigma} e^{-2\gamma_3 d_{12}}, \\ \dot{E}_{5\Sigma}^+ &= \frac{1}{\dot{\mathcal{A}}_2} \dot{E}_{3\Sigma}^+ e^{-\gamma_3 d_{12}}.\end{aligned}\tag{40}$$

В этих формулах  $\dot{\mathcal{A}}_1$  и  $\dot{\mathcal{A}}_2$  представляют собою комплексные значения эффективностей первой и второй стенки, взятых в от-

дельности, а  $\dot{r}_{1\Sigma}$  и  $\dot{r}_{2\Sigma}$  — коэффициенты отражения от этих стенок (с учетом их толщины).

Из (40) легко найти

$$\dot{E}_{5\Sigma}^+ = \frac{\dot{E}_1^+}{\dot{\mathcal{A}}_1 \dot{\mathcal{A}}_2 (e^{\gamma_3 d_{12}} - \dot{r}_{1\Sigma} \dot{r}_{2\Sigma} e^{-\gamma_3 d_{12}})}. \quad (41)$$

Так как между стенками предполагается свободное пространство, то  $\gamma_3 = j \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Чтобы найти  $\dot{r}_{1\Sigma}$  и  $\dot{r}_{2\Sigma}$  надо вернуться к рис. 4 и сложить электрические составляющие всех волн, движущихся от поверхности 1—1 влево. Нетрудно показать, что

$$\dot{r}_{2\Sigma} = \dot{r}_1 \frac{1 - e^{-2(1+j)\frac{d}{\delta}}}{1 - \dot{r}_1^2 e^{-2(1+j)\frac{d}{\delta}}}. \quad (42)$$

На основании формулы (41) с учетом сказанного можно написать для двухстенного экрана:

$$\mathcal{A}_{12} = \mathcal{A}_1 \mathcal{A}_2 \left| 1 - \dot{r}_{1\Sigma} \dot{r}_{2\Sigma} e^{-j \frac{4\pi d_{12}}{\lambda}} \right|, \quad (43)$$

где  $\dot{r}_{1\Sigma}$  и  $\dot{r}_{2\Sigma}$  определяются по формуле (42), причем под  $\dot{r}_1$ ,  $\delta$  и  $d$  следует соответственно понимать коэффициент отражения от плоской поверхности раздела свободного пространства и металла, из которого изготовлена данная стенка, толщину поверхностного слоя для этого металла и толщину этой стенки.

Если обе стенки одинаковы, то формула (43) принимает вид:

$$\mathcal{A}_{12} = \mathcal{A}_1^2 \left| 1 - \dot{r}_{\Sigma}^2 e^{-j \frac{4\pi d_{12}}{\lambda}} \right|. \quad (44)$$

Воспользовавшись последней формулой, можно ответить на вопрос, какой экран более эффективен — двухстенный или одностенный с удвоенной толщиной стенки.

Анализ показывает, что при  $d \ll \delta$  двухстенный экран в  $\mathcal{A}_1 \frac{2\pi d_{12}}{\lambda}$  раз эффективнее одностенного удвоенной толщины.

Следовательно, если  $\mathcal{A}_1 \frac{2\pi d_{12}}{\lambda} \gg 1$ , двухстенный экран выгоднее. Когда  $\mathcal{A}_1 \frac{2\pi d_{12}}{\lambda}$  приближается к единице, то преимущество двухстенного экрана теряется и сама эта оценка становится неточной.

При  $d \gg \delta$  двухстенный экран в  $\frac{d_{12}}{7\mu\delta}$  раз эффективнее одностенного, причем опять с приближением указанной вели-

чины к единице преимущество двухстенного экрана теряется и сама оценка становится неточной.

Расчеты и практика показывают, что по конструктивным и экономическим соображениям не имеет смысла делать экраны из листового материала двухстенными; лучше добиться нужного увеличения эффективности путем соответствующего утолщения стенки.

#### 14. Эффективность биметаллического экрана

Если в формуле (41) принять  $d_{12} = 0$ , то получится выражение для эффективности бесконечного плоского биметаллического экрана:

$$\mathcal{E}_{12} = \mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 |1 - \Gamma_{1\Sigma} \Gamma_{2\Sigma}|. \quad (45)$$

Анализ этого выражения и физические соображения позволяют сделать следующие выводы.

Если толщина каждого из слоев биметаллического экрана много меньше толщины поверхностного слоя для данного металла, то при одной и той же толщине однородный экран из металла с большей проводимостью  $\sigma$  эффективнее биметаллического.

Если толщина каждого из слоев биметаллического экрана много больше толщины поверхностного слоя для данного металла, то при одной и той же толщине однородный экран из металла с меньшей толщиной поверхностного слоя выгоднее биметаллического.

Если толщина стального экрана много больше, чем  $\delta$  для стали, то увеличение толщины этого экрана при сохранении его однородности увеличит эффективность экранирования сильнее, чем такое же увеличение толщины путем наложения слоя меди.

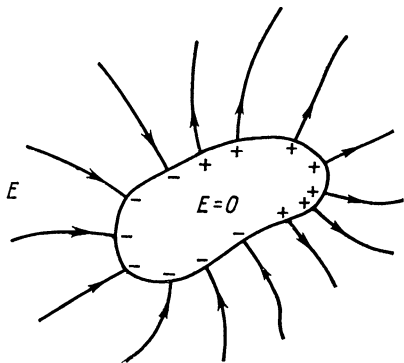
При использовании этих выводов необходимо помнить о замечании, сделанном в конце § 5, а также о потерях в экране (см. § 43). Если надо обеспечить высокую эффективность экранирования катушки с током в широком диапазоне частот, включающем очень низкие частоты, то придется использовать толстостенный экран из ферромагнитного материала с большой магнитной проницаемостью. Но такой экран внесет в катушку большое активное сопротивление и сильно уменьшит ее добротность. Чтобы избежать этого вредного эффекта, целесообразно сделать внутренний слой экрана из меди,

## ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ ЗАМКНУТЫМ ЭКРАНОМ

### 15. Явления, возникающие при внесении проводника в электростатическое поле

Если в электростатическое поле внести проводник (рис. 7), то на его поверхности появятся, как известно, индуцированные заряды, а в пространстве — связанное

Рис. 7. Проводник  
в электростатическом  
поле



с ними (созданное ими) вторичное поле. Во внешнем пространстве вторичное поле, складываясь с первичным, искажает его, а в толще проводника ослабляет его. Через некоторый отрезок времени заряды оказываются распределенными по поверхности проводника так, что напряженность поля в любой точке в толще проводника равна нулю, а в любой точке его поверхности силовые линии перпендикулярны к ней.

С точки зрения конечного эффекта можно было бы предположить, что в первый момент первичное поле пронизывает всю толщу проводника. В действительности, однако, проводник, внесенный в поле, вытесняет поле из объема, который он занимает. Поле стремится проникнуть в проводник, но, отражаясь от последовательных его слоев, проникает лишь на небольшую глубину. Вся энергия, проникшая в проводник, рассеивается (преобразуется в тепло).

Время, в течение которого происходит установление окончательного состояния, зависит от проводимости и конфигурации проводника. От них же зависит и ход процесса установления. В специальных случаях время установления может быть весьма

значительным, а характер процесса сложным. Так, например, если в поле между пластинами 1 и 2 (рис. 8, а) внести проводник в форме двух пластин 3 и 4, соединенных друг с другом проводом с сопротивлением  $R$  (рис. 8, б), то процесс установления можно будет рассматривать как заряд двух последовательно включенных емкостей  $C$ . При большом  $R$  он будет аperiодическим с постоянной времени  $\tau = 0,5 RC$ , а при малом  $R$  — затухающим колебательным с частотой  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$  и постоянной времени затухания  $\tau = 1/\alpha$ , где  $\omega_0^2 = 2/(LC)$ ,  $\alpha = R/(2L)$ ,  $L$  — полная индуктивность всей цепи.

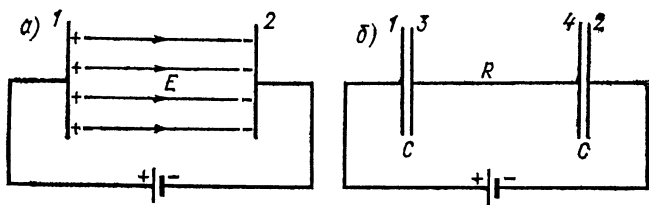


Рис. 8. Внесение в электростатическое поле проводника сложной формы

Если рассматриваемый проводник — это просто кусок металла, то при мгновенном внесении его в поле в нем возникнут затухающие колебания, частота которых будет определяться его размерами и формой. Длительность процесса установления практически не превышает долей микросекунды.

## 16. Экранирование электрического диполя при частоте, равной нулю

Рассмотрим электрический диполь, состоящий из двух шаров и соединяющего их провода, возбуждаемый источником постоянного напряжения (рис. 9, а). Вокруг этого диполя существует электростатическое поле с напряженностью  $E_0$ , зависящей от точки измерения.

Поместим этот диполь в замкнутую (без отверстий и щелей) металлическую коробку-экран (рис. 9, б). На внутренней поверхности этого экрана появятся индуцированные заряды, расположенные (после короткого процесса установления режима) так, что напряженность поля в любой точке в толще стенок, а следовательно, и вне экрана равна нулю. Эффективность экрана становится бесконечно большой, т. е. экранирование оказывается идеальным.

К состоянию, показанному на рис. 9, б, можно прийти разными путями. Так, можно представить, что экран состоит из двух частей, которые движутся навстречу друг другу до соприкосновения и образования единого целого (рис. 10, а). При этом,

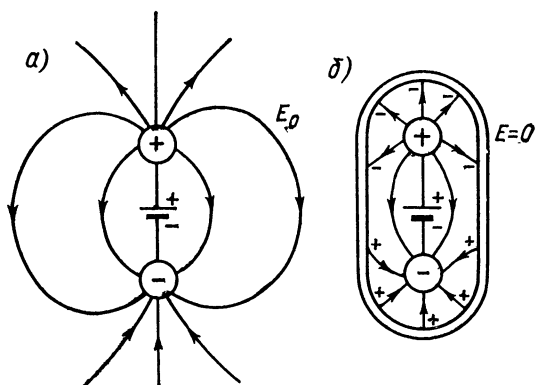


Рис. 9. Электрический диполь вне экрана (а) и в экране (б)

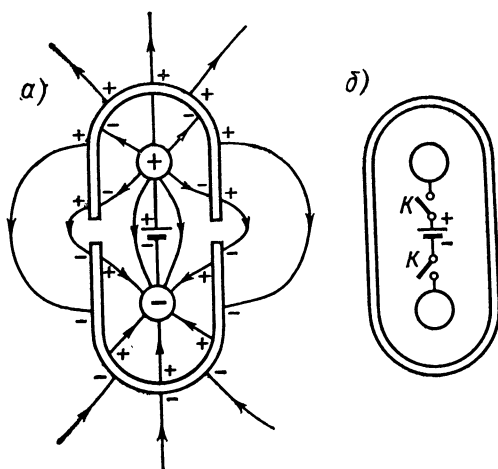


Рис. 10. Два пути прихода к состоянию системы, представленному на рис. 9, б

пока соприкосновения не произойдет, на внешних поверхностях обеих частей экрана будут существовать индуцированные заряды того же знака, что и заряды соответствующих половин диполя, а вне экрана будет существовать поле, почти такое же,



как при отсутствии экрана. При соприкосновении частей экрана на внешней поверхности экрана возникнет затухающий колебательный процесс, в результате которого энергия, накопленная в поле вне экрана, частично перейдет в тепло, а частично будет излучена.

Можно представить себе, что диполь был помещен внутрь экрана до того, как был возбужден (рис. 10, б). Диполь совместно с внутренней областью экрана образует колебательную систему. При замыкании ключей  $K$  в этой системе возникнет затухающий колебательный процесс. Во время этого процесса некоторое количество электромагнитной энергии перейдет в тепло и очень небольшая порция энергии проникнет сквозь толщу стенок и будет излучена.

Сказанное выше интересно с точки зрения формирования представлений о физических процессах в электромагнитных экранах. Однако, если ограничиться лишь рассмотрением установившегося состояния, то, независимо от пути, оно оказывается одним и тем же.

Обратим внимание на то, что эффективность экранирования оказывается в рассматриваемом случае бесконечной независимо ни от формы экрана, ни от толщины его стенок, ни от металла, из которого он изготовлен.

## 17. Экран и заземление

Очень важно, что работа экрана в случае, приведенном на рис. 9, б, никак не связана с заземлением. Отсутствие этой связи характерно для всех случаев, в которых сумма всех зарядов — источников первичного поля, расположенных внутри экрана, — равна нулю.

Если сумма этих зарядов не равна нулю, то, чтобы ликвидировать поле вне экрана, необходимо хотя бы на некоторое время соединить его с землей, точнее с системой проводников, на которых располагается заряд, равный по величине и противоположный по знаку тому заряду, который заключен в экран.

Для иллюстрации сказанного обратимся к рис. 11.

Пусть на некоторой высоте над проводящей поверхностью — «землей» — расположен положительно заряженный шар. Отрицательный заряд, равный по величине заряду шара, распределен по «земле». Будем постепенно сближать друг с другом два полых металлических полушария так, чтобы после соприкосновения они образовали замкнутый экран, окружающий заряженный шар.

Нетрудно понять, что на внутренней поверхности полушарий будут индуцированы отрицательные, а на внешней поверхности равные им положительные заряды (рис. 11, а). Когда полушария сойдутся, то все силовые линии поля, начинающиеся на экранируемом шаре, будут заканчиваться на внутренней поверхности экрана. Поле в толще стенок экрана будет равно нулю.

Однако на внешней поверхности экрана будет существовать положительный заряд, в точности равный заряду экранированного шара, а следовательно, вне экрана будет существовать поле, почти такое же, как при отсутствии экрана.

Но если соединить экран с «землей», то после очень короткого временного затухающего колебательного процесса (или аperiodического процесса, если сопротивление соединительного провода очень велико) установится режим, показанный на рис. 11, б, т. е. поле вне экрана исчезнет. Его энергия частично перейдет в тепло, а частично излучится.

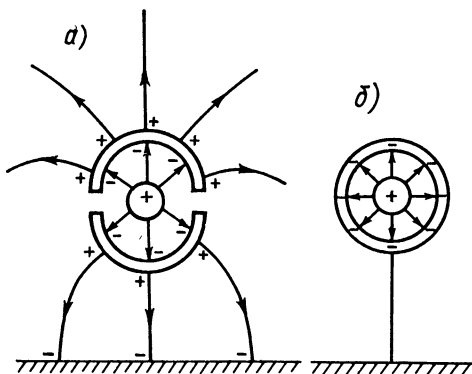


Рис. 11. Экранирование заряженного шара

После установления режима, показанного на рис. 11, б, провод, соединяющий экран с «землей», можно убрать.

## 18. Зависимость эффективности экранирования электрического диполя от частоты

Перейдем к случаю, когда диполь, расположенный внутри экрана, возбуждается источником переменного напряжения (рис. 12). При этом заряды, расположенные на шарах диполя, непрерывно изменяются. Это приводит к изменению зарядов, индуцированных на внутренней поверхности экрана, в результате чего по экрану течет ток, вдоль поверхности стенок экрана существует некоторое падение напряжения, а следовательно, вне экрана существует остаточное поле (рис. 12, а).

Можно представить себе механизм возникновения этого остаточного поля следующим образом. Вследствие инерционности системы изменение индуцированных за-

рядов на внутренней поверхности экрана несколько запаздывает по сравнению с изменением зарядов на шарах диполя и взаимная компенсация полей в толще стенок и вне экрана оказывается неполной.

С повышением частоты указанное запаздывание оказывается сильнее, остаточное поле вне экрана растет, и эффективность экранирования уменьшается. Это уменьшение можно объяснить и иначе. Действительно, между шарами диполя и экраном существуют емкости

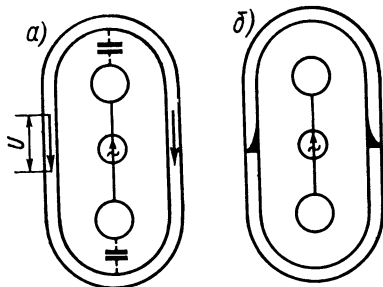


Рис. 12. Экранирование диполя, возбуждаемого переменным напряжением

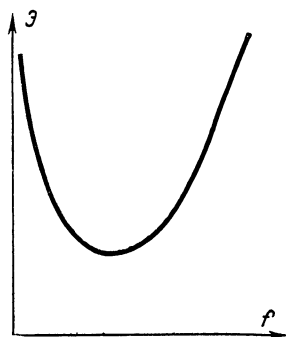


Рис. 13. Характер зависимости эффективности экранирования электрического диполя от частоты

(рис. 12, а). Диполь, эти емкости и экран образуют замкнутую цепь. На низких частотах сопротивление этой цепи определяется практически только емкостями и с повышением частоты уменьшается. В результате при неизменной величине возбуждающего напряжения растет ток, протекающий по экрану, а вследствие этого увеличивается падение напряжения вдоль его стенок, т. е. остаточное поле вне экрана.

Однако с дальнейшим повышением частоты начинает сказываться поверхностный эффект: распределение тока по сечению стенки экрана становится существенно неравномерным. Плотность тока у наружной поверхности экрана сильно уменьшается (эпюра на рис. 12, б). Это уменьшение становится более сильным, чем увеличение полного тока, и поэтому остаточное поле вне экрана, пройдя через максимум, начинает убывать. Соответ-

венно эффективность экрана, пройдя через минимум, начинает быстро расти (рис. 13).

Из сказанного ясно, что в области частот, где поверхностный эффект еще практически не выражен, эффективность экрана должна быть прямо пропорциональна толщине стенок и удельной проводимости материала экрана. Магнитная проницаемость здесь роли не играет. В области частот, где поверхностный эффект сильно выражен, магнитная проницаемость играет важную роль: при одной и той же толщине стенок стальной экран вследствие большой магнитной проницаемости стали может оказаться значительно эффективнее медного.

Отметим, наконец, что эффект компенсации первичного поля, создаваемого зарядами шаров диполя, полем зарядов, индуцированных на внутренней поверхности экрана, может рассматриваться как эффект отражения поля диполя от стенок экрана, а поверхностный эффект — это, как уже говорилось в § 9, эффект ослабления остаточного поля при проникновении его сквозь толщу стенок. С ростом частоты отражение ухудшается, и это ведет к падению эффективности экрана, но затем сильно возрастает ослабление при проникновении поля сквозь толщу стенок, и эффективность экрана быстро увеличивается.

## **19. Эффективность экранирования элементарного электрического диполя шаровым экраном.**

### **Расчет эффективности экранирования открытого излучателя реальным экраном**

При произвольной форме экрана и конечных размерах диполя количественная оценка эффективности экранирования очень сильно затруднена. Поэтому для получения количественной оценки обратимся к простейшему случаю — элементарному электрическому диполю в центре шарового экрана.

Эффективность шарового экрана с внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенок  $d$  по отношению к элементарному электрическому диполю, расположенному в его центре, при  $d \ll R \ll \lambda/(2\pi)$  определяется формулой:

$$\mathcal{E} = 0,21 \frac{\lambda}{R} \mathcal{E}_{\text{пл}}, \quad (46)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  находится из (30) или по приближенным формулам (31).

Электромагнитная волна элементарного диполя не плоская, а сферическая; однако при  $d \ll R$  можно считать поле в толще стенок экрана плоским и воспользоваться для оценки ослабления его при проникновении сквозь толщу стенок формулой (35). Если так, то для эффективности отражения поля от экрана можно вместо (33) написать:

$$\mathcal{E}_{\text{отр}} = 0,21 \frac{\lambda}{R} 60\pi\sigma d \left| \frac{\text{th} \left[ (1+j) \frac{d}{\delta} \right]}{(1+j) \frac{d}{\delta}} \right| \quad (47)$$

или приближенно

$$\mathcal{E}_{\text{отр}} = 0,21 \frac{\lambda}{R} 60\pi\sigma \times \begin{cases} d & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \delta & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (48)$$

Нетрудно видеть, что с повышением частоты эффективность отражения действительно уменьшается (как было сказано в § 18), причем если  $d/\delta > 1$ , то это уменьшение усиливается вследствие уменьшения  $\delta$ . Напротив, с уменьшением частоты  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$  неограниченно возрастает, т. е. при  $f \rightarrow 0$  ( $\lambda \rightarrow \infty$ ) имеет место  $\mathcal{E}_{\text{отр}} \rightarrow \infty$ , а следовательно, и  $\mathcal{E} \rightarrow \infty$ . Это тоже согласуется со сказанным в § 18.

В случае радиуса экрана, соизмеримого с  $\lambda/(2\pi)$ , формула (46) теряет точность. В зависимости от отношения  $\lambda/R$  действительная эффективность экрана оказывается больше или меньше найденной по этой формуле.

Особый интерес представляют случаи, когда на радиусе экрана укладывается приблизительно целое число полуволн. Тогда вследствие резонирования полости экрана получается эффект, эквивалентный полному исчезновению отражения от стенок. Эффективность экранирования определяется при этом только ослаблением при проникновении электромагнитной волны сквозь толщу стенок. С повышением частоты указанное явление наступает первый раз при  $\lambda = 2,28 R$ .

Когда на радиусе экрана укладывается приблизительно нечетное число четвертей волны, эффективность экранирования оказывается близкой к  $2\mathcal{E}_{\text{пл}}$ .

Механизм описанных резонансных явлений можно понять, обратившись к длинной линии, возбуждаемой источником задающего напряжения  $\dot{U}_1$  с нулевым внутренним сопротивлением (рис. 14). Первый отрезок линии имеет длину  $l$ , характеристическое сопротивление  $Z_{01}$  и лишен потерь. За ним следует линия с волновым сопротивлением  $Z_{02}$ , обладающая потерями, для простоты она считается бесконечно длинной.

Возбуждающий источник создает первичную падающую волну с напряжением в начале линии, равным  $\dot{U}_1^+$ . На стыке

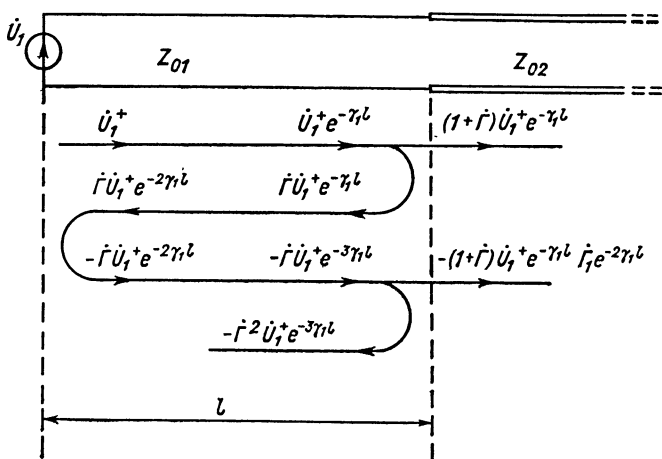


Рис. 14. Иллюстрирование механизма резонансных явлений

линий напряжение этой волны равно  $\dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l}$ , где  $\gamma_1$  — коэффициент распространения первого участка. Для отраженной волны имеем  $\dot{U}_1^- = \Gamma \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l}$ , а для волны, проникшей во вторую линию,  $\dot{U}_1^+ = (1 + \Gamma) \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l}$ . Проследим за бесконечной последовательностью отражений, учтя, что коэффициент отражения от конца, где расположен источник, равен  $-1$  (так как здесь короткое замыкание); сложим напряжения всех волн, проникших во вторую линию, тогда получим:

$$\dot{U}_{2\Sigma}^+ = (1 + \Gamma) \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l} [1 - \Gamma_1 e^{-2\gamma_1 l} + (\Gamma_1 e^{-2\gamma_1 l})^2 + \dots]. \quad (49)$$

Так как  $\Gamma < 1$ , то (49) можно переписать в виде:

$$\dot{U}_{2\Sigma}^+ = \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l} \frac{1 + \Gamma}{1 + \Gamma e^{-2\gamma_1 l}}. \quad (50)$$

У линии без потерь  $\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda}$ ; поэтому окончательно:

$$\dot{U}_{2\Sigma}^+ = \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l} \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 + \dot{\Gamma} e^{-j2\pi \frac{2l}{\lambda}}} . \quad (51)$$

Если  $l = n \frac{\lambda}{2}$ , то  $\dot{U}_{2\Sigma}^+ = \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l}$ , т. е. отражение как бы исчезает и волна беспрепятственно проникает во вторую линию.

Если  $l = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$ , то (51) обращается в формулу:

$$\dot{U}_{2\Sigma}^+ = \dot{U}_1^+ e^{-\gamma_1 l} \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}} . \quad (52)$$

Если  $|Z_{02}| \ll |Z_{01}|$ , то  $\dot{\Gamma} \approx -1$ . Поэтому волна, проникающая во вторую линию, оказывается приблизительно вдвое слабее той, которую мы получили бы в ней, не учитывая резонансных явлений (в предположении, что отражение от левого конца отсутствует).

В случае отсутствия в экране отверстий и щелей указанные резонансные явления практически не играют роли, так как при сколько-нибудь значительной толщине стенок, затухание в толще стенок на тех частотах, на которых эти явления наступают, очень велико. Однако в случае несовершенства экрана они могут играть существенную роль.

Эффективность реального нешарового экрана по отношению к реальному (конечных размеров) диполью можно приближенно оценить по формуле (46), заменив этот экран шаровым с приблизительно таким же объемом.

## Глава четвертая

### ЭКРАНИРОВАНИЕ ВИТКА С ТОКОМ ЗАМКНУТЫМ ЭКРАНОМ

#### 20. Экранирование витка с током при частоте, равной нулю

Вокруг витка с постоянным током существует постоянное магнитное поле с напряженностью  $H_0$ , зависящей от точки измерения. Так как любой реальный ви-

ток имеет конечное сопротивление, то для поддержания в нем тока необходим источник задающего напряжения (рис. 15), а в пространстве вокруг витка кроме постоянного магнитного поля существует еще и постоянное электрическое поле. Однако вследствие того, что экранирование источника постоянного электрического поля уже изучено в гл. 3, мы будем рассматривать здесь только магнитное поле.

Окружим виток замкнутым экраном. Если экран изготовлен из немагнитного материала, т. е. из материала с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = 1$  (медь, алюминий), то он не окажет на магнитное поле никакого влияния (рис. 15, а), т. е. эффективность экранирования будет равна единице. Конечно, это утверждение справедливо только в установившемся режиме.

Переходный процесс может протекать по-разному. Так, если экран состоит из двух половин, смыкающихся вокруг витка, в котором уже существует ток, то при движении этих половин в магнитном поле в них будут индуцироваться э. д. с. и возникать токи, поля которых будут накладываться на первичное поле и искажать его. Если ток создается в витке, уже помещенном в экран, то возникающее поле тоже будет индуцировать э. д. с. в экране и поле токов, возникших в экране, на некоторое время задержит проникновение поля витка наружу экрана. Однако эти процессы могут представлять лишь узко специальный интерес; поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только установившийся режим.

Если экран изготовлен из материала с  $\mu > 1$ , то он намагнитится и созданное им вторичное поле, сложившись с первичным, приведет к ослаблению поля вне экрана (рис. 15, б). Можно сказать и иначе: силовые линии поля витка, встречая экран, обладающий меньшим магнитным сопротивлением, чем свободное пространство, стремятся пройти по стенкам экрана и в меньшем числе проникают в пространство вне экрана.

Если виток бесконечно мал (элементарный магнитный диполь) и расположен в центре шарового экрана с внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенок  $d$ , то эффективность экранирования определяется формулой:

$$\mathcal{D}_0 = \frac{(1 + 2\mu)(2 + \mu) - 2(\mu - 1)^2 \left( \frac{R}{R + d} \right)^3}{9\mu}. \quad (53)$$



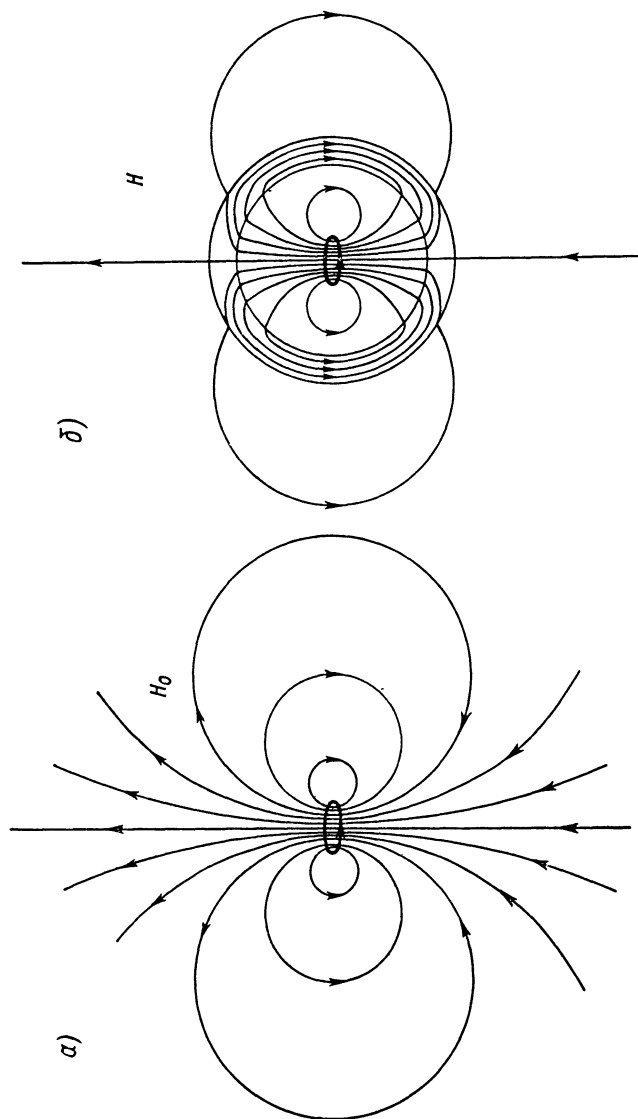


Рис. 15. Экранирование витка с постоянным током при  $\mu = 1$  (a) и при  $\mu > 1$  (б)

При  $\mu \gg 1$  и  $R \gg d$  вместо (53) можно пользоваться упрощенной формулой:

$$\mathcal{E}_0 = 1 + \frac{0,66\mu d}{R}. \quad (54)$$

Нетрудно видеть, что для получения значительной эффективности необходим экран с толстыми стенками из материала с большой магнитной проницаемостью. Если, например,  $R = 100$  мм,  $d = 1$  мм,  $\mu = 100$ , то  $\mathcal{E}_0 = 1,66$ , т. е. экран почти ничего не дает. Но если  $d = 10$  мм и  $\mu = 1000$ , то  $\mathcal{E}_0 = 67$ , т. е. ослабление поля уже весьма значительно.

Для приближенной оценки эффективности экранирования можно пользоваться формулами (53) и (54) также в случае витка или катушки конечных размеров и экрана, имеющего форму, отличную от шара, заменив его шаром равного объема.

## 21. Зависимость эффективности экранирования витка с током от частоты

Вернемся к экрану из немагнитного материала и допустим, что по витку протекает переменный ток. Переменное магнитное поле этого тока, пронизывая экран, индуцирует в нем, как в короткозамкнутом витке, э. д. с. и заставляет протекать ток, создающий вторичное магнитное поле. Вне экрана суммарное поле оказывается слабее первичного, т. е. эффективность экрана оказывается больше единицы. Чтобы оценить порядок этой эффективности и ее зависимость от частоты обратимся к следующему рассуждению.

Допустим, что экран — это простой короткозамкнутый виток, имеющий индуктивность  $L_3$  и активное сопротивление  $R_3$ , а взаимная индуктивность между ним и экранируемым витком равна  $M$ . Тогда, приняв для тока  $\dot{I}$  в экранируемом витке и тока  $\dot{I}_3$  в экране одинаковые положительные направления (оба по или оба против часовой стрелки), можно будет написать для тока в экране:

$$\dot{I}_3 = -\dot{I} \frac{M}{L_3} \frac{1}{1 + \frac{1}{jQ_3}}, \quad (55)$$

где  $Q_3 = \frac{\omega L_3}{R_3}$  — добротность экрана на данной частоте.

Из формулы (55) заключаем, что если  $Q_3 \ll 1$ , то

$$I_3 \approx -jI \frac{M}{L_3} Q_3, \quad (56)$$

т. е.  $I_3$  находится почти в квадратуре с  $I$ . Конечно при этом ни о какой взаимной компенсации магнитных полей этих токов не может быть речи. Эффективность экрана близка к единице.

С повышением частоты  $Q_3$  растет. При  $Q_3 \gg 1$  можно считать:

$$I_3 \approx -I \frac{M}{L_3}, \quad (57)$$

т. е. токи оказываются почти противофазными и может иметь место взаимная компенсация их магнитных полей.

Допустим, что при  $Q_3 = \infty$ , т. е. когда равенство (57) оказывается точным, действительно имеет место полная компенсация. Это значит, что поле тока  $I$  экранируемого витка вне экрана такое же, как поле тока  $I \frac{M}{L_3}$ , протекающего по экрану. Отсюда, в свою очередь, следует, что когда  $Q_3$  имеет конечное значение и по экрану течет ток, определяемый формулой (55), поле вне экрана будет таким, как при отсутствии экранируемого витка, но при протекании по экрану тока:

$$I_\Sigma = I \frac{M}{L_3} - I \frac{M}{L_3} \frac{1}{1 + \frac{1}{jQ_3}}. \quad (58)$$

Поэтому эффективность экрана

$$\mathcal{E} = \left| \frac{j \frac{M}{L_3}}{I \frac{M}{L_3} - I \frac{M}{L_3} \frac{1}{1 + \frac{1}{jQ_3}}} \right| = |1 + jQ_3|. \quad (59)$$

При  $Q_3 \ll 1$  имеем  $\mathcal{E} \approx 1$ , а при  $Q_3 \gg 1$   $\mathcal{E} \approx Q_3$ , т. е. эффективность экрана оказывается практически равной добротности его как короткозамкнутого витка.

С повышением частоты эффективность растет сначала медленно (при  $Q_э < 1$ ), а потом практически пропорционально частоте. Далее, однако, начинает играть существенную роль поверхностный эффект. Ток начинает все более сосредотачиваться у внутренней поверхности экрана. Это приводит к росту  $R_э$  и к замедлению роста  $Q_э$ . Но плотность тока у наружной поверхности экрана быстро уменьшается, а с ней уменьшается и остаточное поле вне экрана. Этот эффект оказывается сильнее эффекта увеличения  $R_э$ , так что в результате с дальнейшим повышением частоты эффективность экрана растет гораздо быстрее, чем по закону прямой пропорциональности.

В случае экрана из материала с  $\mu \gg 1$  сказанное сохраняет силу с той лишь разницей, что при стремлении частоты к нулю  $\mathcal{E}$  стремится не к 1, а к  $\mathcal{E}_0$ , определяемому формулой (53) или (54). Таким образом, в общем случае зависимость  $\mathcal{E}$  от частоты при экранировании витка с током имеет характер, представленный на рис. 16.

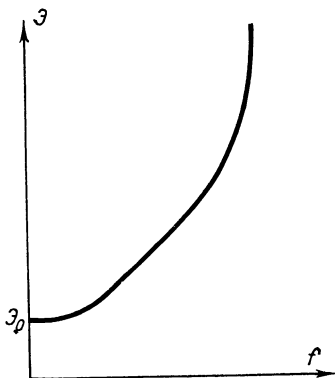


Рис. 16. Характер зависимости эффективности экранирования витка с током от частоты

Эффект компенсации первичного поля, создаваемого экранируемым витком, полем токов, индуцированных в экране, и полем, возникающим вследствие намагничивания экрана (при  $\mu > 1$ ), можно рассматривать как эффект отражения поля витка от стенок экрана, а поверхностный эффект (как и в случае экранирования полупространства от плоской волны или экранирования электрического диполя) — это эффект ослабления остаточного поля при проникновении сквозь толщу стенок экрана. В отличие от случая экранирования электрического диполя, при экранировании витка с током с повышением частоты отражение улучшается.

## 22. Эффективность экранирования элементарного магнитного диполя шаровым экраном. Расчет эффективности экранирования замкнутого излучателя реальным экраном

При произвольной форме экрана и конечных размерах витка с током количественная оценка эффективности экранирования затруднена в такой же сильной степени, как и при экранировании электрического диполя. Поэтому для получения количественной оценки обратимся опять к простейшему случаю — элементарному (бесконечно малому) витку в центре шарового экрана.

Эффективность шарового экрана с внутренним радиусом  $R$  и толщиной стенок  $d$  по отношению к бесконечно малому витку с током, т. е. элементарному магнитному диполю, расположенному в его центре, при  $d \ll R \ll \lambda/(2\pi)$  можно с достаточной для практики точностью определить по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + 4,2 \frac{R}{\lambda} \mathcal{E}_{\text{пл}}, \quad (60)$$

где  $\mathcal{E}_0$  определяется формулой (53) или (54), а  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  — формулой (30) или (31).

В области высоких частот, как правило,  $\mathcal{E} \gg \mathcal{E}_0$ , поэтому без большой ошибки можно считать:

$$\mathcal{E} = 4,2 \frac{R}{\lambda} \mathcal{E}_{\text{пл}}. \quad (61)$$

Полагая, как и при экранировании электрического диполя (§ 19), что при  $d \ll R$  волна в толще стенок экрана плоская и ослабление ее при проникновении сквозь стенки определяется формулой (35), можно написать для эффективности отражения поля магнитного диполя от шарового экрана на высоких частотах:

$$\mathcal{E}_{\text{отр}} = 4,2 \frac{R}{\lambda} 60\pi\sigma d \left| \frac{\text{th} (1+j) \frac{d}{\delta}}{(1+j) \frac{d}{\delta}} \right| \quad (62)$$

или приближенно

$$\mathcal{E}_{\text{отр}} = 4,2 \frac{R}{\lambda} 60\pi\sigma \times \begin{cases} d & \text{при } \frac{d}{\delta} < 0,1; \\ \delta & \text{при } \frac{d}{\delta} > 1. \end{cases} \quad (63)$$

Как видим, с повышением частоты эффективность отражения действительно непрерывно растет, как и было установлено в § 21. При  $\frac{d}{\delta} < 0,1$  этот рост происходит прямо пропорционально частоте, а при  $\frac{d}{\delta} > 1$  замедляется и далее идет прямо пропорционально корню квадратному из частоты (вследствие изменения  $\delta$  обратно пропорционально корню квадратному из частоты).

Когда радиус экрана становится соизмеримым с  $\frac{\lambda}{2\pi}$  и больше, возникают резонансные явления, как при экранировании электрического диполя (§ 19). Природу этих явлений также можно понять с помощью рис. 14 с той лишь разницей, что источник задающего напряжения  $U_1$  следует заменить источником задающего тока  $I_1$  и в соответствии с этим считать коэффициент отражения от левого конца первого отрезка линии равным не  $-1$ , а  $1$ . В результате эффект отражения как бы пропадает при радиусе экрана, приблизительно равном нечетному числу четвертей волны, а эффект удвоения  $\mathcal{E}$  по сравнению с  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  имеет место при радиусе экрана, приблизительно кратном половине длины волны.

### 23. Сравнение эффективностей экранирования элементарных электрического и магнитного диполей

Для того чтобы познакомиться с порядком величин и сопоставить эффективности одного и того же экрана при экранировании им электрического и магнитного диполей, обратимся к численным примерам.

В табл. 1 приведены результаты расчета по приближенным формулам для бесконечного плоского и для шарового экранов из меди, алюминия и стали (с  $\mu = 100$ ) с толщиной стенок  $0,1$  мм. Радиус шарового экрана принят равным  $100$  мм. Для случаев  $\frac{d}{\delta} = 0,48$  (медь),  $0,34$

Таблица 1

$f, \text{ МГц}$	$\frac{d}{\delta}$	60лад	$\mathcal{E}_{\text{пл. отр}}$	$\mathcal{E}_{\text{пл. осл}}$	$\mathcal{E}_{\text{пл}}$	Электрический диполь			Магнитный диполь		
						$0,21 \frac{\lambda}{R}$	$\mathcal{E}_{\text{отр}}$	$\mathcal{E}$	$4,2 \frac{R}{\lambda}$	$\mathcal{E}_{\text{отр}}$	$\mathcal{E}$
Медь											
0,01	0,15		$1,1 \cdot 10^6$	1,0	$1,1 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^{10}$	$7,0 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10$	$1,5 \cdot 10$
0,1	0,48		—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1,5	$1,1 \cdot 10^6$	$5,2 \cdot 10^5$	2,24	$1,2 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^3$
10	4,8		$1,6 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10$	$9,9 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10$	$1,0 \cdot 10^7$	$6,2 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^5$
100	15		$5,2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^6$	$8,5 \cdot 10^{10}$	6,3	$3,3 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{10}$
Алюминий											
0,01	0,12		$6,4 \cdot 10^5$	1,0	$6,4 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^{10}$	$4,0 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$9,0$	$9,0$
0,1	0,34		—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1,2	$6,4 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$	1,7	$6,4 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^2$	$9,0 \cdot 10^2$
10	3,8		$1,2 \cdot 10^5$	2,2 · 10	$2,6 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10$	$7,3 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^4$
100	12		$3,8 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^9$	6,3	$2,4 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^3$	$3,9 \cdot 10^8$
Сталь ( $\mu = 100$ )											
0,01	0,63		—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	2,0		$7,9 \cdot 10^4$	3,6	$2,6 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10$	$3,6 \cdot 10$
1	6,3	$2,2 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^2$	$6,5 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10$	$9,1 \cdot 10^3$
10	20		$7,9 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{12}$	$6,3 \cdot 10$	$4,9 \cdot 10^5$	$8,8 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^{10}$
100	63		$2,5 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^{25}$	$1,0 \cdot 10^{29}$	6,3	$1,6 \cdot 10^4$	$6,2 \cdot 10^{29}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^{28}$

(алюминий) и 0,63 (сталь) расчет не производился, так как приближенные формулы для этих случаев непригодны. Нетрудно, однако, видеть, что, построив график зависимости эффективности экранирования от частоты в в двойном логарифмическом масштабе, можно путем интерполяции получить с достаточной для практики точностью значения эффективности и в тех областях, где  $0,1 < d/\delta < 1$ .

Из таблицы видно, что на частотах ниже 100 кГц плоский стальной экран менее эффективен, чем медный и даже алюминиевый, но на частотах выше 1 МГц стальной экран оказывается самым эффективным, а на частоте 10 МГц его эффективность уже на пять порядков выше эффективности плоского медного экрана. Эти соотношения сохраняются и для шаровых экранов при экранировании диполей обоих типов.

Эффективность медного и алюминиевого шаровых экранов при экранировании электрического диполя имеет при данных размерах и толщине стенок минимальное значение при частоте около 10 МГц, эффективность же стального экрана имеет минимум на частотах ниже 100 кГц.

Эффективность одного и того же шарового экрана по отношению к магнитному диполю значительно меньше, чем по отношению к электрическому диполю. Эта разница особенно сильна на относительно низких частотах и уменьшается с повышением частоты. Из сказанного же в § 19 и 22 следует, что когда размеры экрана становятся соизмеримыми с длиной волны, то эффективность его по отношению к источникам обоих типов начинает изменяться в пределах  $\mathcal{E}_{\text{пл. осл.}} - 2\mathcal{E}_{\text{пл.}}$ .

## **24. Общие выводы об эффективности экранирования источников электромагнитных полей замкнутыми экранами. Расчет эффективности реальных замкнутых экранов**

Соображения, изложенные в предшествующих параграфах, позволяют сделать следующие общие выводы.

Эффективность экранирования замкнутыми экранами источников типа электрического диполя очень велика. Даже при толщине стенок 0,1 мм она на всех частотах



при всех практически интересных размерах и для всех трех рассмотренных материалов превышает  $10^6$  (120 дБ).

При экранировании источников типа магнитного диполя (катушек с током) на частотах порядка 10 кГц и ниже для получения очень большой эффективности экран должен быть толстостенным. Так, на частоте 10 кГц при  $R = 100$  мм эффективность экранов различной толщины принимает значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

$d$ , мм	$\mathcal{E}$		
	Медь	Алюминий	Сталь ( $\mu = 100$ )
0,1	15	9,0	—
1,0	160	87	940
2,0	730	290	$5,1 \cdot 10^5$
4,0	$1,5 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{11}$

Материал экрана играет при этом существенную роль: предпочтение следует отдать стали.

Для получения высокой эффективности экранирования на низких звуковых частотах необходимо применение толстостенных экранов из материала с большой магнитной проницаемостью.

На частотах порядка 100 кГц и выше при  $d \geq 1$  мм может быть получена очень высокая эффективность экранирования также и для источников типа магнитного диполя. Так, стальной экран ( $\mu = 100$ ) с  $R = 100$  мм и  $d = 1$  мм обеспечивает на частоте 100 кГц  $\mathcal{E} = 2,3 \cdot 10^8$ .

Следовательно, независимо от типа источника поля на частотах выше 100 кГц с помощью замкнутого экрана с толщиной стенок 1 мм можно обеспечить эффективность экранирования не менее  $10^6$  (120 дБ).

## **ВЛИЯНИЕ ОТВЕРСТИЙ И ЩЕЛЕЙ НА РАБОТУ ЭКРАНА**

### **25. Общие соображения о влиянии отверстий и щелей на работу электромагнитного экрана и об оценке этого влияния**

В случае замкнутого экрана поле может проникнуть из экрана или в экран только сквозь толщину стенок. Из сказанного в предшествующих главах следует, что соответствующим выбором материала экрана и толщины его стенок принципиально можно получить сколь угодно большую эффективность экранирования. В реальных экранах, за редким исключением, неизбежны более или менее значительные отверстия и щели, которые образуют дополнительный канал для проникновения поля. Вследствие этого эффективность экрана уменьшается.

Если стенки очень тонки, а отверстия и щели незначительны, то поле снаружи экрана (когда источник находится внутри) создается в основном за счет проникновения сквозь стенки. Смена материала и утолщение стенок могут в этом случае повысить эффективность экранирования. Напротив, если стенки относительно толстые, а отверстия и щели значительны, то поле снаружи создается в основном за счет проникновения через эти отверстия и щели, так что утолщение стенок малоэффективно.

Строго говоря, проникновение поля через отверстия и щели зависит от толщины стенок, так как отверстие в реальном экране имеет три измерения (см. § 29), но если не «углублять» отверстия с помощью специальных патрубков, то эта зависимость играет очень малую роль. В целях упрощения задачи вполне допустимо рассматривать проникновение поля сквозь толщину стенок и через отверстия и щели независимо друг от друга, полагая в первом случае экран замкнутым, а во втором случае очень тонкостенным, но изготовленным из идеально проводящего ( $\sigma = \infty$ ) материала (при этом проникновение сквозь толщину стенок оказывается исключенным).

В каждой точке пространства пространственный и временной сдвиги между составляющими поля, проник-

шего сквозь толщу стенок, и поля, проникшего через отверстия и щели, имеют значения, зависящие от координат этой точки. Это приводит к очень сложной в общем случае структуре поля и дополнительно усложняет количественную оценку эффективности экранирования. Однако, учитывая, что эффективность даже замкнутого экрана реальной формы может быть оценена лишь приближенно и случаи почти одинаковой интенсивности полей, проникших сквозь стенки и через отверстия, редки, можно условно принять, что составляющие этих полей складываются арифметически. Это приводит к очень простой формуле для оценки результирующей эффективности:

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_3 \mathcal{E}_{\text{отв}}}{\mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_{\text{отв}}}, \quad (64)$$

где  $\mathcal{E}_3$  — эффективность замкнутого экрана из того же материала с той же толщиной стенок и той же формы, что и реальный экран;  $\mathcal{E}_{\text{отв}}$  — эффективность экрана той же формы, с теми же отверстиями и щелями и с той же толщиной стенок, что реальный экран, но изготовленного из идеально проводящего материала.

Согласно формуле (64), если  $\mathcal{E}_{\text{отв}} \gg \mathcal{E}_3$ , то  $\mathcal{E} \approx \mathcal{E}_3$ , если же  $\mathcal{E}_3 \gg \mathcal{E}_{\text{отв}}$ , то  $\mathcal{E} \approx \mathcal{E}_{\text{отв}}$ . В обоих случаях погрешность (64) приблизительно равна погрешности, с которой определены соответственно  $\mathcal{E}_3$  и  $\mathcal{E}_{\text{отв}}$ . Лишь в редких случаях, когда  $\mathcal{E}_3 \approx \mathcal{E}_{\text{отв}}$ , погрешность оценки  $\mathcal{E}$  может оказаться заметно большей, чем погрешности определения каждой и этих двух величин порознь.

## **26. Общие соображения о проникновении электромагнитного поля через малое отверстие в бесконечно тонком идеально проводящем экране**

Рассмотрим сплошной (без отверстий и щелей) бесконечный плоский экран. Пусть его толщина  $d$  бесконечно мала, но проводимость материала  $\sigma$  столь велика, что  $\sigma d = \infty$ . Эффективность такого экрана бесконечно велика.

Будем считать, что по одну сторону экрана расположены произвольные источники, создающие электромагнитное поле. Вследствие идеальной проводимости эк-

рана электрический вектор поля  $E$  в любой точке поверхности экрана перпендикулярен к ней, а магнитный вектор  $H$  параллелен ей (рис. 17, а).

С электрическим вектором связан электрический заряд на поверхности экрана. Поверхностная плотность этого заряда определяется формулой:

$$q = \varepsilon_a E, \quad (65)$$

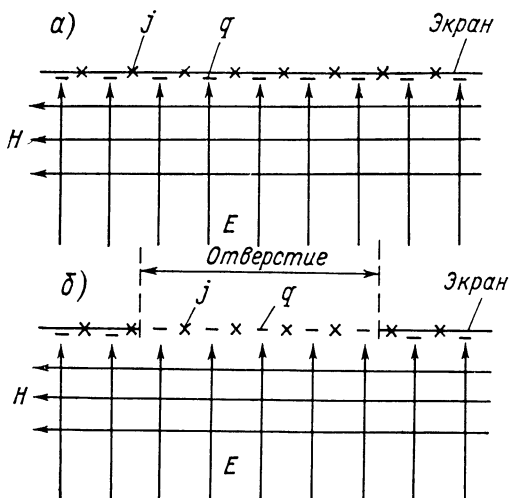


Рис. 17. Электромагнитное поле в полупространстве, отделенном плоским экраном без отверстия (а) и с отверстием, в которое введен слой заряда и тока (б)

где  $\varepsilon_a$  — абсолютное значение диэлектрической проницаемости среды.

С магнитным вектором связан ток, протекающий по поверхности экрана. Поверхностная плотность этого тока определяется формулой

$$j = H. \quad (66)$$

Крестиками на рис. 17 показано направление тока (от наблюдателя).

Сделаем в экране отверстие и введем в него бесконечно тонкий плоский слой заряда и тока с плотностью  $q$  и  $j$

в каждой точке. Очевидно, что картина поля при этом не изменится (рис. 17, б). Если теперь ввести в это отверстие еще один слой заряда и тока с плотностью  $-q$  и  $-j$  в каждой точке, то общая плотность заряда и тока в каждой точке обратится в нуль, что соответствует реальному отверстию. А так как система линейна и в ней действует принцип суперпозиции, то можно утверждать, что поле, проникшее через отверстие в экране, может быть найдено как поле слоя заряда и тока с плотностями  $-q$  и  $-j$ , введенного в отверстие при отсутствии каких бы то ни было других источников поля.

В общем случае  $q$  и  $j$  в различных точках отверстия различны и взаимно связаны. Но если размеры отверстия много меньше четверти длины волны, то этой зависимостью и связью можно в первом приближении пренебречь и рассматривать задачи проникновения электрической и магнитной составляющих поля через отверстие самостоятельно как квазистатические.

## **27. Проникновение квазиэлектростатического поля через малое отверстие в бесконечном тонком идеально проводящем экране**

На рис. 18 схематически показано поле слоя заряда, введенного в отверстие, сделанное в бесконечно тонком бесконечном плоском идеально проводящем экране. Введенный заряд индуцирует на обеих поверхностях экрана заряды противоположного знака. Из соображений симметрии очевидно, что ровно половина потока силовых линий, создаваемых введенным зарядом, окажется в верхнем полупространстве и замкнется на заряды, индуцированные на верхней поверхности. Отсюда, учитывая сказанное в § 26, ясно, что при экранировании полупространства бесконечным бесконечно тонким идеально проводящим плоским экраном с малым отверстием в защищаемую область пространства проникнет ровно половина того потока силовых линий электрического поля, который замыкался бы при отсутствии отверстия на площадь, фактически занятую отверстием, а напряженность поля в центре отверстия будет вдвое меньше напряженности поля у поверхности сплошного экрана (рис. 19).

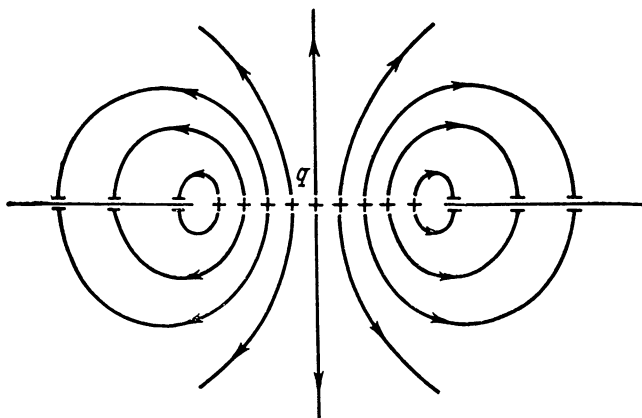


Рис. 18. Электрическое поле слоя заряда, введенного в отверстие в бесконечном плоском экране

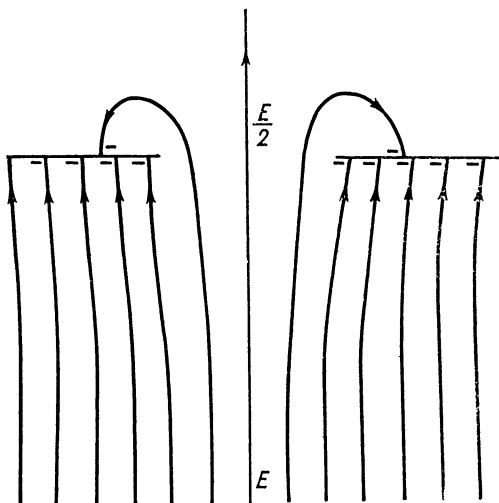


Рис. 19. Проникновение квазиэлектростатического поля через отверстие

На расстоянии  $r$  от центра отверстия, значительно превышающем его линейные размеры, поле в защищаемой области пространства может быть найдено как поле некоего эквивалентного элементарного электрического диполя, расположенного на поверхности сплошного экрана перпендикулярно к ней (рис. 20). Электрический вектор этого поля лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости экрана и имеет две составляющие: составляющую  $E_r$ , совпадающую по направлению с радиус-

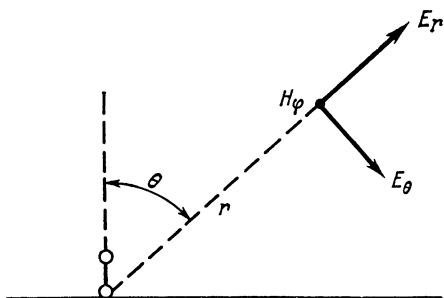


Рис. 20. Составляющие поля эквивалентного электрического диполя над поверхностью сплошного экрана

вектором, проведенным от диполя (из центра отверстия) в точку наблюдения, и  $E_\theta$  — перпендикулярную этому радиус-вектору. Магнитный вектор имеет только одну составляющую  $H_\varphi$ , лежащую в плоскости, параллельной экрану, перпендикулярно указанному радиус-вектору. При  $r \ll \lambda/(2\pi)$  можно считать:

$$E_r = \frac{2P}{\epsilon r^3} \cos \theta; \quad E_\theta = \frac{P}{\epsilon r^3} \sin \theta; \quad H_\varphi = \frac{\omega P}{r^2} \sin \theta, \quad (67)$$

а при  $r \gg \lambda/(2\pi)$ , приближенно

$$E_r = 0; \quad E_\theta = \frac{P}{\epsilon r} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sin \theta; \quad H_\varphi = \frac{\omega P}{r} \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta. \quad (68)$$

В формулах (67) и (68)  $P$  — момент эквивалентного диполя; он зависит от напряженности поля  $E$ , которая существовала бы при отсутствии отверстия в месте экрана, фактически занятом отверстием, а также от размеров и формы отверстия. В случае прямоугольного отверстия со сторонами  $a$  и  $b$  ( $a < b$ ), квадратного отвер-

ствия со стороной  $a$  и круглого отверстия с радиусом  $R$  величина  $P$  определяется соответственно формулами (69) — (71):

$$P = \frac{Eab^2\varepsilon}{64 \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}} = \frac{Es^{\frac{3}{2}}\varepsilon}{64 \sqrt{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}}; \quad (69)$$

$$P = \frac{Ea^3\varepsilon}{64 \sqrt{2}} = \frac{Es^{\frac{3}{2}}\varepsilon}{64 \sqrt{2}}; \quad (70)$$

$$P = \frac{ER^3\varepsilon}{6\pi} = \frac{Es^{\frac{3}{2}}\varepsilon}{105}, \quad (71)$$

где  $s$  — площадь отверстия.

Сопоставление формул (70) и (71) показывает, что круглое и квадратное отверстия одной и той же площади пропускают квазиэлектростатическое поле практически одинаково. Сопоставление формул (69) и (70) показывает, что через узкую длинную щель ( $a \ll b$ ) квазиэлектростатическое поле проникает слабее, чем через квадратное отверстие такой же площади.

Особый интерес представляет то обстоятельство, что при данной форме отверстия момент эквивалентного диполя пропорционален площади этого отверстия в степени три вторых. Из этого следует, что замена одного большого отверстия несколькими малыми, общая площадь которых равна площади этого большого отверстия, будет способствовать улучшению эффективности экрана. Действительно, пусть имеется  $N$  одинаковых отверстий с площадью  $s$  каждое. Полагая в первом приближении, что проникновение поля через каждое из этих отверстий происходит так, как если бы все прочие отверстия отсутствовали, и что на достаточно большом удалении от всей системы отверстий проникшие через них поля складываются арифметически, можно считать всю систему отверстий эквивалентной диполю, момент которого  $P_\Sigma$  в  $N$  раз больше, чем момент диполя, соответствующего одному отверстию. Следовательно,

$$P_\Sigma = N \cdot \text{const } s^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{const } (sN)^{\frac{3}{2}}. \quad (72)$$



Так как  $sN$  — это суммарная площадь всех отверстий, то приходим к выводу, что замена одного большого отверстия  $N$  малыми с той же общей площадью ведет к ослаблению поля, проникающего в защищаемую область пространства, в  $\sqrt{N}$  раз.

Если экран не плоский, а представляет собою коробку, но площадь отверстия мала по сравнению со всей площадью поверхности экрана, то это отверстие тоже можно в первом приближении заменить диполем на поверхности сплошного экрана, имеющим момент, определяемый формулами (69) — (71). Однако поле вне экрана будет несколько иным, чем в случае бесконечного плоского экрана: на больших расстояниях от коробки напряженность поля может быть приблизительно в  $\sqrt{2}$  раз меньше, чем над поверхностью плоского экрана (при тех же  $r$  и  $\theta$ ). Но, учитывая приближенность всех расчетов, о которых идет речь, можно с этой разницей не считаться.

## **28. Проникновение квазимагнитостатического поля через малое отверстие в бесконечно тонком идеально проводящем экране**

На рис. 21 показано в плане прямоугольное отверстие в бесконечно тонком бесконечном плоском идеально проводящем экране. В это отверстие введен слой тока с поверхностной плотностью  $j$ . Направление тока параллельно одной из сторон отверстия. В соответствии со сказанным в § 26 это значит, что соответствующая сторона отверстия параллельна направлению тока, который протекал бы в этом месте по поверхности сплошного экрана.

В дальнейшем мы будем называть размер отверстия в направлении, совпадающем с направлением тока по поверхности сплошного экрана, длиной этого отверстия и будем обозначать его буквой  $a$ . Размер в направлении, перпендикулярном этому току, будем называть шириной отверстия и обозначать буквой  $b$ . При  $a \gg b$  отверстие превращается в щель, направленную вдоль линий тока, — в продольную щель; при  $a \ll b$  оно обращается в щель перпендикулярную этим линиям, — в поперечную щель.

Слой тока, введенный в отверстие, растекается по поверхности экрана так, как показано схематически на рис. 21. Из соображений симметрии ясно, что половина всего тока будет замыкаться по верхней, а вторая половина — по нижней поверхности экрана. Следова-

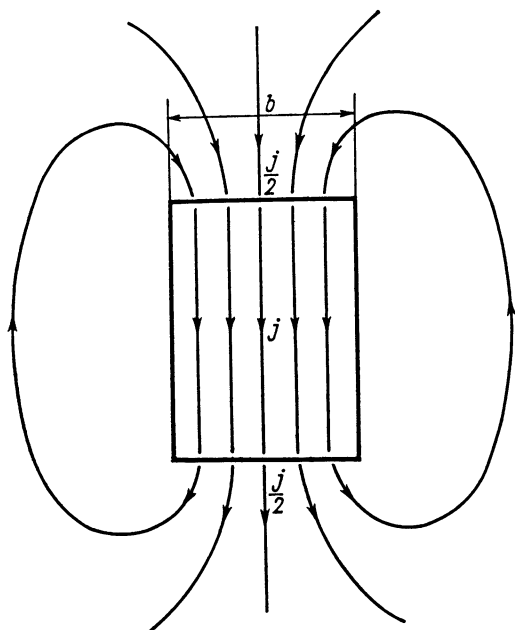


Рис. 21. Схема растекания слоя тока, введенного в отверстие, по поверхности экрана

тельно, плотность тока на каждой из поверхностей экрана у стороны  $b$  отверстия будет равна  $0,5 j$ .

Из сказанного следует, что если в сплошном экране, по нижней поверхности которого протекал ток с поверхностной плотностью  $j$ , сделать прямоугольное отверстие, одна из сторон которого перпендикулярна линиям тока, то ровно половина тока, пришедшегося в целом экране на участок, занятый теперь отверстием ( $0,5 j b$ ), проникнет через это отверстие на верхнюю поверхность экрана, а вторая половина обогнет отверстие по нижней поверхности. В результате получится распределение тока по

поверхности экрана, схематически показанное на рис. 22. Штриховыми линиями на этом рисунке показаны линии тока на нижней, а сплошными — на верхней поверхности.

На рис. 23 схематически показано магнитное поле слоя тока, введенного в отверстие. Нетрудно понять,

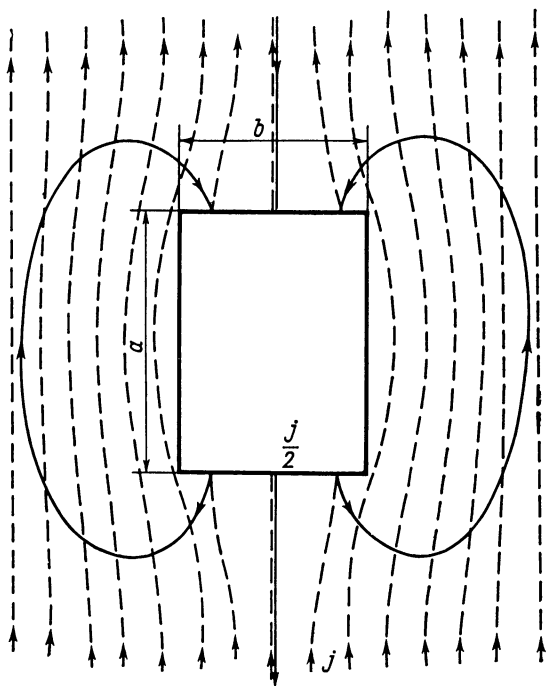


Рис. 22. Схема протекания тока по поверхностям экрана с отверстием

что с каждой стороны этого слоя непосредственно у его поверхности тангенциальная составляющая напряженности поля на средней линии отверстия будет равна  $0,5 H$ , где  $H$  — напряженность поля у поверхности сплошного экрана.

Сложив поле, показанное на рис. 23, с однородным полем под сплошным экраном, получим схематическую картину проникновения квазимагнитостатического поля через отверстие, представленную на рис. 24.

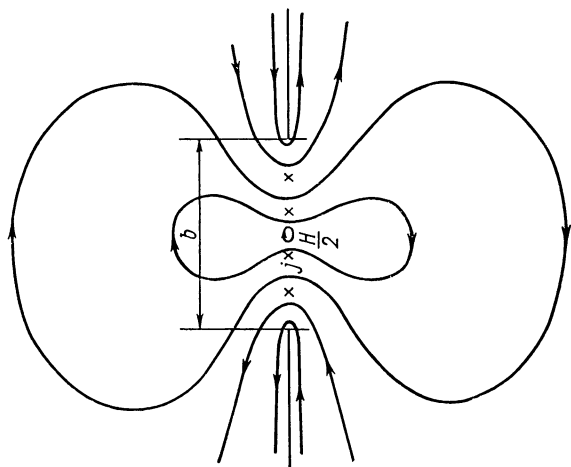


Рис. 23. Магнитное поле слоя тока, введенного в отверстие в бесконечном плоском экране

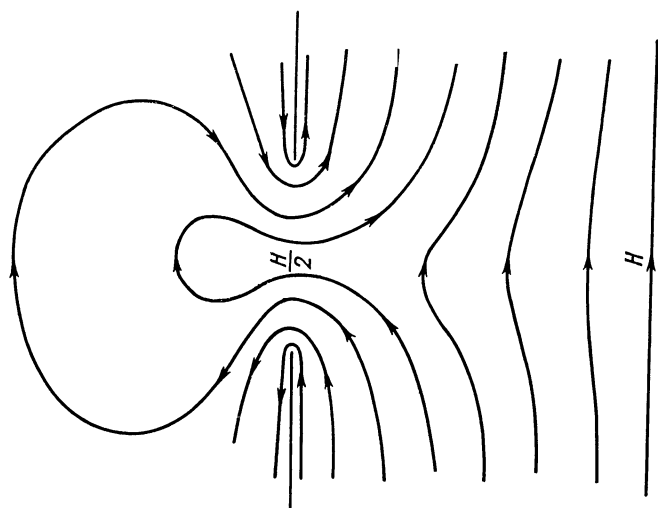


Рис. 24. Проникновение квазимагнитостатического поля через отверстие

Как уже было сказано выше, величина полного тока, проникающего на верхнюю поверхность экрана через отверстие, не зависит от длины  $a$  этого отверстия. Правда, изменение длины несколько изменяет картину растекания тока по этой поверхности, что связано с некоторым изменением картины поля, проникающего через отверстие в защищаемую область пространства. Однако эти изменения несут незначительные. Напротив, изменение ширины отверстия ( $b$ ) ведет к пропорциональному изменению

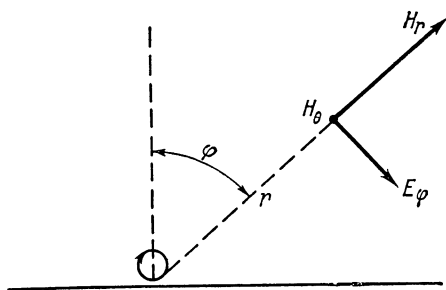


Рис. 25. Составляющие поля эквивалентного витка с током над поверхностью сплошного экрана

полного тока, проникающего через отверстие, и соответственно сильно изменяет величину поля в защищаемой области пространства.

На расстоянии  $r$  от центра отверстия, значительно превышающем его линейные размеры, поле в защищаемой области пространства может быть найдено как поле эквивалентного витка с током (магнитного диполя), расположенного на поверхности сплошного экрана перпендикулярно ей и линиям поля  $H$  под экраном при отсутствии отверстия (рис. 25). Магнитный вектор этого поля имеет две составляющие: составляющую  $H_r$ , совпадающую по направлению с радиус-вектором, проведенным от диполя (из центра отверстия) в точку наблюдения, и составляющую  $H_\theta$ , перпендикулярную этому радиус-вектору и параллельную поверхности экрана. Электрический вектор имеет только одну составляющую  $E_\varphi$ , лежащую в плоскости, перпендикулярной

экрану, и перпендикулярную указанному радиус-вектору. При  $r \ll \lambda / (2\pi)$  можно считать:

$$H_r = \frac{2M}{r^3} \cos \theta; \quad H_\theta = \frac{M}{r^3} \sin \theta; \quad E_\varphi = \frac{\mu_a \omega M}{r^2} \sin \theta, \quad (73)$$

а при  $r \gg \lambda / (2\pi)$ , приближенно:

$$H_r = 0; \quad H_\theta = \frac{M}{r} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \sin \theta; \quad E_\varphi = \frac{\mu_a \omega M}{r} \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta. \quad (74)$$

В формулах (73) и (74)  $M$  — момент эквивалентного витка. Он связан с размерами отверстия и напряженностью поля  $H$  у поверхности сплошного экрана, в месте, где фактически располагается отверстие, формулой:

$$M = \frac{H a b^2}{64} \alpha \left( \frac{b}{a} \right) = \frac{H s^{\frac{3}{2}}}{64} \beta \left( \frac{b}{a} \right), \quad (75)$$

где

$$\alpha \left( \frac{b}{a} \right) = \begin{cases} \frac{\frac{b}{a}}{2 \ln 0,628 \frac{b}{a}} & \text{при } \frac{b}{a} \gg 5; \\ 2,23 & \text{при } \frac{b}{a} = 5; \\ 1 & \text{при } \frac{b}{a} < 1; \end{cases} \quad (76)$$

$$\beta \left( \frac{b}{a} \right) = \sqrt{\frac{b}{a}} \alpha \left( \frac{b}{a} \right); \quad (77)$$

$s$  — площадь отверстия. Функция  $\alpha \left( \frac{b}{a} \right)$  представлена графически на рис. 26.

Формулы (73) — (77) позволяют сделать следующие выводы.

При неизменной форме отверстия и расположения его относительно направления тока, протекающего по целому экрану  $\left( \frac{b}{a} = \text{const} \right)$ , напряженность поля, проникающего через отверстие в защищаемую область пространства, как и в случае квазиэлектростатического

поля (§ 27), пропорциональна площади этого отверстия в степени три вторых. Следовательно, как и в том случае, замена одного большого отверстия  $N$  малыми той же общей площади с тем же значением  $b/a$  приведет к ослаблению этого поля в  $\sqrt[3]{N}$  раз.

Если в щель с  $b/a \gg 5$  ввести несколько перемычек, разделив ее на ряд отверстий с  $b_1/a = 1$  (рис. 27), то,

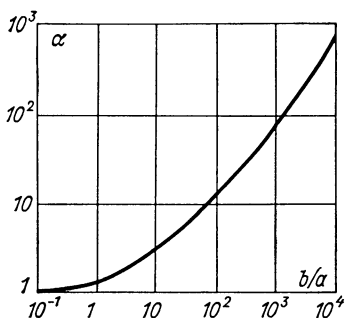


Рис. 26. График функции

$$\alpha\left(\frac{b}{a}\right)$$

полагая в первом приближении, что проникновение поля через каждое из этих отверстий происходит практически независимо от наличия других отверстий, получим ослабление поля, проникшего в защищаемую область пространства, в  $N\alpha(b/a)$  раз. Дальнейшее увеличение числа перемычек будет мало эффективно.

Если отверстие в экране имеет прямоугольную форму, но расположено так, что его стороны наклонены относи-

тельно линий тока по сплошному экрану, то можно разложить этот ток на две составляющие, одна из которых перпендикулярна одной, а вторая — другой из сторон отверстия. Для каждой из этих составляющих сохраняют силу изложенные ранее соображения, а

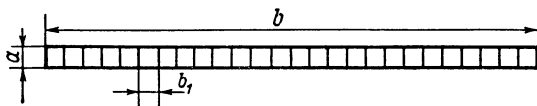


Рис. 27. Деление длинной щели с помощью перемычек на ряд квадратных отверстий

результатирующее поле в защищаемой области пространства можно будет найти как сумму соответствующих двух полей. Однако, если стремиться лишь к оценке порядка величин, то можно заменить это отверстие и вообще отверстие любой формы эквивалентным прямоугольным отверстием с шириной  $b_э$ , равной расстоянию между крайними точками реального отверстия, отсчитанному перпендикулярно линиям тока, и площадью, равной площади реального отверстия.

Если экран не плоский, а представляет собою коробку, но площадь отверстия мала по сравнению со всей площадью поверхности экрана, то это отверстие можно, как в случае квазиэлек-

тростатического поля, заменить в первом приближении магнитным диполем на поверхности сплошного экрана, имеющим момент, определяемый по тем же формулам, что и в случае плоского экрана. Поле вне экрана будет несколько иным, чем в случае плоского экрана, причем сохраняют силу закономерности, указанные в конце § 27.

## 29. Влияние толщины стенок экрана на проникновение электромагнитного поля через отверстия

Рассмотрим отверстие в экране, толщина стенок которого  $d$  имеет конечное значение. Проводимость  $\sigma$  будем по-прежнему считать бесконечной, так что не только заряд, но и ток существует в целом экране лишь на его внутренней поверхности.

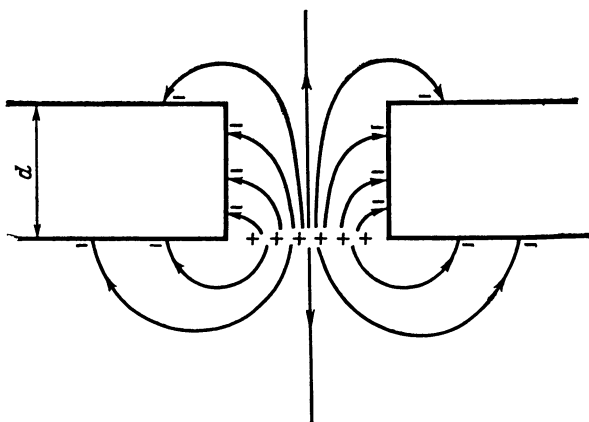


Рис. 28. Поле слоя заряда, введенного в отверстие экрана с конечной толщиной стенок

Поле, проникающее наружу экрана через отверстие, можно, очевидно, и в этом случае найти как поле слоя заряда и тока, введенного в отверстие в месте, где была внутренняя поверхность целого экрана.

На рис. 28 схематически представлено электрическое поле соответствующего слоя заряда.

Поле на рис. 28 в двух отношениях отличается от поля на рис. 18. Во-первых, оно несимметрично: вверх направлен больший поток силовых линий, чем вниз. Это ясно из следующих соображений. Допустим, что верхняя поверхность экрана (см. рис. 18) отделилась от нижней и начала деформироваться, становясь в непосредственной близости от отверстия вместо плоской сначала конической с вершиной ниже поверхности экрана,



(рис. 29, а), затем цилиндрической (рис. 29, б), опять конической с вершиной выше поверхности экрана (рис. 29, в) и, наконец, снова плоской, но расположенной над отверстием (рис. 29, г). В последнем случае вследствие бесконечной близости проводящей поверхности, образовавшейся над отверстием, к слою заряда, введенному в отверстие, весь силовой поток, исходящий из этого заряда, замкнется на образовавшуюся поверхность, а поток, направленный в область под экраном, обратится в нуль. А так как нет никаких оснований ожидать немоноктонности изменения этого потока в процессе рассмотренной деформации верхней поверхности, то можно утверждать, что в случае, показанном на рис. 29, б, в нижнюю область пространства будет направ-

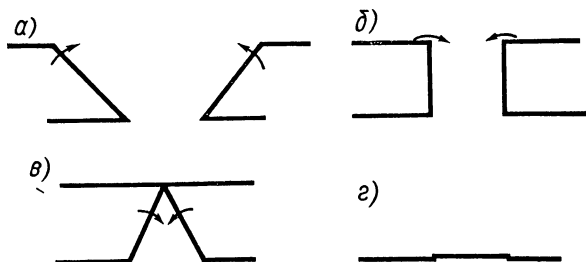


Рис. 29. Постепенная деформация верхней поверхности экрана, приведенного на рис. 18

лено меньше, чем половина потока, исходящего из слоя заряда, введенного в отверстие.

Во-вторых, в пространство, расположенное над верхней поверхностью экрана, проникает не весь силовой поток, направляющийся вверх от слоя заряда: часть этого потока замыкается на боковые стенки отверстия. Этот эффект оказывается сильнее первого; в результате поток силовых линий поля, проникающий в область над экраном в случае, показанном на рис. 28, оказывается меньше, чем в случае, показанном на рис. 18. Иначе говоря, вследствие конечной толщины стенок экрана проникновение электрического поля через отверстие уменьшается.

Аналогичные эффекты имеют место для магнитного поля слоя тока, введенного в отверстие. При конечной толщине экрана по его нижней поверхности замыкается меньше половины всего тока, введенного в отверстие, но так как часть тока замыкается по стенкам отверстия, то по верхней поверхности замыкается тоже меньше половины тока, а это значит, что в область пространства над экраном проникает меньший магнитный поток, чем при бесконечно тонком экране.

Ориентировочно ослабление поля, проникающего через отверстие, вследствие конечной толщины стенок экрана можно учесть, рассматривая отверстие как предельный волновод — волноводный фильтр. Обозначив

коэффициент ослабления такого поля через  $\mathcal{E}_d$ , можно соответственно принять

$$\mathcal{E}_d = e^{\alpha d}, \quad (78)$$

где величина  $\alpha$  зависит от характера поля, формы и величины отверстия. Значения  $\alpha$  для круглого и прямоугольного отверстия приведены в табл. 3.

При  $\alpha d \ll 1$  имеем  $\mathcal{E}_d \approx 1$ , т. е. толщина стенок практически не влияет на проникновение поля через отверстие.

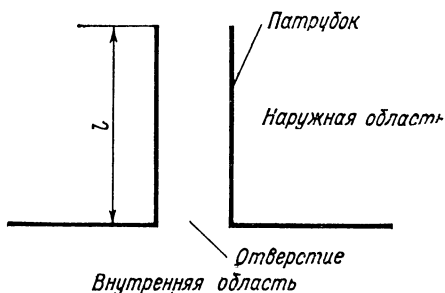


Рис. 30. Патрубок на отверстии в экране

Проникновение поля через отверстие может быть существенно ослаблено путем насадки на это отверстие патрубка (рис. 30). При этом величина  $\mathcal{E}_d$  может быть найдена по формуле (78) с заменой в ней  $d$  на длину патрубка  $l$ . В частности, в случае квадратного отверстия и длины патрубка, равной стороне этого отверстия, получаем

Таблица 3

Форма отверстия	$\alpha$	
	Квазиэлектростатическое поле	Квазимагнитостатическое поле
Круглое с радиусом $R$	$\frac{2,4}{R}$	$\frac{1,84}{R}$
Прямоугольное с шириной $b$ и длиной $a$	$\pi \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$	$\frac{\pi}{b}$

для квазиэлектростатического поля  $\mathcal{E}_d = 85$ , а для квазимагнитостатического поля  $\mathcal{E}_d = 23$ .

Значительное ослабление проникновения поля через отверстие можно получить, применяя одновременно разделение одного большого отверстия на несколько малых и «углубление» каждого из этих малых отверстий с помощью патрубка. Например, на рис. 31 одно боль-

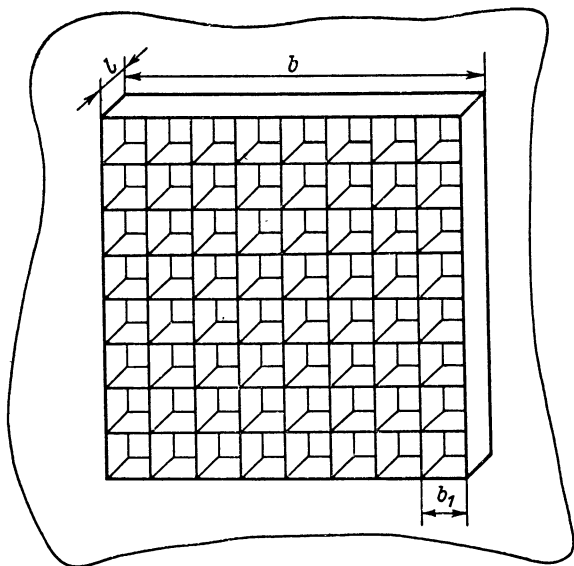


Рис. 31. Большое отверстие, разделенное на малые с патрубком на каждом из них

шое квадратное отверстие разделено на 64 малых, на каждое из которых насажен патрубок с  $l = b_1$ . В результате для квазиэлектростатического поля общее ослабление  $\mathcal{E}_{d1} = 880$ , а для квазимагнитостатического поля  $\mathcal{E}_{d1} = 184$ .

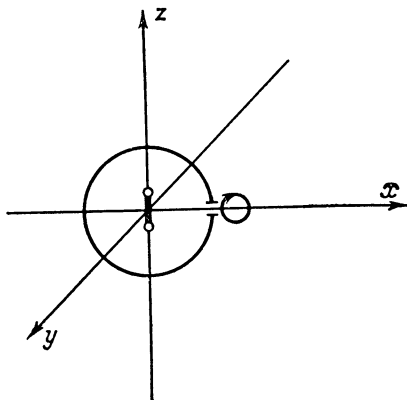
### 30. Расчет эффективности экранов с отверстиями и щелями.

#### Соображения по конструированию таких экранов

Выше рассматривался механизм проникновения электромагнитного поля через отверстие. Перейдем к определению величины  $\mathcal{E}_{отв}$ , входящей в формулу (64).

Даже из рассмотрения простейшего случая бесконечного плоского экрана с отверстием, на который отвесно падает плоская волна, ясно, что  $\mathcal{E}_{\text{отв}}$  существенно зависит от координат точки измерения. Действительно, при отсутствии экрана поле во всех точках пространства одинаково (фазовые сдвиги не представляют в данном случае интереса). При наличии бесконечного плоского бесконечно тонкого идеально проводящего экрана с отверстием поле в защищаемой области пространства имеет структуру поля диполя, расположенного на поверхности целого экрана в том месте, где в действительности находится отверстие.

Рис. 32. Электрический диполь в шаровом экране с отверстием на экваторе



Напряженность этого поля существенно зависит от координат точки измерения.

В случае экрана-коробки картина оказывается еще более сложной; в некоторых областях пространства напряженность поля может даже возрасти ( $\mathcal{E}_{\text{отв}} < 1$ ). Действительно, рассмотрим электрический диполь, помещенный в шаровой экран с малым отверстием на «экваторе» (рис. 32). Вдоль оси  $z$  диполь при отсутствии экрана не излучает, и напряженность поля при перемещении точки измерения вдоль этой оси изменяется как  $1/|z|^3$ . У внутренней поверхности сплошного экрана электрический вектор поля на экваторе (в плоскости  $xy$ ) равен нулю, магнитный же вектор имеет максимальное значение и направлен параллельно оси  $y$ . Поэтому отверстие можно заменить витком с током, лежащим в плоскости  $xz$ . Такой виток не излучает в направлении оси  $y$ , в плоскости же  $xz$  его излучение максимально и одинаково во всех направлениях (при отсутствии экрана). Следовательно, при  $|z| \gg \lambda/2\pi$  убывание напряженности поля вдоль оси  $z$  будет происходить по закону  $1/|z|$ . Ясно, что, начиная с некоторого значения  $|z|$ , напряженность поля в области пространства, близкой к оси  $z$ , при наличии экрана будет больше, чем при его отсутствии.

Из сказанного понятно, что оценить эффективность экрана-коробки с отверстием одним числом  $\mathcal{E}_{\text{отв}}$  можно

лишь очень условно. Так, например, можно условиться, что измерение производится на расстоянии  $r$  от центра шарового экрана, во много раз превышающем радиус  $R$  этого экрана, но много меньшем чем  $\lambda/(2\pi)$ , что отверстие имеет круглую или квадратную форму и расположено в наиболее неблагоприятном месте (на экваторе экрана), что источником поля является элементарный виток с током, расположенный в центре экрана в плоскости экватора, а точка измерения лежит на прямой, проведенной

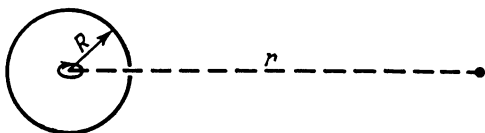


Рис. 33. Иллюстрация к формуле (79)

из центра экрана через центр отверстия (рис. 33). При этих условиях

$$\mathcal{A}_{\text{отв}} = 0,25 \left( \frac{\Sigma}{s} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (79)$$

где  $s$  — площадь отверстия;  $\Sigma$  — полная площадь поверхности экрана.

Несмотря на всю ее условность, формула (79) благодаря простоте может быть принята для грубой оценки экрана-коробки с отверстием во всех случаях. Если отверстие имеет удлиненную форму, то можно пользоваться формулой (79) с заменой в ней фактической площади  $s$  эквивалентной площадью  $s_3$  круглого (или квадратного) отверстия.

В случае прямоугольного отверстия можно найти  $s_3$  по формуле:

$$s_3 = s \sqrt[3]{\frac{b}{a} \alpha^2 \left( \frac{b}{a} \right)}, \quad (80)$$

где  $\alpha \left( \frac{b}{a} \right)$  определяется по формулам (76) или по кривой на рис. 26.

Обратимся к численному примеру.

Пусть имеется шаровой экран с радиусом  $R = 2$  м, изготовленный из стали ( $\mu = 100$ ) толщиной 1 мм. В эк-

ране есть щель с размерами  $100 \times 0,1$  мм. При отсутствии этой щели эффективность  $\mathcal{E}_3$  такого экрана по отношению к магнитному диполю (худший случай), найденная по формуле (61), на частотах выше 100 кГц превышает  $10^{10}$ . По формуле (80), полагая, что щель расположена наиболее неблагоприятно ( $a = 0,1$  мм,

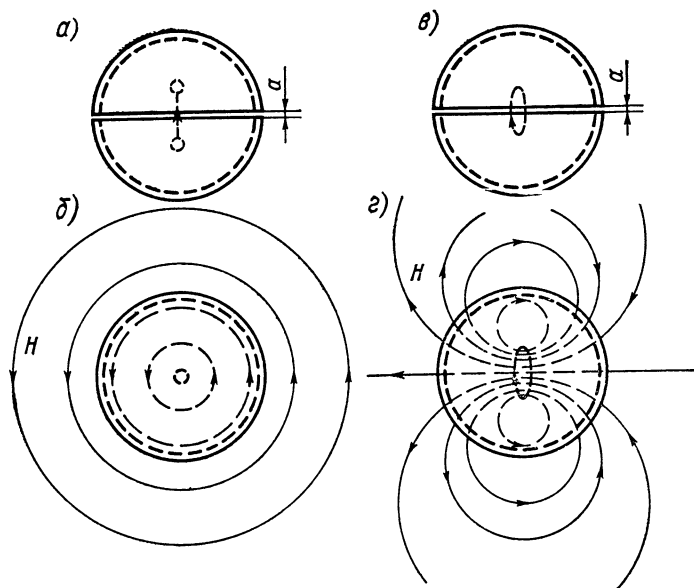


Рис. 34. Шаровой экран с экваториальной (а, б) и меридианальной (в, г) круговыми щелями

$b = 100$  мм), получаем  $s_3 = 1700$  мм<sup>2</sup> (хотя  $s = 10$  мм<sup>2</sup>). Наконец, по формуле (79)  $\mathcal{E}_{\text{отв}} = 1,3 \cdot 10^6$ . Таким образом, можно утверждать, что в указанной области частот эффективность рассматриваемого экрана практически равна  $\mathcal{E}_{\text{отв}}$ , т. е. определяется щелью.

В заключение параграфа приведем две формулы, характеризующие эффективность экранов с круговыми щелями.

При экранировании электрического диполя, расположенного в центре шарового экрана, наиболее неблагоприятна экваториальная круговая щель. Это щель, средняя линия которой лежит в плоскости, перпендикуляр-

ной оси диполя и проходящей через центр экрана (рис. 34, а). Верхняя половина экрана в таком случае полностью изолирована от нижней, протекание токов между ними исключено. Силовые линии магнитного поля электрического диполя имеют, как известно, форму окружностей, лежащих в плоскостях, перпендикулярных оси диполя, с центрами, расположенными на этой оси. Они свободно проникают через рассматриваемую щель во внешнее пространство (рис. 34, б). Электрическая ширина этой щели (размер в направлении, перпендикулярном направлению токов, которые протекали бы по замкнутому экрану) должна быть принята равной  $2\pi R$ , а электрическая длина равна  $a$  (в геометрическом смысле это ширина щели). Эффективность экрана может быть найдена по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{отв}} = 2,6 \lg \frac{2R}{a}. \quad (81)$$

При экранировании витка с током (магнитного диполя) наиболее неблагоприятна меридианальная щель. Это щель, средняя линия которой лежит в плоскости, проходящей через центр экрана перпендикулярно плоскости витка, т. е. проходящей через ось диполя (рис. 34, в). Пути токов, которые протекали бы по замкнутому экрану, оказываются перерезанными. Силовые линии магнитного поля витка свободно проникают во внешнее пространство (рис. 34, г). Как и в предыдущем случае, электрическая ширина щели равна  $2\pi R$ , а длина равна  $a$ . Эффективность экрана может быть найдена по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{отв}} = 1,6 \lg \frac{2R}{a}. \quad (82)$$

Если, например,  $R = 2$  м и  $a = 0,1$  мм, то по формуле (82)  $\mathcal{E}_{\text{отв}} = 7,3$ . Как видим, круговая щель в наиболее неблагоприятном случае практически полностью нарушает работу экрана.

Наименее опасными являются при экранировании электрического диполя меридианальная, а при экранировании магнитного диполя экваториальная круговые щели. В обоих этих случаях размер, обозначенный на рис. 34 буквой  $a$ , оказывается электрической шириной, т. е. должен быть обозначен буквой  $b$ , а электрическая

длина равна  $2\pi R$ . Эффективность  $\mathcal{E}_{\text{отв}}$  может быть найдена по формуле (79), причем  $\alpha = 1$ , так как  $b/a \ll 1$ . При  $R = 2$  м и  $b = 0,1$  мм имеем  $\mathcal{E}_{\text{отв}} = 7 \cdot 10^8$ . Как видим, круговая щель при наиболее благоприятном ее расположении менее опасна, чем значительно более короткая (в геометрическом смысле) щель (100 мм), расположенная наиболее неблагоприятным образом.

### **31. Эффективность экранов из металлической сетки. Соображения по использованию таких экранов**

В некоторых случаях по конструктивным соображениям удобно делать экран не из сплошного листового материала, а из металлической сетки. Так, например, небольшая кабина из сетки, расположенная в сборочном цехе и предназначенная для налаживания и проверки чувствительных радиоприемников, не требует специальной вентиляции, которая необходима в случае изготовления этой кабины из сплошных листов. Возникает вопрос, насколько эффективными могут быть такие экраны.

Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся сначала к случаю экранирования полупространства от плоской волны бесконечным плоским экраном из сетки. Будем, как и в случае сплошного экрана (§ 10), считать, что волна падает на экран под прямым углом, причем вектор  $E_1^+$  параллелен одной и перпендикулярен другой группе проволок, образующих сетку. Проволоки, перпендикулярные  $E_1^+$ , играют в этом случае ничтожную роль, так что ими можно пренебречь (предполагается, что расстояние между осями соседних параллельных проволок, т. е. шаг сетки  $a$ , а тем более диаметр проволоки  $D$  много меньше четверти длины волны).

В проволоках, параллельных  $E_1^+$ , возникают токи. Магнитные поля этих токов (рис. 35, а) вблизи проволок существенно отличаются от однородного магнитного поля, создаваемого током, равномерно распределенным по сечению сплошного экрана (рис. 35, б). Однако на расстояниях  $h$  от сетки, значительно превышающих ее шаг, различие уменьшается и стремится к нулю. Это



дает основание полагать, что в области частот, где поверхностным эффектом можно пренебречь, экран из сетки должен быть эквивалентен (при  $h \gg a$ ) сплошному экрану, по которому на единицу длины в направлении магнитного вектора первичного поля приходится такой же ток, какой протекает по всем проволокам сетки, приходящимся на единицу длины. Для сплошного экрана этот ток равен  $E_2^+ \sigma d$ , где  $E_2^+$  — вектор результирующего поля у экрана, он же вектор поля, проникшего сквозь

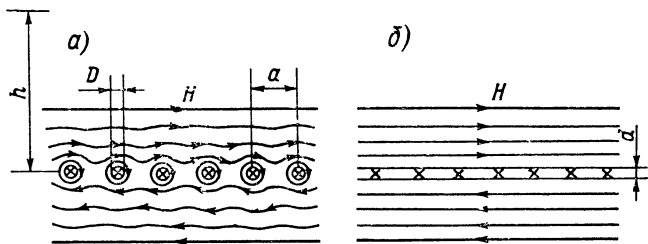


Рис. 35. Магнитное поле токов, протекающих по сетке (а) и по сплошному экрану (б)

экран. Для сетки при том же  $E_2^+$  этот ток равен  $nE_2^+/R_+$ , где  $R_+$  — сопротивление 1 м одной проволоки постоянному току,  $n$  — число проволок на единицу длины. А так как  $n = 1/a$ , то  $\mathcal{E}_{пл}$  для экрана из сетки можно получить по формуле (31) при  $d/\delta < 0,1$  с заменой в ней  $\sigma d$  на  $1/(R_+ a)$ , т. е.

$$\mathcal{E}_{пл} = 60\pi \frac{1}{R_+ a} . \quad (83)$$

С повышением частоты поведение сетки начинает существенно отличаться от поведения сплошного экрана. Эффективность сплошного экрана из-за ослабления поля при проникновении сквозь толщу экрана, как было выяснено в § 11, быстро растет, у сетки же это ослабление отсутствует. Поверхностный эффект приводит лишь к увеличению активного сопротивления 1 м каждой проволоки ( $R$ ) по сравнению с  $R_+$ . Это уменьшает эффективность экранирования. Необходимо учесть также все возрастающую роль индуктивного сопротивления

$x = \omega L$  проволок, из-за которого в формулу (83) вместо  $R_{\equiv}$  должно быть введено  $z = |R + j\omega L|$ . При  $\omega L > 3R$  можно считать, что

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = 60\pi \frac{1}{\omega La}. \quad (84)$$

Более строгий анализ приводит к следующей формуле для  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  экрана из сетки:

$$\mathcal{E}_{\text{пл}} = \frac{\lambda}{2a \left| \ln \frac{2a}{D} - 1,2 + \frac{\lambda R_{\equiv}}{120\pi} [\beta(u) + j\alpha(u)] \right|}, \quad (85)$$

где

$$\alpha(u) = \frac{R}{R_{\equiv}} = \frac{u}{2} \frac{\text{ber}(u) \text{bei}'(u) + \text{bei}(u) \text{ber}'(u)}{[\text{ber}'(u)]^2 + [\text{bei}'(u)]^2};$$

$$\beta(u) = \frac{x_{\text{в}}}{R_{\equiv}} = \frac{u}{2} \frac{\text{ber}(u) \text{ber}'(u) + \text{bei}(u) \text{bei}'(u)}{[\text{ber}'(u)]^2 + [\text{bei}'(u)]^2};$$

$$u = \frac{D}{\sqrt{2} \delta};$$

$x_{\text{в}}$  — реактивное сопротивление 1 м проволоки, обусловленное ее внутренней индуктивностью (магнитным полем внутри металла).

При  $u > 50$  можно с большой точностью считать, что

$$\alpha(u) = \beta(u) = \frac{u}{2\sqrt{2}}. \quad (86)$$

При  $50 > u > 6$  можно считать, что

$$\alpha(u) = \frac{\sqrt{2}u + 1}{4}; \quad \beta(u) = \frac{u}{2\sqrt{2}}. \quad (87)$$

Значения  $\alpha(u)$  и  $\beta(u)$  при  $u < 6$  могут быть найдены по кривым на рис. 36.

При  $f \rightarrow 0$  имеем  $\beta(u) \rightarrow 0$ ,  $\alpha(u) \rightarrow 1$ ,  $\lambda \rightarrow \infty$  и формула (85) обращается в (83). С ростом частоты произведение  $\lambda [\beta(u) + j\alpha(u)]$  уменьшается и  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  становится почти пропорциональным  $\lambda$ , что соответствует формуле (84).

На рис. 37 представлены графически зависимости  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  от частоты для двух медных сеток (сплошные линии) и двух стальных с  $\mu = 50$  (штриховые линии).

Представляют интерес следующие общие закономерности.

1. При  $a/D = \text{const}$  редкие сетки из данного материала на низких частотах более эффективны, а на высоких частотах менее эффективны, чем густые. Эта закономерность объясняется тем, что активное сопротивление

ние каждой проволоки на низких частотах обратно пропорционально  $D^2$ , так что  $R_{\text{ср}} = \text{const}/D$ , на высоких же частотах действует формула (84), в которой  $L$  мало зависит от  $D$ .

2. При одинаковых  $a$  и  $D$  медные сетки на низких частотах лучше стальных во столько раз, во сколько удельная проводимость меди больше, чем стали. С повышением частоты различие между этими сетками сглаживается, так как основную роль начинает играть внеш-

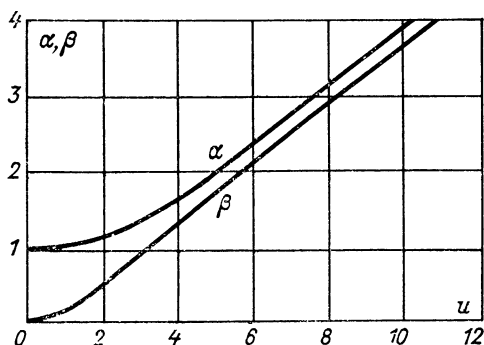


Рис. 36. Графики функций  $\alpha(u)$  и  $\beta(u)$

няя (за счет магнитного потока, проходящего вне металла) индуктивность проволок.

3. При  $a = \text{const}$  и одном и том же материале сетки из толстой проволоки эффективнее сеток из тонкой проволоки: в области низких частот  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  пропорционально  $D^2$ , а в области высоких частот — приблизительно пропорционально  $\left(\ln \frac{2a}{D} - 1,2\right)^{-1}$ .

Подобно сплошному экрану при  $d \ll \delta$  (§ 13) двухстенный экран из сетки в  $\mathcal{E}_1 \frac{4\pi d_{12}}{\lambda}$  раз эффективнее одностенного из той же сетки (при  $\mathcal{E}_1 \frac{4\pi d_{12}}{\lambda} \gg 1$ , где  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_{\text{пл}}$  — эффективность одностенного экрана). В отличие от сплошных экранов экраны из сетки имеет смысл делать двухстенными.

До сих пор речь шла о бесконечном плоском экране. Для шаровых экранов из сетки сохраняют силу формулы

(46) и (61) при подстановке в них значения  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$ , найденного по формуле (85). Здесь, однако, необходимы некоторые дополнительные разъяснения.

При бесконечном плоском экране не возникает вопроса о том, как замыкается ток, протекающий по каждой из проволок сетки. В случае шарового экрана или крана-коробки другой формы, этот вопрос требует ответа. Конечно, идеальным решением в случае, например, экранирования витка с током было бы такое конструктивное выполнение сетки, при котором одна из двух групп проволок образовывала бы замкнутые витки, лежащие в плоскостях, параллельных плоскости экранируемого витка. Однако практика и специально поставленные эксперименты показывают, что в этом нет надобности. Токи протекают не только вдоль каждой из проволок, но достаточно хорошо переходят с одной проволоки на другую в местах перекрещиваний даже в старых сетках, покрытых коррозией. В результате достаточно обеспечить хороший электрический контакт по швам в местах соединений отдельных кусков сетки, и экран работает нормально.

Второе разъяснение касается поведения  $\mathcal{E}$  согласно формуле (46) при  $f \rightarrow 0$ . В отличие от сплошного экрана экран из сетки при этом не становится бесконечно эффективным. Эффективность шарового экрана с радиусом  $R$ , изготовленного из сетки с шагом  $a$  (при  $a \gg D$ ), по отношению к электрическому диполю, расположенному в его центре, при  $f = 0$  может быть приближенно найдена по формуле:

$$\mathcal{E} = 48 \sqrt{2} \frac{R}{a}. \quad (88)$$

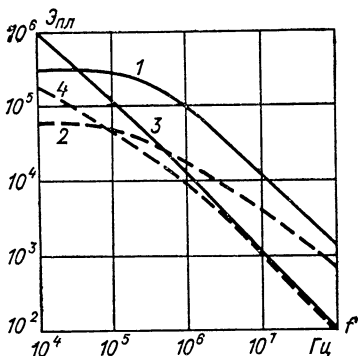


Рис. 37. Зависимость  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  от частоты для металлических сеток

медная (1) и стальная (2) с  $D = 0,2$  мм,  $a = 1$  мм; медная (3) и стальная (4) с  $D = 2$  мм,  $a = 10$  мм

Пусть, например,  $R = 2$  м,  $a = 1$  мм. Тогда согласно формуле (88)  $\mathcal{E} = 1,4 \cdot 10^5$ . Воспользовавшись формулой (46) и значениями  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  для медной сетки с  $a = 1$  мм, взятыми по графику на рис. 37, можно найти, что на частотах  $f > 5$  МГц рассматриваемый экран будет иметь эффективность меньшую чем  $1,4 \cdot 10^5$ , а на более низких частотах — большую. Следовательно, для более низких частот надо пользоваться формулой (88).

## Глава шестая

### ЭКРАНИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

#### 32. Общие соображения об экранировании длинных линий

Если к устройству — источнику электромагнитного поля, которое необходимо локализовать, — подключаются провода, связывающие его с другими электроустройствами, то недостаточно заключить это устройство в экранирующий корпус или экранированное помещение: электромагнитные колебания будут проникать за пределы экрана по проводам. Аналогичная картина наблюдается в случаях, когда экранирующий корпус или экранированное помещение служат для защиты данного электроустройства или схемы от воздействия внешних электромагнитных полей: провода, проходящие извне внутрь экрана, вносят в него электромагнитные колебания, от которых мы стремимся избавиться.

Существуют два способа борьбы с этими нежелательными явлениями: 1) включение электрических фильтров в провода, выходящие из экрана или входящие в него; 2) экранирование этих проводов для локализации создаваемого ими поля или ослабления действия, оказываемого на них посторонними полями. В зависимости от конкретных условий может оказаться предпочтительным один или другой из этих способов. Иногда конструктивные, экономические и другие соображения диктуют одновременное применение обоих способов — это облегчает требования к экранам и фильтрам. В тех слу-

чаях, когда частоты рабочих токов схемы, протекающих по рассматриваемым проводам, лежат в той же области, что и частоты внешних мешающих полей, или сами эти токи создают поля, мешающие работе других систем, применение фильтров исключается и вся тяжесть решения задачи переносится на экранирование.

При анализе полей, создаваемых проводами, или воздействия на провода внешних полей, эти провода должны рассматриваться как симметричные или несимметричные длинные линии в зависимости от схемы, в которую они входят, и роли, которую они в ней играют. В практике борьбы с промышленными радиопомехами и в некоторых других случаях каждый провод и «земля» должны рассматриваться как несимметричная линия и одновременно этот же провод с каждым другим образует симметричную длинную линию.

Экранирование длинных линий осуществляется путем заключения их в металлические оболочки — сплошные или оплетки, изготовленные из тонких проволок. Значения эффективности экранирования одной и той же металлической оболочкой симметричной и несимметричной длинных линий существенно различны. Причина в том, что в первом случае на поверхности и в толще стенок экрана возникают лишь индуцированные заряды и токи, тогда как во втором случае по экрану протекает обратный ток линии, так что в сущности правильнее говорить не об экранировании, а о замене открытой линии коаксиальным (или приблизительно коаксиальным) кабелем.

### **33. Эффективность экранирования симметричной длинной линии сплошным цилиндрическим экраном**

Электромагнитное поле двухпроводной симметричной длинной линии можно рассматривать как сумму двух полей: поля, связанного с зарядами, существующими на проводах этой линии, и поля, связанного с токами, протекающими по этим проводам. При частотах, отличных от нуля, плотность заряда на 1 м длины и сила тока изменяются вдоль линии, но при изучении работы экрана эти изменения не играют сколько-нибудь заметной роли. Дело в том, что на экран в каждом его попереч-

ном сечении существенно действуют лишь наиболее близкие к этому сечению участки линии (удаленные от него на расстояние не более нескольких радиусов экрана); а так как практически интересны только случаи, когда радиус экрана несравненно меньше четверти длины волны, то и длина этих участков оказывается значительно меньше четверти длины волны; поэтому изменения тока и плотности заряда в пределах этих участ-

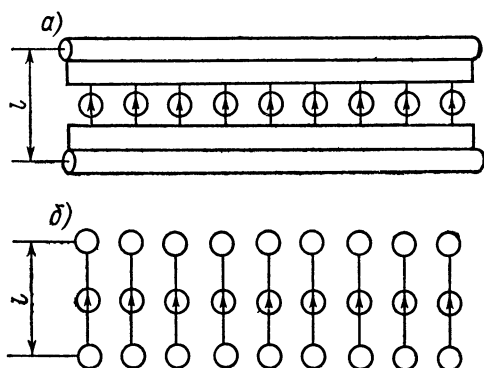


Рис. 38. Отрезок линейного электрического диполя (а) и часть совокупности бесконечного множества простых электрических диполей (б)

ков можно пренебречь. В результате задача определения эффективности экранирования рассматриваемой линии распадается на две самостоятельные задачи: определение эффективности экранирования линейного электрического диполя и линейной рамки с током или линейного магнитного диполя.

Под линейным электрическим диполем мы понимаем следующую систему (рис. 38, а). Два бесконечно длинных параллельных провода соединены друг с другом на всем своем протяжении тонкой металлической лентой. Лента имеет продольный разрез, в который введено бесконечное множество источников напряжения с нулевым внутренним сопротивлением. Все напряжения одинаковы по амплитуде, частоте и фазе. Этот диполь можно рассматривать как совокупность бесконечно большого количества выстроенных в ряд простых электрических диполей (рис. 38, б).

Линейный электрический диполь можно характеризовать его моментом на единицу длины  $P_0 = \frac{1}{4\pi} Q_0 l$ , где  $Q_0$  — амплитудное значение заряда на единицу длины на одном из проводов, а  $l$  — расстояние между осями проводов. Если беспредельно уменьшать геометрические размеры поперечного сечения системы, сохраняя неизменным момент  $P_0$ , то получим элементарный линейный электрический диполь.

Эффективность бесконечно длинного однородного цилиндрического экрана с радиусом  $R$  и толщиной стенок  $d \ll R$  по отношению к элементарному линейному электрическому диполю, расположенному на его оси, можно найти по формуле:

$$\mathcal{E} = 0,16 \frac{\lambda}{R} \mathcal{E}_{\text{пл}}, \quad (89)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  определяется формулой (30) или приближенными формулами (31).

С точностью, вполне достаточной для инженерной практики, формулой (89) можно пользоваться для оценки эффективности сплошного цилиндрического экрана по отношению к полю зарядов реальной симметричной двухпроводной линии.

Под линейной рамкой с током мы понимаем два бесконечно длинных параллельных провода, по которым текут в противоположных направлениях токи, сохраняющие неизменные значения амплитуды, частоты и фазы по всей длине системы (рис. 39, а). Можно представить себе, что в каждый из проводов включено бесчисленное множество одинаковых источников тока с бесконечно большим внутренним сопротивлением (рис. 39, б). Можно также рассматривать линейную рамку как совокупность бесконечно большого количества выстроенных в ряд квадратных рамок — витков с одинаковыми токами (рис. 39, в).

Линейную рамку можно характеризовать ее моментом на единицу длины  $M_0 = \frac{1}{4\pi} Il$ , где  $I$  — амплитуда тока. Если беспредельно уменьшать геометрические размеры поперечного сечения системы, сохраняя неизменным момент  $M_0$ , то получим элементарную линейную рамку или элементарный линейный магнитный диполь.



Эффективность бесконечно длинного однородного цилиндрического экрана с радиусом  $R$  и толщиной стенок  $d \ll R$  по отношению к элементарной линейной рамке,

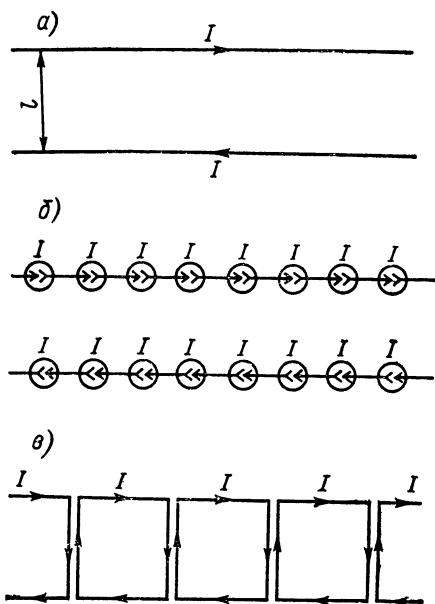


Рис. 39. Отрезок линейной рамки с током (а), отрезок двухпроводной линии с генераторами тока (б) и часть совокупности бесконечного множества квадратных рамок с током (в)

расположенной на его оси, с достаточной точностью определяется формулой:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + 6,3 \frac{R}{\lambda} \mathcal{E}_{\text{пл}}, \quad (90)$$

где

$$\mathcal{E}_0 = 1 + \frac{0,5 \mu d}{R}. \quad (91)$$

Здесь  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость, а  $\mathcal{E}_{\text{пл}}$  имеет то же значение, что в формуле (89).

В инженерной практике формулой (90) можно пользоваться для оценки эффективности сплошного цилинд-

дрического экрана по отношению к полю токов реальной симметричной двухпроводной линии.

Сопоставляя формулы (89) — (91) с формулами (46), (60) и (54), видим, что они мало отличаются друг от друга. Необходимо, однако, иметь в виду, что значения  $R$  для экранов длинных линий бывают значительно меньше, а отношения  $d/R$  значительно больше, чем для экранов-коробок. Первым следствием этого является еще большее, чем в случае экранов-коробок, ослабление поля, связанного с зарядами, существующими на проводах линии. Ослабление же поля, связанного с током линии, в области частот, где основную роль играет второй член правой части (90), оказывается меньшим, чем ослабление поля токов экранами-коробками из того же материала и той же толщины. Вторым следствием является то, что при  $\mu \gg 1$  в области частот, где основную роль играют первые члены правых частей (60) и (90), экран длинной линии подавляет поле токов более эффективно, чем экран-коробка.

#### **34. Эффективность экранирования симметричной длинной линии металлической оплеткой**

Металлическая оплетка отличается от сплошного цилиндрического экрана в двух отношениях: 1) вследствие загрязнения и окисления поверхности отдельных проволок переход тока с одной из них на другую может оказаться затрудненным, что ведет к увеличению сопротивления экрана протекающим по нему токам и соответствующему уменьшению его эффективности; 2) в оплетке неизбежны отверстия (имеются в виду отверстия, образующиеся в местах перекрещивания прядей проволок, по сравнению с которыми отверстия и щели между отдельными проволоками играют незначительную роль), что в еще большей мере уменьшает эффективность экранирования.

С точки зрения экранирования поля зарядов плохой контакт и даже полное отсутствие контакта между отдельными проволоками не опасны. Действительно, по стенкам сплошного цилиндрического экрана токи при экранировании линейного электрического диполя имеют только составляющие, лежащие в плоскостях попереч-

ного сечения (рис. 40, а). По оплетке (в предположении отсутствия контакта между проволоками) пути этих токов — спирали (рис. 40, б). В результате эти пути оказываются длиннее, а сопротивление экрана на очень низких частотах больше (при равных радиусах  $R$  и массах на единицу длины) во столько раз, во сколько длина

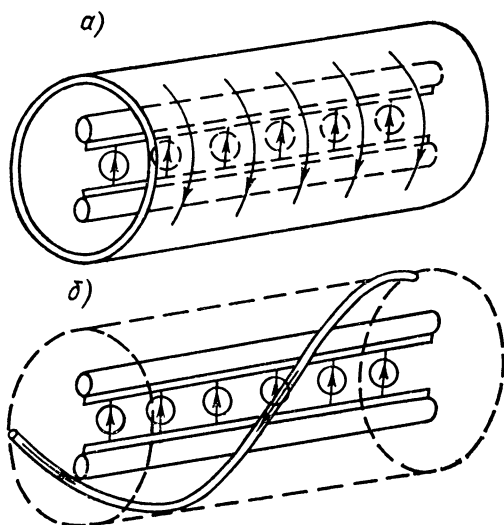


Рис. 40. Пути токов, протекающих по сплошному цилиндрическому экрану (а) и по одному из проводов оплетки (б) при экранировании линейного электрического диполя

провода на одном шаге повива пряди оплетки больше длины окружности поперечного сечения оплетки. Обозначив шаг повива через  $C$ , получим коэффициент увеличения сопротивления

$$\nu = \sqrt{1 + \left(\frac{C}{2\pi R}\right)^2}. \quad (92)$$

Если, например,  $R = 10$  мм,  $C = 50$  мм, то  $\nu = 1,28$ . Такое увеличение, конечно, несущественно.

На практике эффективность экранирования поля зарядов двухпроводной линии металлической оплеткой

определяется отверстиями и может быть найдена по формуле:

$$\vartheta = \sqrt{2RN} \left( \frac{100}{100 - \eta} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (93)$$

где  $N$  — количество отверстий на один метр длины оплетки;  $\eta$  — плотность оплетки в процентах.

Значения  $N$  и  $\eta$  можно найти по конструктивным данным оплетки: радиусу  $R$ , числу проволок  $n$ , числу прядей  $m$ , диаметру проволоки  $d$  и шагу повива  $C$ :

$$N = \frac{m^2}{4C}; \quad (94)$$

$$\eta = \frac{ndv}{2C} \left( 2 - \frac{ndv}{2C} \right) 100. \quad (95)$$

Чтобы убедиться в справедливости сказанного относительно решающей роли отверстий, рассмотрим численный пример. Пусть экраном является медная оплетка со следующими данными:  $R = 3,4$  мм,  $n = 144$ ,  $m = 24$ ,  $d = 0,15$  мм,  $C = 21,4$  мм. Допустим сначала, что отверстия отсутствуют, точнее говоря, будем считать, что наличие отверстий приводит только к отсутствию ослабления поля при проникновении сквозь толщу экрана, так что экран работает только на отражение. Примем в первом приближении, что эффективность такой гипотетической оплетки равна эффективности некоего эквивалентного сплошного экрана с толщиной стенок  $d_s \ll \delta$ , имеющего такой же радиус  $R$  и такое же активное сопротивление на единицу длины, как оплетка.

Согласно формулам (89) и (31) при  $d \ll \delta$  эффективность экранирования с повышением частоты уменьшается. Поэтому, чтобы иметь дело с худшим случаем, выберем достаточно высокую частоту  $f = 100$  МГц ( $\lambda = 3$  м). Будем считать, что в каждой из проволок оплетки ток распределен по поверхности поперечного сечения так, как в случае, когда другие проволоки отсутствуют.

Согласно формуле (23) при  $f = 100$  МГц для меди  $\delta = 6,6 \cdot 10^{-6}$  м. Отсюда эффективная поверхность сечения одной проволоки равна  $\pi d \delta = 3,12 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>, а эффективная поверхность всех проволок —  $144 \cdot 3,12 \cdot 10^{-9} = 4,5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>. По формуле (92)  $v = \sqrt{2}$ . Так как удельная проводимость меди  $\sigma = 5,9 \cdot 10^7$  См/м, то активная проводимость единицы длины оплетки с учетом  $v$  равна  $4,5 \cdot 10^{-7} \cdot 5,9 \cdot 10^7 \frac{1}{\sqrt{2}} = 18,7$  См·м. Чтобы иметь такую

же проводимость, сплошной цилиндрический экран с радиусом 3,4 мм должен иметь произведение толщины на удельную про-

водимость материала  $\sigma d_3 = \frac{18,7}{2\pi 3,4 \cdot 10^{-3}} = 875$ . Теперь по формулам (89) и (31) эффективность такого экрана

$$\mathcal{E} = 0,16 \frac{3}{3,4 \cdot 10^{-3}} 60\pi 875 = 2,33 \cdot 10^7.$$

С другой стороны, по формуле (94)  $N = 6740$ ; по формуле (95)  $\eta = 92,5$ . В результате по формуле (93)  $\mathcal{E} = 332$ . Из сопоставления этой эффективности с полученной ранее без учета влияния отверстий решающая роль отверстий совершенно очевидна.

На эффективность экранирования поля токов плохой контакт между отдельными проволоками оплетки ока-

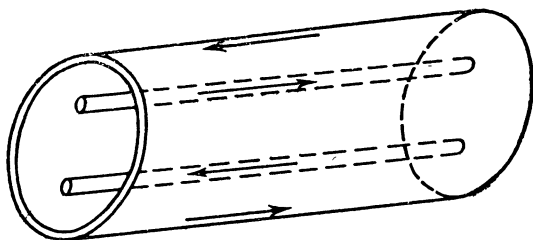


Рис. 41. Направление токов, индуцированных в сплошном цилиндрическом экране полем токов симметричной длинной линии

зывает несравненно более сильное влияние, чем на эффективность экранирования поля зарядов. Дело в том, что токи, индуцированные в сплошном цилиндрическом экране полем линейной рамки, направлены по его образующим, причем в частях экрана, расположенных по разные стороны плоскости, проходящей через его ось перпендикулярно плоскости рамки, эти токи идут в противоположные стороны (рис. 41). По оплетке с изолированными друг от друга проволоками такие пути для токов отсутствуют. В результате такая оплетка не оказывает на поле токов двухпроводной линии практически никакого экранирующего действия.

Допустим, однако, что контакт между отдельными проволоками достаточно хороший, так что протекание токов по оплетке в осевом направлении возможно. Наличие отверстий и в этом случае ограничивает эффективность экранирования величиной, которая определяется

формулой (93). На сравнительно же низких частотах эффективность экранирования оказывается еще меньшей, так как даже сплошной цилиндрический экран того же радиуса и с той же массой на единицу длины малоэффективен.

Действительно, в рассмотренном выше примере объем меди на один метр длины оплетки равен  $\frac{1}{4} \pi \cdot 1,5^2 \cdot 10^{-8} \cdot 144 \sqrt{2} =$

$= 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Толщина сплошного цилиндрического экрана с радиусом 3,4 мм и тем же объемом меди на единицу длины

$$d_s = \frac{3,6 \cdot 10^{-6}}{2\pi \cdot 3,4 \cdot 10^{-3}} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ м. Если } f = 10 \text{ кГц } (\lambda = 3 \cdot 10^4 \text{ м}),$$

то для меди согласно формуле (23)  $\delta = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , при этом экран работает только на отражение и по формулам (90) и (31) его эффективность  $\mathcal{E} = 2,3$ .

### **35. Влияние круговой щели в экране на эффективность экранирования симметричной длинной линии**

Когда экранируется длинная линия, соединяющая друг с другом два электроустройства, каждое из которых тоже экранировано, то возникает вопрос, как должны быть соединены между собою экран линии и экраны этих электроустройств. Если вдоль линии необходимо иметь разъемы, то возникает аналогичный вопрос: как надлежит соединять друг с другом экраны отрезков линии в месте разъема.

Несомненно, лучшим соединением является такое, при котором между соединяемыми экранами создается надежный электрический контакт по всему периметру сечения экрана линии. Если электроустройства заключены в сплошные экраны-коробки без отверстий и щелей, длинная линия тоже заключена в сплошной экран и обеспечено указанное выше соединение всех трех экранов, то все они образуют один сплошной экран. Соответствующим выбором материала и толщины стенок экрана (в общем случае различным для экранов электроустройств и экрана линии) его эффективность принципиально может быть сделана сколь угодно большой.

Допустим, однако, что экраны соединяемых отрезков длинной линии не соединены между собою и между ними существует щель (рис. 42, а). Через эту щель поле

экранируемой линии будет проникать в наружное пространство, и это может привести к резкому снижению эффективности экранирования. Для областей пространства, удаленных от нее на расстояние, в несколько раз большее, чем радиус экрана, рассматриваемая щель эквивалентна совокупности электрического диполя и витка с током, лежащих в той же плоскости, что и экранируемая длинная линия (рис. 42, б). Электрический и маг-

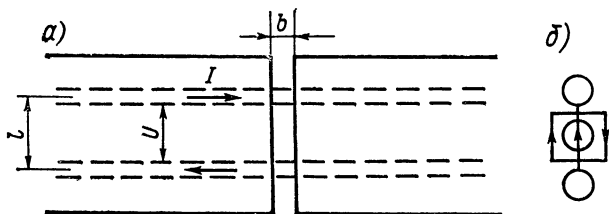


Рис. 42. Щель между экранами двух отрезков симметричной длинной линии (а) и эквивалентная ей совокупность электрического диполя и витка с током (б)

нитный моменты этого диполя и витка с током соответственно равны:

$$P = \frac{UC_0lb^2}{40R}; \quad (96)$$

$$M = \frac{IlR}{2,8 \lg \frac{2\pi^2 R}{10b}}, \quad (97)$$

где  $U$  — напряжение между проводами линии;  $I$  — ток в линии;  $C_0$  — емкость единицы длины линии;  $l$  — расстояние между проводами линии;  $R$  — радиус экрана;  $b$  — ширина (геометрическая) щели.

Пользуясь формулами (96), (97), (67), (68), (73) и (74), можно с достаточной для инженерной практики точностью найти значения электрического и магнитного векторов поля, проникшего наружу через щель.

Существенно, что с удалением от щели напряженность этого поля быстро убывает; поэтому если вблизи щели нет объектов, подлежащих защите от поля линии, то она может оказаться неопасной. Шунтирование щели четырьмя и более перемычками сильно ослабляет проникающее поле.

Все же во всех случаях, где это не приводит к недопустимым конструктивным усложнениям, следует стремиться к тому, чтобы в местах соединений обеспечивался надежный электрический контакт между экранами по всему периметру их сечения.

### **36. Рекомендации по практическому выполнению экранов симметричных длинных линий**

Из изложенного в § 32—35 вытекают следующие общие рекомендации по экранированию симметричных длинных линий.

Для экранирования можно использовать как сплошные металлические трубы, так и металлические оплетки.

При использовании металлических оплеток важно, чтобы существовал достаточно хороший электрический контакт между проволочками в местах их скрещиваний; отсутствие такого контакта практически полностью ликвидирует экранирующий эффект по отношению к магнитной составляющей поля. Чтобы рассматриваемый контакт был обеспечен, проволочки должны иметь токопроводящее антикоррозийное покрытие (цинкование, лужение) и оплетка должна быть плотно натянута.

Если требуется обеспечить эффективность экранирования, превышающую 40 дБ (ориентировочно), то рекомендуется использовать сплошные металлические трубы. Не исключено, что необходимое ослабление поля удастся обеспечить и с помощью оплетки, но выяснить это можно лишь экспериментально. Если же эксперимент поставить почему-либо невозможно, то применять оплетку не следует.

Материал и толщина стенок трубы как правило могут выбираться из конструктивных соображений. Исключение составляют случаи, когда по экранируемой линии протекает большой ток и в экране может рассеиваться относительно большая мощность (например, случай экранирования фидера высокочастотной установки промышленного назначения, связывающего генератор с рабочим местом). В таких случаях целесообразно использовать медные трубы.

Желательно, чтобы экранирующая оболочка длинной линии (оплетка или труба) по всему своему периметру



имела хороший электрический контакт с экранами (корпусами) электроустройств, которые эта линия соединяет друг с другом. Если обеспечить контакт по всему периметру по конструктивным соображениям затруднительно, то следует обеспечить контакт хотя бы в нескольких точках, расположенных более или менее равномерно по периметру. В таких случаях ширина видимых щелей между экраном линии и корпусами электроустройств должна быть по возможности не более нескольких десятых долей миллиметра.

## Глава седьмая

### ЭКРАНИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

#### 37. Сопротивление связи сплошной металлической оболочки

Когда экранируется несимметричная длинная линия, то образуются две линии: экранируемый провод — экранирующая оболочка и экранирующая оболочка — «земля». Вторая линия — внешняя — возбуждается первой линией — внутренней — через экранирующую оболочку: падение напряжения  $dU$ , создаваемое на элементе длиной  $dx$  наружной поверхности оболочки током первой линии, действует как возбуждающая э. д. с. во второй линии (рис. 43).

Процесс во второй линии, возникающий вследствие рассмотренного возбуждения, зависит от параметров этой линии и нагрузок на ее концах. Очевидно, однако, что при прочих равных условиях напряженность поля второй линии, т. е. поля снаружи экрана, в любой точке пространства пропорциональна рассмотренным выше элементарным падениям напряжения.

Между  $dU$  и током первой линии, т. е. полным током  $I$ , протекающим по экранируемому проводу и в обратном направлении по экранирующей оболочке, существует простая связь:

$$d\dot{U} = \dot{I} Z_{св} dx, \quad (98)$$

где  $Z_{св}$  — коэффициент, зависящий от свойств экранирующей оболочки, имеющий размерность сопротивления и могущий быть названным сопротивлением связи данной оболочки.

Обратим внимание на то, что, строго говоря, полный ток, протекающий по экранирующей оболочке, несколько отличается от тока в экранируемом проводе, так как по оболочке протекает и ток второй линии. Однако практически интересны лишь случаи достаточно эффективного экранирования, когда ток второй

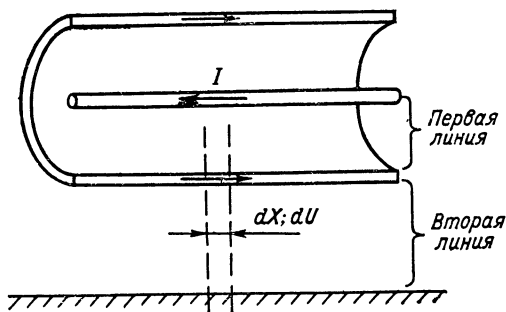


Рис. 43. Возбуждение внешней линии при экранировании несимметричной длинной линии

линии мал и им можно пренебречь по сравнению с током первой линии.

Хотя величина  $Z_{св}$  не определяет непосредственно эффективности экранирования, она является хорошим объективным показателем для сравнительной оценки качества различных экранирующих оболочек: чем меньше  $Z_{св}$ , тем лучше оболочка как экран.

Пока толщина оболочки  $d$  много меньше толщины поверхностного слоя  $\delta$ , сопротивление  $Z_{св}$  практически равно сопротивлению единицы длины этой оболочки для постоянного тока. С повышением частоты и появлением заметно выраженного поверхностного эффекта плотность тока у наружной поверхности при неизменном значении полного тока падает, а следовательно, уменьшается падение напряжения вдоль наружной поверхности, т. е. уменьшается  $Z_{св}$ . Если  $d \ll R$ , где  $R$ , как и раньше, — радиус оболочки, то с вполне достаточ-

ной для инженерной практики точностью можно считать модуль

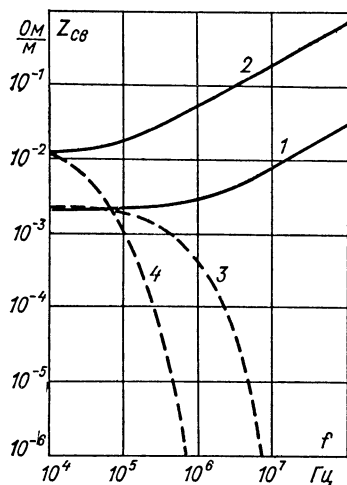
$$z_{св} = \frac{30}{R \mathcal{E}_{пл}}, \quad (99)$$

где  $\mathcal{E}_{пл}$  определяется формулой (30) или приближенно формулой (31).

Формула (99) показывает, что эффективность экранирования несимметричной длинной линии сплошной металлической оболочкой так же, как эффективность экранирования симметричной длинной линии (строго говоря, поля зарядов этой линии) и эффективность экранирования любого источника поля замкнутым экраном-коробкой без отверстий и щелей (когда в формуле (60)  $\mathcal{E} \gg \mathcal{E}_0$ ), прямо пропорциональна  $\mathcal{E}_{пл}$ .

### 38. Сопротивление связи металлической оплетки

Если экраном несимметричной длинной линии служит металлическая оплетка, то возбуждение внешней линии происходит еще за счет проникновения поля



внутренней линии через отверстия в оплетке. Однако это явление не играет существенной роли, и можно считать, что, как и в случае сплошной оболочки, важно лишь сопротивление связи.

Рис. 44. Зависимость  $z_{св}$  от частоты

1 — оплетка с  $R = 5$  мм,  $C = 32$  мм,  $d = 0,25$  мм,  $n = 240$ , медная; 2 — то же, стальная с  $\mu = 100$ ; 3 — сплошная оболочка с  $R = 5$  мм,  $d = 0,25$  мм, медная; 4 — то же, стальная с  $\mu = 110$

Пока поверхностный эффект в каждой из проволок оплетки практически не выражен, можно, ориентируясь на худший случай, когда проволоки изолированы друг

от друга, считать

$$z_{\text{св}} = R_{\text{—}} = \frac{\nu}{0,25\pi\sigma d^2 n \sqrt{\nu^2 - 1}}, \quad (100)$$

где  $\nu$  определяется по формуле (92), а  $d$  и  $n$  имеют тот же смысл, что в формуле (95).

С повышением частоты  $z_{\text{св}}$  растет. Если считать, что проволоки расположены вплотную друг к другу (хотя и не имеют электрического контакта) и на этом основании пренебречь внешней индуктивностью каждой из них, то можно найти  $z_{\text{св}}$  по формуле:

$$z_{\text{св}} = R_{\text{—}} |\alpha(u) + j\beta(u)|, \quad (101)$$

где  $\alpha(u)$  и  $\beta(u)$  имеют тот же смысл, что в формуле (85), а  $R_{\text{—}}$  — определяется по формуле (100). Не стремясь к большой точности, можно считать

$$z_{\text{св}} = \begin{cases} R_{\text{—}} & \text{при } u < 1, \\ R_{\text{—}} \frac{u}{2} & \text{при } u > 2. \end{cases} \quad (102)$$

На рис. 44 представлены графически зависимости  $z_{\text{св}}$  от частоты для двух сплошных цилиндрических оболочек и двух оплеток. Из этого рисунка ясно, что вследствие поверхностного эффекта сплошная стальная цилиндрическая оболочка с повышением частоты сначала становится таким же хорошим экраном, как медная, а потом — значительно лучшим, стальная же оплетка становится еще худшим экраном, чем медная.

### **39. Эффективность экранирования несимметричной длинной линии**

Как и в случае экрана с отверстием, поле снаружи экрана при экранировании несимметричной длинной линии оказывается не только ослабленным, но и существенно искаженным по сравнению с полем при отсутствии экрана. Однако в этом случае определение точки или области пространства, для которой эффективность экранирования имеет наименьшее значение, очень затруднено. Поэтому количественная оценка эффективности экранирования оказывается в данном случае еще более условной.

Представляется целесообразным принять в качестве количественных характеристик эффективности экранирования несимметричной длинной линии следующие две величины: 1) отношение напряжения на внутренней линии (между экранируемым проводом и экранирующей оболочкой), определенного в предположении, что в ней имеет место режим бегущей волны и нет потерь, к наибольшему напряжению на внешней линии (между экранирующей оболочкой и землей); 2) отношение тока во внутренней линии к наибольшему току во внешней линии. Первое из этих отношений назовем эффективностью экранирования по электрическому полю  $\mathcal{E}_э$ , а второе — эффективностью экранирования по магнитному полю  $\mathcal{E}_м$ .

Если внешняя линия «заземлена» (соединена с поверхностью нулевого потенциала) на одном конце и изолирована от «земли» на другом, то эффективность экранирования по электрическому полю определяется формулами (103), а по магнитному полю — формулами (104):

$$\mathcal{E}_э = \begin{cases} \frac{z_{01}}{z_{св}l} & \text{при } l \ll 0,25\lambda, \\ \frac{z_{01}}{z_{св}l} \kappa_1(\gamma_2 l) & \text{при } l \geq 0,25\lambda; \end{cases} \quad (103)$$

$$\mathcal{E}_м = \begin{cases} 2 \frac{z_{02}}{z_{св}l} \frac{\lambda}{2\pi l} & \text{при } l \ll 0,25\lambda, \\ \frac{z_{02}}{z_{св}l} \kappa_1(\gamma_2 l) & \text{при } l \geq 0,25\lambda. \end{cases} \quad (104)$$

В этих формулах  $l$  — длина линии;  $z_{01}$  и  $z_{02}$  — волновые сопротивления внутренней и внешней линий;  $\gamma_2$  — постоянная распространения внешней линии;

$$\kappa_1(\gamma_2 l) = |1 + e^{-2\gamma_2 l}|. \quad (105)$$

Если внешняя линия «заземлена» на обоих концах, то

$$\mathcal{E}_э = \begin{cases} 8 \frac{z_{01}}{z_{св}l} \frac{\lambda}{2\pi l} & \text{при } l \ll 0,25\lambda, \\ \frac{z_{01}}{z_{св}l} \kappa_2(\gamma_2 l) & \text{при } l \geq 0,25\lambda; \end{cases} \quad (106)$$

$$\mathcal{E}_m = \begin{cases} \frac{z_{02}}{z_{св}l} \frac{2\pi l}{\lambda} & \text{при } l \ll 0,25\lambda, \\ \frac{z_{02}}{z_{св}l} \kappa_2(\gamma_2 l) & \text{при } l \geq 0,25\lambda. \end{cases} \quad (107)$$

В формулах (106) и (107)

$$\kappa_2(\gamma_2 l) = |1 - e^{-2\gamma_2 l}|, \quad (108)$$

а остальные обозначения прежние.

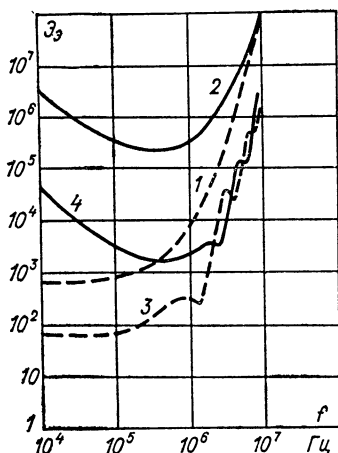


Рис. 45. Зависимость  $\mathcal{E}_3$  от частоты при экранировании несимметричных длинных линий свинцовой оболочкой

1 — длина линии 5 м, «заземление» оболочки на одном конце; 2 — то же, «заземление» на обоих концах; 3 — длина линии 50 м, «заземление» оболочки на одном конце; 4 — то же, «заземление» на обоих концах

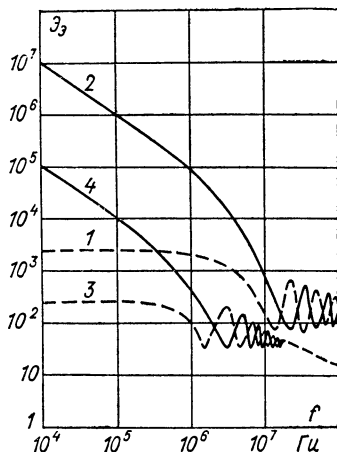


Рис. 46. Зависимость  $\mathcal{E}_3$  от частоты при экранировании несимметричных длинных линий медной оплеткой

1 — длина линии 5 м, «заземление» оболочки на одном конце; 2 — то же, «заземление» на обоих концах; 3 — длина линии 50 м, «заземление» оболочки на одном конце; 4 — то же, «заземление» на обоих концах

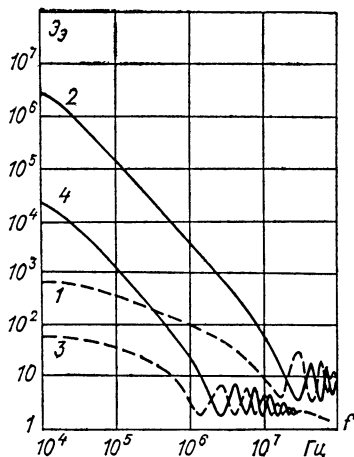
На рис. 45—47 показан порядок величины  $\mathcal{E}_3$  и характер ее зависимости от частоты при экранировании несимметричных длинных линий свинцовой оболочкой, медной и стальной оплетками.

Анализ приведенных формул и графиков позволяет сделать следующие общие выводы.

В области частот порядка  $10^5$  Гц и ниже все три рассмотренные экранирующие оболочки обеспечивают эф-

эффективность экранирования одного и того же порядка, обратно пропорциональную сопротивлению единицы длины оболочки для постоянного тока. С повышением частоты сплошная оболочка обеспечивает гораздо лучшее экранирование, чем оплетки.

При  $l \ll 0,25\lambda$  эффективность экранирования существенно зависит от «заземления» экранирующей оболочки:



эффективность экранирования по электрическому полю значительно выше при «заземлении» на обоих концах, а эффективность экранирования по магнитному полю, наоборот, зна-

Рис. 47. Зависимость  $\mathcal{E}_z$  от частоты при экранировании несимметричных длинных линий оплеткой из стали с  $\mu=100$   
1 — длина линии 5 м, «заземление» оболочки на одном конце; 2 — то же, «заземление» на обоих концах; 3 — длина линии 50 м, «заземление» оболочки на одном конце; 4 — то же, «заземление» на обоих концах

чительно выше при «заземлении» на одном конце. При  $l \geq 0,25\lambda$  величины  $\mathcal{E}_z$  и  $\mathcal{E}_m$  оказываются одного порядка и, если не принимать во внимание резонансных явлений, а интересоваться лишь средними значениями, не зависят от того, заземлен экран на одном или на обоих концах линии.

#### 40. Влияние круговой щели на эффективность экранирования несимметричной длинной линии

По тем же причинам, что при экранировании симметричных двухпроводных линий, при экранировании несимметричных линий представляет интерес влияние круговой щели в экране на эффективность экранирования. Такая щель в данном случае резко снижает эффективность экранирования, сводя ее практически к единице.

Причину этого легко понять, обратившись к рис. 48, где представлены генератор и нагрузка, заключенные в экраны-коробки, и связывающая их несимметричная длинная линия, заключенная в сплошную цилиндрическую оболочку. Оболочка по всему периметру сечения надежно электрически соединена с коробками, образуя с ними единый экран без отверстий и щелей за исключением одной круговой щели в оболочке.

Будем считать, что толщина стенок экрана много больше толщины поверхностного слоя, так что при от-

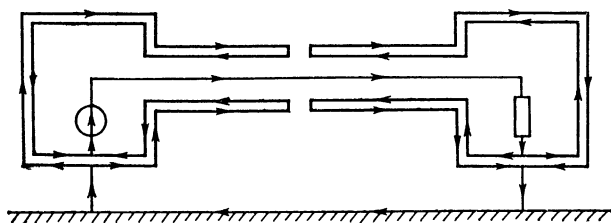


Рис. 48. Путь тока по внутренней и наружной поверхностям экранирующей оболочки при наличии в ней круговой щели

сутствии круговой щели ток практически протекал бы лишь по тонкому слою вблизи внутренней поверхности оболочки. Щель перерезает этот путь; в результате ток переходит в щели с внутренней поверхности оболочки на ее наружную поверхность, течет по ней, затем по «земле», опять по наружной поверхности оболочки и по другому краю щели вновь возвращается на внутреннюю поверхность. Таким образом, по наружной поверхности и «земле» протекает весь ток экранируемой линии.

Если длина линии соизмерима с длиной волны, то во внешней линии могут возникать резонансные явления, существенно усложняющие описанную выше картину. Может быть нарушен даже режим работы экранируемой системы.

Чтобы избежать этих нежелательных явлений необходимо ликвидировать круговую щель. Лучше всего обеспечить надежный электрический контакт между частями оболочки по всему периметру сечения. Если это невозможно, то следует зашунтировать щель одной или



несколькими токопроводящими перемычками. В таком случае ток, протекающий по внутренней поверхности оболочки, замкнется через перемычки.

Очевидно, что падение напряжения на перемычке  $U_{\pi} = z_{\pi} I$ , где  $z_{\pi}$  — сопротивление перемычки — играет роль возбуждающей э. д. с. во внешней линии. Если  $z_{\pi}$  одного порядка с  $z_{\text{св}} l$  или больше, то, как правило, никаким улучшением конструкции оболочки нельзя существенно повысить эффективность экранирования. Чтобы щель не ухудшала эффективности экрана, сопротивление  $z_{\pi}$  должно быть не больше, чем  $z_{\text{св}} l$ .

На практике, как правило,  $z_{\pi}$  можно принять равным индуктивному сопротивлению перемычки  $\omega L_{\pi}$ . Индуктивность  $L_{\pi}$  в случае, если длина перемычки  $l$  превышает несколько мм, может быть найдена как индуктивность прямолинейного проводника такой же длины. Приближенно

$$L_{\pi} = (5 \div 10) l 10^{-7}, \text{ Г.} \quad (109)$$

Однако индуктивность очень коротких перемычек, длина которых равна геометрической ширине щели, оказывается значительно большей, чем найденная по формуле (109). Дело в том, что щель с такой перемычкой в известной степени подобна щели с электрической шириной  $b = 2\pi R$  в плоском экране (см. § 28); если электрическая длина щели, которая в данном случае совпадает с ее геометрической шириной, много меньше  $b$ , то с дальнейшим ее уменьшением магнитный поток, проникающий из экрана через эту щель, убывает очень медленно.

#### **41. Рекомендации по практическому выполнению экранов несимметричных длинных линий**

Из изложенного в § 37—40 вытекают следующие общие рекомендации по экранированию несимметричных длинных линий.

Для экранирования можно использовать как сплошные металлические трубы, так и металлические оплетки.

При использовании металлических оплеток контакт между проволочками в местах их скрещиваний значительно менее важен, чем при экранировании симметрич-

ной длинной линии; поэтому могут использоваться не-  
луженные медные оплетки. Все же если требуется эффек-  
тивность экранирования, превышающая 40 дБ, то без  
экспериментальной проверки использовать оплетку не  
следует.

Материал оплетки, а также материал и толщина  
стенок трубы должны выбираться с учетом их допусти-  
мого влияния на экранируемую систему, так как весь  
обратный ток линии протекает по экранирующей обо-  
лочке, и если это рабочий ток, то сопротивление экрана  
должно быть малым.

Особенно важно, чтобы был обеспечен надежный элек-  
трический контакт между экраном линии и экранами  
(корпусами) электроустройств, к которым она подходит.  
Если нужна высокая эффективность экранирования  
(40 дБ и более), то следует обеспечивать тщатель-  
ный электрический контакт по всему периметру экрана  
линии. Если обеспечить такое соединение почему-либо  
невозможно, то следует обеспечить электрический кон-  
такт в двух-трех точках по периметру.

Надо стремиться к тому, чтобы ширина видимых ще-  
лей между экраном линии и корпусами электроустройств  
не превышала нескольких десятых долей мм.

Если экранированная несимметричная длинная ли-  
ния лежит на хорошо проводящей поверхности, которую  
можно считать «землей» (например, металлический кор-  
пус корабля), то рекомендуется тщательно электрически  
соединять экран с этой поверхностью через интервалы  
порядка 0,1 минимальной длины волны того диапазона,  
в котором должно быть обеспечено эффективное экрани-  
рование.

## Глава восьмая

### **ВЛИЯНИЕ ЭКРАНА НА ЭКРАНИРУЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПОЛЯ**

#### **42. Общие соображения о влиянии экрана на источник поля**

В § 7 уже отмечалось, что экран может оказывать более или  
менее сильное нежелательное воздействие как на источник поля,  
так и на защищаемый объект. По этому вопросу целесообразно  
высказать следующие дополнительные соображения.

На пассивный объект, т. е. на электрическую схему, которая сама не создает электромагнитного поля, экран может оказывать только защитное, экранирующее действие. Поэтому, говоря о возможном нежелательном воздействии на защищаемый объект, предполагают, что этот объект сам тоже является источником или потенциальным источником поля, защищается же он с помощью экрана от другого, стороннего поля.

Пусть, например, экран предназначен для защиты катушки. Отключим эту катушку от внешней цепи; тогда ток в ней, если пренебречь ее собственной емкостью и емкостью относительно экрана, будет равен нулю, несмотря на э. д. с., индуцированную сторонним полем. Экран уменьшит эту э. д. с. ровно во столько раз, во сколько он ослабит поле в том месте, где расположена катушка. Это защитное действие. Никакого другого действия в данном случае нет.

Подключим теперь к рассматриваемой катушке генератор э. д. с. Ток, созданный этим генератором, с появлением экрана изменится. Мы объясняем отмеченное изменение тем, что экран вносит в катушку некоторое комплексное сопротивление. Но это лишь удобный способ рассуждения. Известно, что физическое существо явления заключается в том, что вторичное поле зарядов и токов, индуцированных на поверхности и в толще стенок экрана полем катушки, обратно воздействует на катушку и индуцирует в ней дополнительную э. д. с., которая складывается с э. д. с. генератора, что и приводит к изменению тока.

Аналогичные явления будем наблюдать, если подключим к катушке пассивную внешнюю цепь и ток в ней будет создаваться под действием э. д. с., индуцированной сторонним полем. Изменяя это поле так, чтобы э. д. с. оставалась одной и той же при отсутствии и при наличии экрана, получим в этих двух случаях разные токи, так как поле катушки будет действовать на экран, а возникающее вследствие этого вторичное поле будет обратно действовать на катушку.

В общем случае как активная, так и реактивная составляющая сопротивления, вносимого экраном в схему — источник (или потенциальный источник) поля, — зависит от частоты, причем реактивная составляющая не соответствует совокупности некоторых частотно-независимых индуктивности и емкости. Однако в частных случаях в ограниченном диапазоне частот можно говорить о практически постоянной вносимой индуктивности и емкости. Так, например, при экранировании однослойной цилиндрической катушки без сердечника с радиусом  $r_k$  и длиной  $l_k > 0,8 r_k$  шаровым экраном с радиусом  $R \gg l_k$  и толщиной стенок  $d > \delta$ , изготовленным из немагнитного материала, в диапазоне частот, лежащих много ниже собственной частоты этой катушки, можно считать, что экран вносит в катушку частотно-независимую индуктивность (оказывает на нее размагничивающее действие)

$$L_{\text{вн}} = -L_k 5 \cdot 10^{-2} \left( \frac{r_k}{R} \right)^3 \left( 9 + \frac{10 l_k}{r_k} \right), \quad (110)$$

где  $L_k$  — индуктивность катушки без экрана.

С увеличением размеров экрана и соответствующим удалением его стенок от расположенного внутри его источника поля вносимое сопротивление уменьшается, однако лишь при условии, что полость экрана далека от резонанса. Вблизи резонансных частот влияние экрана на источник поля может сильно возрасти. В отдельных случаях с этим явлением необходимо считаться.

Иногда оказывается, что схема — источник поля — располагается вблизи других электрических схем или металлических конструкций, которые вносят в нее большие сопротивления и ухудшают ее параметры. Если же экранировать эту схему, то указанное влияние будет практически устранено: сопротивление в рассматриваемую схему будет вноситься только экраном. При соответствующем конструктивном выполнении экрана это сопротивление может оказаться существенно меньшим, чем сопротивление, вносимое при отсутствии экрана, и параметры схемы улучшатся. Кроме того, они будут более стабильны.

Иллюстрацией сказанного может служить так называемый спиральный резонатор. В дециметровом диапазоне использование обычных колебательных контуров затруднено, а полые резонаторы, имеют относительно большие размеры. Можно использовать в качестве колебательной системы катушку, работающую на своей собственной частоте. Нетрудно изготовить катушку с добротностью порядка нескольких сотен, но активные сопротивления, вносимые окружающими элементами конструкции прибора, уменьшают ее во много раз. Кроме того, емкость катушки относительно этих элементов делает ее собственную частоту неопределенной и нестабильной. Заклучение в экран с посеребренной внутренней поверхностью устраняет оба эти недостатка: экранированная катушка оказывается высокодобротной колебательной системой с достаточно стабильной частотой настройки.

### 43. Потери в экране

Активное сопротивление  $R_{\text{вн}}$ , вносимое экраном в схему — источник (или потенциальный источник) поля, — связано с мощностью  $P$ , рассеиваемой в экране, простой формулой:

$$P = I^2 R_{\text{вн}}, \quad (111)$$

где  $I$  — ток в схеме (в том ее месте, в котором предполагается включенным  $R_{\text{вн}}$ ).

Подобно эффективности экранирования мощность  $P$  и соответственно сопротивление  $R_{\text{вн}}$  могут быть найдены достаточно точно лишь в некоторых простейших случаях, в большинстве же случаев практики определить их можно лишь очень приближенно. Поэтому при проектировании приходится в дополнение к ориентировочному расчету прибегать к эксперименту или пользоваться

ранее накопленными опытными данными. Когда же таких данных нет, а постановка эксперимента затруднена, необходимо обеспечивать при расчете достаточно большой «запас прочности».

В случае экранирования шаровым экраном с радиусом  $R$  элементарной рамки с током (магнитного диполя), расположенной в его центре, мощность потерь в экране при  $R \ll \lambda/(2\pi)$  с большой точностью определяется формулой:

$$P = 24\pi \frac{M^2}{R^4 \sigma} \times \begin{cases} 1/d & \text{при } d < 0,1\delta, \\ 1/\delta & \text{при } d > \delta, \end{cases} \quad (112)$$

где  $M$  — момент рамки.

Эта формула может быть использована также при экранировании катушки без сердечника с конечным радиусом  $r_k$  и длиной  $l_k$ , если оба эти размера много меньше чем  $R$ . Момент  $M$  в этом случае определяется формулой:

$$M = \frac{Nr_k^2 I}{4}, \quad (113)$$

где  $N$  — число витков;  $I$  — ток в катушке.

Для многослойной катушки с внутренним и внешним радиусами  $r_{k1}$  и  $r_{k2}$  в формуле (113) следует считать

$$r_k^2 = \frac{1}{3} (r_{k1}^2 + r_{k1}r_{k2} + r_{k2}^2). \quad (114)$$

Чем ближе  $r_k$  и  $l_k$  к  $R$ , тем больше погрешность расчета по формуле (112).

В случае цилиндрического экрана с радиусом  $r_s$  и высотой  $l_s$  можно пользоваться формулой (112), подставив в нее радиус эквивалентного по объему шарового экрана

$$R = \sqrt[3]{0,75 r_s^2 l_s}, \quad (115)$$

а в случае экрана — параллелепипеда с размерами  $a \times b \times c$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3abc}{4\pi}}. \quad (116)$$

В обоих последних случаях точность расчета еще более уменьшается.

Найдя  $P$ , можно определить

$$R_{\text{вн}} = \frac{P}{I^2}. \quad (117)$$

Из (117), (112) и (113) следует, что

$$R_{\text{вн}} = 1,5\pi N^2 \left(\frac{r_{\text{к}}}{R}\right)^4 \frac{1}{\sigma} \times \begin{cases} 1/d & \text{при } d < 0,1\delta, \\ 1/\delta & \text{при } d > \delta. \end{cases} \quad (118)$$

На практике, как правило, интересна не непосредственно величина активного сопротивления, вносимого в экранируемую катушку, а вызываемое экраном уменьшение добротности  $Q$  или увеличение затухания  $\vartheta = \frac{1}{Q}$  с учетом размагничивающего действия (см. § 42). При отсутствии экрана затухание катушки

$$\vartheta_{\text{к}} = \frac{R_{\text{к}}}{\omega L_{\text{к}}}, \quad (119)$$

где  $R_{\text{к}}$  — ее собственное активное сопротивление.

При наличии экрана

$$\vartheta = \frac{R_{\text{к}} + R_{\text{вн}}}{\omega (L_{\text{к}} + L_{\text{вн}})} = \vartheta_{\text{к}} \frac{1 + \frac{\vartheta_{\text{вн}}}{\vartheta_{\text{к}}}}{1 + \frac{L_{\text{вн}}}{L_{\text{к}}}}, \quad (120)$$

где

$$\vartheta_{\text{вн}} = \frac{R_{\text{вн}}}{\omega L_{\text{к}}}. \quad (121)$$

Если  $\vartheta_{\text{вн}} \ll \vartheta_{\text{к}}$  и  $|L_{\text{вн}}| \ll L_{\text{к}}$ , то вместо (120) можно принять:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{к}} \left( 1 + \frac{\vartheta_{\text{вн}}}{\vartheta_{\text{к}}} - \frac{L_{\text{вн}}}{L_{\text{к}}} \right). \quad (122)$$

Для однослойной цилиндрической катушки без сердечника с  $l_{\text{к}} > 0,8 r_{\text{к}}$  при  $d > \delta$  можно считать

$$\vartheta_{\text{вн}} = 37,4 \frac{r_{\text{к}}^2 (9r_{\text{к}} + 10l_{\text{к}})}{R^4 \sqrt{\sigma f}}. \quad (123)$$

Последняя формула с учетом (110) позволяет переписать (122) в виде:

$$\vartheta = \vartheta_k \left[ 1 + 37,4 \frac{r_k^2 (9r_k + 10l_k)}{\vartheta_k R^4 \sqrt{\sigma f}} + 5 \cdot 10^{-2} \left( \frac{r_k}{R} \right)^3 \left( 9 + 10 \frac{l_k}{r_k} \right) \right]. \quad (124)$$

Обратимся к численному примеру. Пусть  $l_k = r_k = 1$  см,  $\vartheta_k = 10^{-2}$ ,  $R = 2$  см,  $\sigma = 5,9 \cdot 10^7$  См/м (медь),  $f = 1$  МГц. Тогда по формуле (124)

$$\vartheta = 10^{-2} (1 + 5,8 \cdot 10^{-2} + 12 \cdot 10^{-2}) = 1,18 \cdot 10^{-2}.$$

Экран в данном случае увеличивает затухание приблизительно на 18%, причем в основном не за счет вносимого активного сопротивления, а за счет уменьшения индуктивности. С уменьшением собственного затухания катушки относительная роль  $R_{вн}$  возрастает. С увеличением радиуса экрана  $\vartheta$  быстро приближается к  $\vartheta_k$ , причем относительная роль  $R_{вн}$  уменьшается.

## Глава девятая

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНОВ

#### 44. Измерение эффективности экранирования источников поля

Как правило, при экранировании источников электромагнитного поля, например для подавления промышленных радиопомех или для защиты персонала, обслуживающего промышленные высокочастотные установки, основной интерес представляет не эффективность экрана, а напряженность остаточного поля. Поэтому, спроектировав и построив экран (экранирующий корпус электроустройства), ограничиваются измерением напряженности этого поля в соответствующем диапазоне частот на расстоянии от источника и при ориентации измерительной антенны, оговоренных действующими техническими документами (ТУ, нормами, ГОСТ).

Если, однако, проводится исследование с целью определения фактической эффективности экрана и степени соответствия ее расчетной, то должны быть выполнены измерения напряженности поля, создаваемого данным источником при отсутствии и при наличии экрана. К сожалению, такие измерения далеко не всегда возможны: если устройство спроектировано и построено, то экран обычно составляет его неотъемлемую (несъемную)

часть. Если, однако, эта трудность может быть преодолена, то остаются три другие.

Вследствие того что экран не только ослабляет, но в общем случае и существенно искажает поле источника, эффективность экранирования оказывается для различных точек пространства различной (см. § 3). Поэтому измерения должны быть выполнены в ряде точек вокруг источника. Количество этих точек и их координаты следует выбирать, сообразуясь с характером источника и конструкцией экрана. Общий рецепт здесь невозможен.

При каждом измерении антенна должна ориентироваться так, чтобы показания измерительного прибора были максимальны. Без экрана и с экраном эта ориентация может быть различна.

Измерения должны быть выполнены с помощью как открытой, так и рамочной измерительных антенн, чтобы иметь возможность определить эффективность экрана по отношению как к электрической, так и к магнитной составляющей поля.

Вторая трудность состоит в том, что сама измерительная аппаратура может исказить исследуемое поле. Чтобы оценить степень влияния этого искажения на результаты измерения, целесообразно выполнить несколько измерений при различных расположениях корпуса измерителя относительно антенны (если они конструктивно не связаны жестко друг с другом).

Третья трудность состоит в том, что в ряде случаев напряженность поля, создаваемого данным источником, зависит от многих случайных факторов и сама поэтому является случайной величиной. В таких случаях измерения в каждой точке должны производиться многократно и эффективность экранирования должна определяться как отношение полученных средних значений напряженности поля без экрана и с экраном.

## **45. Измерение эффективности экранирования лабораторных и производственных помещений**

При испытании экранов лабораторных и производственных помещений может представлять интерес как остаточное поле внутри или вне этого помещения, так и обеспечиваемая эффективность экранирования.

Остаточное поле внутри экранированного помещения характеризует пригодность этого помещения для проведения в нем работ с высокочувствительной аппаратурой. Однако эта характеристика является достаточно полной лишь при условии, что нет оснований ожидать появления вне этого помещения какого-либо нового, более мощного источника поля, из-за чего напряженность поля в помещении может возрасти и превысить допустимое значение.

Измерение остаточной напряженности поля рекомендуется производить в нескольких точках помещения (на предполагаемых рабочих местах) как с открытой (в соответствии с возможностью размещения), так и с рамочной антенной при ориентации этих антенн, приводящей к наибольшим показаниям измерительного прибора.



Во время измерений должна быть по возможности создана наиболее неблагоприятная обстановка вне экранированного помещения: включено возможно большее количество наиболее интенсивных источников полей, могущих одновременно работать в практических условиях эксплуатации. Особое внимание должно быть уделено измерению напряженности поля радиовещательных передатчиков.

Следует помнить, что повышенное остаточное поле внутри экранированного помещения может быть следствием недостаточной эффективности не экрана, а фильтров, включенных в провода, входящие извне в данное помещение. Поэтому прежде чем приступить к измерению остаточной напряженности поля, необходимо измерить остаточные высокочастотные напряжения между каждым из проводов, входящих в помещение, и экраном и убедиться в том, что они не превышают допустимых значений.

Если помещение экранируется с целью локализации полей, создаваемых источниками, расположенными внутри его, то остаточное поле должно измеряться снаружи. При этом источники должны работать в режиме, при котором напряженность создаваемого ими поля максимальна. Точки измерения и типы измерительных антенн должны выбираться и измерения должны производиться в соответствии с действующими техническими документами (ТУ, нормами, ГОСТ), регламентирующими подавление электромагнитных полей, создаваемых источниками данного типа.

Труднее выполнить измерения, имеющие целью определение действительной эффективности экранирования. Если эффективность экранирования относительно невелика, то она может быть определена путем измерения напряженности поля радиовещательных передатчиков вне и внутри экранированного помещения. Измерение вне помещения должно быть выполнено в нескольких точках отдельно с помощью открытой антенны и с помощью рамки. Обе антенны должны быть ориентированы так, чтобы показания измерительного прибора были максимальны. Результаты измерения в различных точках должны быть усреднены для каждой из антенн в отдельности.

Измерения внутри помещения должны быть выполнены в нескольких точках тоже с помощью двух типов антенн. Должны быть взяты наибольшие из результатов измерений для каждой из антенн.

Эффективность экранирования для электрической и магнитной составляющих поля может быть найдена как отношение усредненных результатов измерения вне помещения к наибольшему из результатов измерения внутри помещения с помощью открытой и рамочной антенн соответственно.

Если эффективность экранирования велика (превышает 50—60 дБ), то для ее измерения может понадобиться специальный источник поля — генератор соответствующего диапазона мощностью до нескольких десятков Вт, а возможно, и больше. Может быть использован и какой-либо существующий генератор соответствующей мощности и диапазона.

Измерения должны производиться при расположении генератора в различных точках относительно экранированного

помещения на расстоянии (желательно), не менее чем в два-три раза превышающем наибольший из его линейных размеров. Он должен работать как на открытую антенну, так и на рамку. Соответственно измерение внутри экранированного помещения следует производить на открытую антенну и на рамку.

Результаты измерений внутри помещения в худшей точке при наихудшем расположении генератора (при наибольшем поле внутри помещения) следует сравнивать с наибольшей напряженностью поля, создаваемого генератором на таком же расстоянии (между антеннами) вне экрана. Эффективность экранирования следует определять отдельно для открытых и рамочных антенн.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. (Пер. с нем.) М.-Л., Госэнергоиздат, 1957. 327 с. с ил.
2. Гроднев И. И., Сергейчук К. Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. М., Связьиздат, 1960. 316 с. с ил.
3. Туровский Я. Техническая электродинамика. (Пер. с польск.) М., «Энергия», 1974. 488 с. с ил.
4. Лютов С. А. Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними. М.-Л., Госэнергоиздат, 1951. 240 с. с ил.
5. Рогинский В. Ю. Экранирование в радиоустройствах. Л., «Энергия», 1970. 111 с. с ил.
6. Волин М. Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. М., «Советское радио», 1972. 280 с. с ил.
7. Конторович М. И. Об экранирующем действии замкнутых сеток. — ЖТФ, 1939, т. 9, вып. 24, с. 2195—2210 с ил.
8. Мойжес Б. Я. Расчет некоторых устройств из сеток. — ЖТФ, 1950, т. 20, вып. 6. с. 716 с ил.
9. Листов В. Н. Курс многочастотной проводной связи. Л.-М., ОНТИ, 1932. 396 с.
10. Справочник по радиотехнике. Под ред. Б. А. Смиренина. М.-Л., Госэнергоиздат, 1950. 784 с. с ил.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава первая. Общие сведения об электромагнитных экранах</b>	<b>5</b>
1. Определение термина «электромагнитный экран» . . . .	—
2. Принцип действия электромагнитного экрана . . . .	—
3. Количественная оценка эффективности экрана . . . .	7
4. Зависимость эффективности экрана от характера источника поля; виды экранов . . . . .	8
5. Резонансные явления при экранировании . . . . .	10
6. Обратимость экрана . . . . .	—
7. Реакция экрана на источник электромагнитного поля и защищаемый объект . . . . .	11
<b>Глава вторая. Экранирование полупространства от плоской электромагнитной волны бесконечным плоским экраном . . . . .</b>	<b>12</b>
8. Отражение плоской электромагнитной волны от плоской проводящей поверхности . . . . .	—
9. Проникновение плоской электромагнитной волны в толщу проводника; поверхностный слой . . . . .	16
10. Эффективность бесконечного однородного плоского экрана. Расчетные формулы . . . . .	18
11. Отражение электромагнитной волны от поверхности экрана и ослабление ее при проникновении сквозь толщу стенки . . . . .	21
12. Сравнение различных металлов как материалов для экрана. Рекомендации по выбору материала для экрана . . . . .	24
13. Эффективность двухстенного экрана. Рекомендации по применению двухстенного экрана . . . . .	25
14. Эффективность биметаллического экрана . . . . .	28
<b>Глава третья. Экранирование электрического диполя замкнутым экраном . . . . .</b>	<b>29</b>
15. Явления, возникающие при внесении проводника в электростатическое поле . . . . .	—
16. Экранирование электрического диполя при частоте, равной нулю . . . . .	30
17. Экран и заземление . . . . .	32
18. Зависимость эффективности экранирования электрического диполя от частоты . . . . .	33
19. Эффективность экранирования элементарного электрического диполя шаровым экраном. Расчет эффективности экранирования открытого излучателя реальным экраном . . . . .	35

<b>Глава четвертая. Экранирование витка с током замкнутым экраном . . . . .</b>	<b>38</b>
20. Экранирование витка с током при частоте, равной нулю	—
21. Зависимость эффективности экранирования витка с током от частоты . . . . .	41
22. Эффективность экранирования элементарного магнитного диполя шаровым экраном. Расчет эффективности экранирования замкнутого излучателя реальным экраном .	44
23. Сравнение эффективностей экранирования элементарных электрического и магнитного диполей . . . . .	45
24. Общие выводы об эффективности экранирования источников электромагнитных полей замкнутыми экранами. Расчет эффективности реальных замкнутых экранов . .	47
<b>Глава пятая. Влияние отверстий и щелей на работу экрана .</b>	<b>49</b>
25. Общие соображения о влиянии отверстий и щелей на работу электромагнитного экрана и об оценке этого влияния . . . . .	—
26. Общие соображения о проникновении электромагнитного поля через малое отверстие в бесконечно тонком идеально проводящем экране . . . . .	50
27. Проникновение квазистатического поля через малое отверстие в бесконечно тонком идеально проводящем экране . . . . .	52
28. Проникновение квазимагнитоэлектростатического поля через малое отверстие в бесконечно тонком идеально проводящем экране . . . . .	56
29. Влияние толщины стенок экрана на проникновение электромагнитного поля через отверстия . . . . .	63
30. Расчет эффективности экранов с отверстиями и щелями. Соображения по конструированию таких экранов . . .	66
31. Эффективность экранов из металлической сетки. Соображения по использованию таких экранов . . . . .	71
<b>Глава шестая. Экранирование симметричных длинных линий</b>	<b>76</b>
32. Общие соображения об экранировании длинных линий .	—
33. Эффективность экранирования симметричной длинной линии сплошным цилиндрическим экраном . . . . .	77
34. Эффективность экранирования симметричной длинной линии металлической оплеткой . . . . .	81
35. Влияние круговой щели в экране на эффективность экранирования симметричной длинной линии . . . . .	85
36. Рекомендации по практическому выполнению экранов симметричных длинных линий . . . . .	87
<b>Глава седьмая. Экранирование несимметричных длинных линий . . . . .</b>	<b>88</b>
37. Сопротивление связи сплошной металлической оболочки	—
38. Сопротивление связи металлической оплетки . . . . .	90
39. Эффективность экранирования несимметричной длинной линии . . . . .	91

40. Влияние круговой щели на эффективность экранирования несимметричной длинной линии . . . . .	94
41. Рекомендации по практическому выполнению экранов несимметричных длинных линий . . . . .	96
<b>Глава восьмая. Влияние экрана на экранируемый источник поля . . . . .</b>	<b>97</b>
42. Общие соображения о влиянии экрана на источник поля —	
43. Потери в экране . . . . .	99
<b>Глава девятая. Измерение эффективности экранов . . . .</b>	<b>102</b>
44. Измерение эффективности экранирования источников поля . . . . .	—
45. Измерение эффективности экранирования лабораторных и производственных помещений . . . . .	103
Список литературы . . . . .	106

**Давид Наумович Шапиро**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ЭКРАНИРОВАНИЯ**

Редактор В. В. Лебедева

Художественный редактор Г. А. Гудков

Технический редактор О. С. Житникова

Корректор И. М. Игошина

Сдано в набор 17/II 1975 г. Подписано к печати 8/V  
1975 г. М-23846. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская  
№ 3. Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,6. Тираж 10 000.  
Заказ 332. Цена 33 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия».  
192041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете Совета Министров СССР по  
делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
196126, Ленинград, Ф-126, Социалистическая ул., 14.



**Издательство «ЭНЕРГИЯ»**

---

### **ГОТОВЯТСЯ К ИЗДАНИЮ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ**

**Друзин Я. В., Коганер С. Э. Телевизионные системы отображения информации.** Объем 7 л. с ил. (Б-ка по автоматике). Ориентировочная цена 37 к.

В книге рассматриваются принципы построения многофункциональных телевизионных индукторов, являющихся связующим звеном между человеком и сложной системой управления или вычислительной машиной. Анализируются особенности проектирования и практического применения телевизионных систем отображения. Приводятся примеры подобных устройств в СССР и за рубежом.

Книга рассчитана на инженеров и техников, работающих в области проектирования и эксплуатации электронных устройств отображения информации и автоматических систем управления, а также на студентов вузов электро- и радиотехнических специальностей.





Издательство «ЭНЕРГИЯ»

---

### ГОТОВЯТСЯ К ИЗДАНИЮ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ

Бочкарев Б. А., Бочкарева В. А. **Керметные пленки.** Объем 10 л. с ил. (Б-ка радиотехнолога). Ориентировочная цена 55 к.

В книге систематизированы сведения по керметным пленкам, представляющим собой микрокомпозицию частиц проводника и диэлектрика. Подробно изложены принципы и техника получения керметных пленок, а также их свойства. Приводятся оригинальные элементы и конструкции устройств для промышленного изготовления керметных пленок с воспроизводимыми характеристиками. Описаны принципы разработки составов, обеспечивающих получение пленок с заданными характеристиками. Рассмотрены примеры изготовления керметных непроволочных резисторов.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занятых разработкой и производством различных электронных устройств. Она будет полезна студентам вузов соответствующих специальностей.

**Цена 33 коп.**