

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.В. ВИННИКОВ

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ
И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭКРАНОВ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Санкт – Петербург
2006

Утверждено редакционно-издательским советом университета
УДК 621.396.6

Винников В.В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов: Учеб. пособие - СПб.:

Изд-во СЗТУ, 2006.- 164 с.

Учебное пособие разработано в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 654300 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» (специальность 210201 (200800) – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»).

В учебном пособии рассматриваются вопросы, связанные с электромагнитной совместимостью, внешней и внутренней электромагнитной обстановкой, а также принципы экранирования, эффективность экранирования, особенности конструирования электромагнитных экранов и методики расчета их эффективности.

Учебное пособие предназначено для студентов шестого курса, изучающих дисциплину «Основы проектирования РЭС».

Р е ц е н з е н т ы: В.И.Соколов – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лабораторией физико-технического института РАН; А.Е.Калмыков – канд. физ.-мат. наук, с.н.с. физико-технического института РАН

© Северо–Западный государственный заочный технический университет, 2006

© Винников В.В., 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Основы проектирования РЭС» является дисциплиной специализации, изучаемой на 5 курсе (II семестр) и 6 курсе (I семестр). Данное учебное пособие предназначено дополнить материал учебника по разделу «Электромагнитная совместимость и экранирование», изучаемому на 6 курсе.

Дисциплина связана, прежде всего, с дисциплиной стандарта «Основы проектирования ЭС», а также с дисциплинами «Основы конструирования и надежности ЭС», «Современные методы конструирования и технологии РЭС» и «Техническая электродинамика».

В процессе изучения дисциплины студент должен получить теоретические знания и практические умения по анализу конструкций РЭС с учетом электромагнитной совместимости и расчету параметров электромагнитных экранов, а также оценке их эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

Базой для изучения дисциплины (на 6-м курсе) являются: учебник [1] и другие литературные источники, указанные в библиографическом списке методического комплекса по дисциплине. Цель данного учебного пособия - дополнить учебник информацией, необходимой для более полного усвоения материала; упростить отчасти этот процесс и обеспечить каждого студента возможностью получить этот материал для подготовки.

Электромагнитное экранирование широко и разнообразно применяется в конструкциях радиоэлектронных средств (РЭС). Экранирование рассматривается как комплекс мер, включающих собственно экранирование и фильтрацию сетей и коммуникаций. Проектирование экранов является самостоятельной задачей, поэтому теоретические модели, расчетные зависимости и методы решения задач по проектированию таких изделий - необходимая часть подготовки инженера специальности 210201.

Последовательность изложения принята следующая. Сначала даются основные понятия и определения по электромагнитной совместимости РЭС и электромагнитной обстановке. Далее рассматривается электромагнитное экранирование: принципы экранирования электромагнитных полей и его составляющих; конструкции крышек экранов; экранирование проводов; рассматривается экран как объемный резонатор. Затем представлен материал по конструированию электромагнитных экранов, включающий рассмотрение: тракта переноса помех; назначения и основных характеристик экранов; особенностей проектирования экранов; материалов экранов; контактных устройств экранов; видов соединения листов обшивки экрана; экранирования отверстий в экранах и перфорированными материалами.

Отдельно рассматривается материал по методикам расчета электромагнитных экранов, приводятся примеры расчета.

Пособие содержит библиографический список и предметный указатель.

Основой для написания пособия явился цикл лекций, прочитанных автором-составителем в университете.

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС) возникла из насущных нужд развивающейся радиоэлектроники. Первыми результатами решения проблемы ЭМС были частные успехи по ослаблению влияния непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП) [3,4]. Затем проблема ЭМС распространилась на все виды радиоэлектронных и электронных средств. Стало очевидным, что нельзя проектировать, конструировать, производить и эксплуатировать упомянутые средства без учета обеспечения их ЭМС. Оказалось, что для дальнейшего развития радиоэлектроники задача обеспечения ЭМС имеет не меньшее значение, чем обеспечение аппаратурной надежности работы или миниатюризация тех же средств. Поэтому любой специалист в области радиоэлектроники должен знать принципы обеспечения ЭМС и применять свои знания в этой области при разработке, производстве и эксплуатации средств. Все это говорит о том, что проблема обеспечения ЭМС превратилась в новое самостоятельное научно-техническое направление современной радиоэлектроники.

Характерная особенность нового направления - его комплексность, заключающаяся в том, что проблема обеспечения ЭМС проникает почти во все существующие направления радиоэлектроники, устанавливает взаимосвязи между ними и даже объединяет их с позиций целостности радиоэлектроники как отрасли хозяйства.

В каждом конкретном случае задача обеспечения ЭМС решается путем системного подхода, что также является

особенностью нового направления. «Системность» различных технических средств, имеющих электромагнитные свойства, характеризуется «параметрами ЭМС». Их изучение и использование в практической деятельности обогащает теоретико-практическую базу радиоэлектроники.

Электромагнитная совместимость радиоэлектронного (электронного) средства - это его способность функционировать совместно и одновременно с другими средствами, имеющими электромагнитные свойства, при возможном действии непреднамеренных электромагнитных помех, не создавая при этом недопустимых помех другим радиоэлектронным и электронным средствам.

Задача борьбы с НЭМП возникла почти одновременно с радиотехникой, но в то время самостоятельного значения не имела и особых трудностей для своего решения не представляла. Трудности появились с увеличением количества радиосредств, усложнением их функций и созданием средств нового назначения.

Значительные трудности стали ощущаться после второй мировой войны, хотя в этот период активно осваивались новые высокочастотные диапазоны, на которых еще не было заметного уровня НЭМП. При этом практика показала, что даже при перспективности новых диапазонов процесс использования уже освоенных диапазонов не только не уменьшается, но еще более возрастает, что влечет за собой и возрастание уровня НЭМП.

Более полувека назад появились первые электронные средства (ЭС) самостоятельного функционального назначения, сначала вычислительные, а затем для обработки сигналов (приведения их к заданному виду) и средства электронной автоматики.

Несколько позже были созданы средства нового вида - радиоэлектронные, представляющие собой совокупность радиосредств, действующих на принципах радиотехники, и электронных, действующих на принципах электроники. Такая совокупность, в которой радиосредства используются для передачи и

приема сигналов посредством радиоволн, а электронные - для обработки сигналов и преобразования их в определенный вид сообщений, имеет единое функциональное назначение.

Радиоэлектронные средства значительно сложнее радиосредств, но эта сложность позволяет реализовать новые функции по сравнению с функциями радиосредств, чему способствуют и феноменальные успехи электроники в области полупроводниковой миниатюризации.

Вместе с совершенствованием РЭС развивалась и проблема обеспечения ЭМС РЭС. Рассматривая этапы развития этой проблемы, можно отметить их соответствие философским категориям. Процесс развития, в котором противоположности (противоречия) являются источником развития, отчетливо просматривается в сущности проблемы ЭМС РЭС. Непрерывное увеличение количества радиоэлектронных, электронных и электротехнических средств (что является следствием научно-технического прогресса) и непрерывное уменьшение возможности пользования ресурсом радиоканалов (что является следствием природной ограниченности этого ресурса) представляются противоречивыми факторами, т. е. источниками развития проблемы ЭМС РЭС. Несовершенство технических средств, проявляющееся: в нежелательных радиоизлучениях, непроизводительно загружающих ресурс радиоканалов, и в излишней восприимчивости к излучениям, отличающимся от полезных, - является непосредственной причиной их развития (совершенствования).

Непрерывное увеличение количества РЭС, ЭС и электротехнических средств привело к их новому качеству, т. е. к новому свойству, что еще раз подтверждает диалектический закон перехода количества в качество. Новое качество заключается в развитии необходимого свойства совместного функционирования с другими средствами. Без этого качества во многих случаях средства уже не могут существовать технически, т. е. находиться в эксплуатации.

Старые технические и организационные решения в области обеспечения совместной работы различных средств уступают дорогу более совершенным решениям на новых ступенях радиоэлектроники. Примером может служить эволюция процесса пользования ресурсом радиоканалов. На ранних этапах этого процесса основной задачей являлось распределение радиочастот между регионами, странами и отдельными видами радиослужб. Когда же весь ресурс был распределен, возникла необходимость в более рациональных методах пользования радиочастотами, например путем применения однополосных систем в дециметровом диапазоне волн. В настоящее время задача более рационального пользования ресурсом радиоканалов переросла в *задачу управления ресурсом*, под которой понимают комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на совместное пользование ресурсом различными радиоэлектронными системами без неприемлемых помех от одной системы к другой.

Другой пример - развитие методов и расширение области борьбы с индустриальными помехами. До 40-х гг. эти методы применялись, главным образом, в системах радиовещания. После второй мировой войны они стали применяться в системах телевидения, подвижной радиосвязи и, радиоэлектронных комплексов, например самолетных и корабельных. В настоящее время методы борьбы с индустриальными помехами распространяются и на ЭС, например на ЭВМ и средства обработки сигналов, поскольку такие средства являются не только источниками НЭМП, но и сами восприимчивы к НЭМП.

Как отмечалось, проблема ЭМС РЭС и ЭС является следствием научно-технического прогресса, который характеризуется необычайным ростом количества информационных систем всех видов.

Проблема ЭМС РЭС и ЭС может решаться путем реализации комплекса технических и организационных мероприятий. Технические мероприятия в общем случае направлены на ослабление

(подавление) НЭМП в источниках их возникновения (среде распространения) и на защиту различных устройств от их влияния. Реализация таких мероприятий приводит к совершенствованию технических параметров радиоэлектронных, электронных и электротехнических устройств, которые в той или иной степени влияют на обеспечение их ЭМС. Организационные мероприятия включают распределение радиочастот по соответствующим службам, выбор и назначение частот, установление частотно-пространственного разноса между РЭС, определение места размещения РЭС и другие мероприятия, в общем случае связанные с правильным учетом технических параметров различных средств, влияющих на обеспечение ЭМС.

Применение в хозяйстве страны технических устройств с неудовлетворительными характеристиками, влияющими на ЭМС, не только нарушает нормальную работу многих радиоэлектронных и электронных средств, что наносит экономический ущерб, но и затрудняет, а в ряде случаев исключает возможность пользования ресурсом радиоканалов новыми средствами, вводимыми в эксплуатацию. Наоборот, применение средств с более совершенными характеристиками ЭМС позволяет интенсивнее пользоваться имеющимся ресурсом радиоканалов и, следовательно, на одном и том же участке диапазона эксплуатировать увеличенное число средств без помех одного средства другому. В настоящее время во всех промышленно развитых странах проводится большая работа по обеспечению ЭМС радиоэлектронных и электронных средств. Современное состояние проблемы ЭМС характеризуется уже накопленным опытом ее решения для многих практических случаев.

Имеется обширная литература - зарубежная и отечественная, насчитывающая несколько тысяч публикаций, являющихся теоретическим и практическим вкладом в процесс формирования проблемы ЭМС РЭС как особого направления радиоэлектроники. Ежегодно созываются международные и национальные конференции и симпозиумы, на которых рассматриваются научные аспекты

проблемы. В этих материалах содержится множество новых фактов научного характера, существо которых, как правило, выходит за пределы установившихся представлений в области радиоэлектроники. При этом научные аспекты проблемы ЭМС непрерывно развиваются, поскольку в современных условиях не представляется возможным найти решения многих задач по обеспечению ЭМС РЭС и ЭС без достаточно глубоких исследований.

Рассматривая современное состояние проблемы обеспечения ЭМС радиоэлектронных и электронных средств, можно конкретно сформулировать абстрагированные направления, на которые расчленяется проблема, и вокруг которых концентрируются научные материалы нарастающего потока литературы, характеризующие поступательное развитие проблемы в целом. Графическая интерпретация таких направлений представлена на рис. 1, где показаны их связи с проблемой ЭМС в целом и с существующей практикой обеспечения ЭМС радиоэлектронных и электронных средств.

1. Радиочастотный ресурс (РЧР) - это совокупность возможных для использования радиочастотных электромагнитных полей, создаваемых с целью передачи (приема) информации. Теоретические аспекты: изучение особенностей ресурса и разработка эффективных методов его использования, в том числе принципов управления ресурсом, включая экономические концепции; научные основы расширения международного и национального частотного планирования и совершенствования соответствующей нормативно-технической документации (НТД); прогнозирование дальнейшего использования РЧР [3,4]. К практике относится контроль пользования радиоканалами в соответствии с принятыми правилами, сбор информации об использовании РЧР и реализация требований международной и национальной нормативно-технической документации (НТД) в области пользования РЧР.

2. Непреднамеренные электромагнитные помехи. Выявление источников и определение параметров (характеристик)

НЭМП - совместная задача и теоретического анализа, и практики. Кроме того, к теории относятся: изучение и моделирование НЭМП, их классификация и статистический анализ; изучение источников и путей распространения НЭМП, а также особенностей их влияния на полезные сигналы; разработка методов измерений и принципов нормирования допустимых уровней НЭМП. К практике относится обнаружение источников и путей распространения НЭМП, разработка и реализация требований к их нормированию, сбор информации о типах и характеристиках НЭМП, проведение измерений и экспериментальные исследования НЭМП.

3. Параметры (характеристики) ЭМС различных технических средств выражают признак системного свойства радиоэлектронных, электронных и электротехнических средств, т. е. возможности каждого такого средства функционировать одновременно и совместно с другими техническими средствами в системе (системах). Этим признаком параметры ЭМС любого из перечисленных средств отличаются от функциональных параметров того же средства, выражающих возможность выполнения им своего назначения. К практике относятся экспериментальное изучение параметров ЭМС, включая их

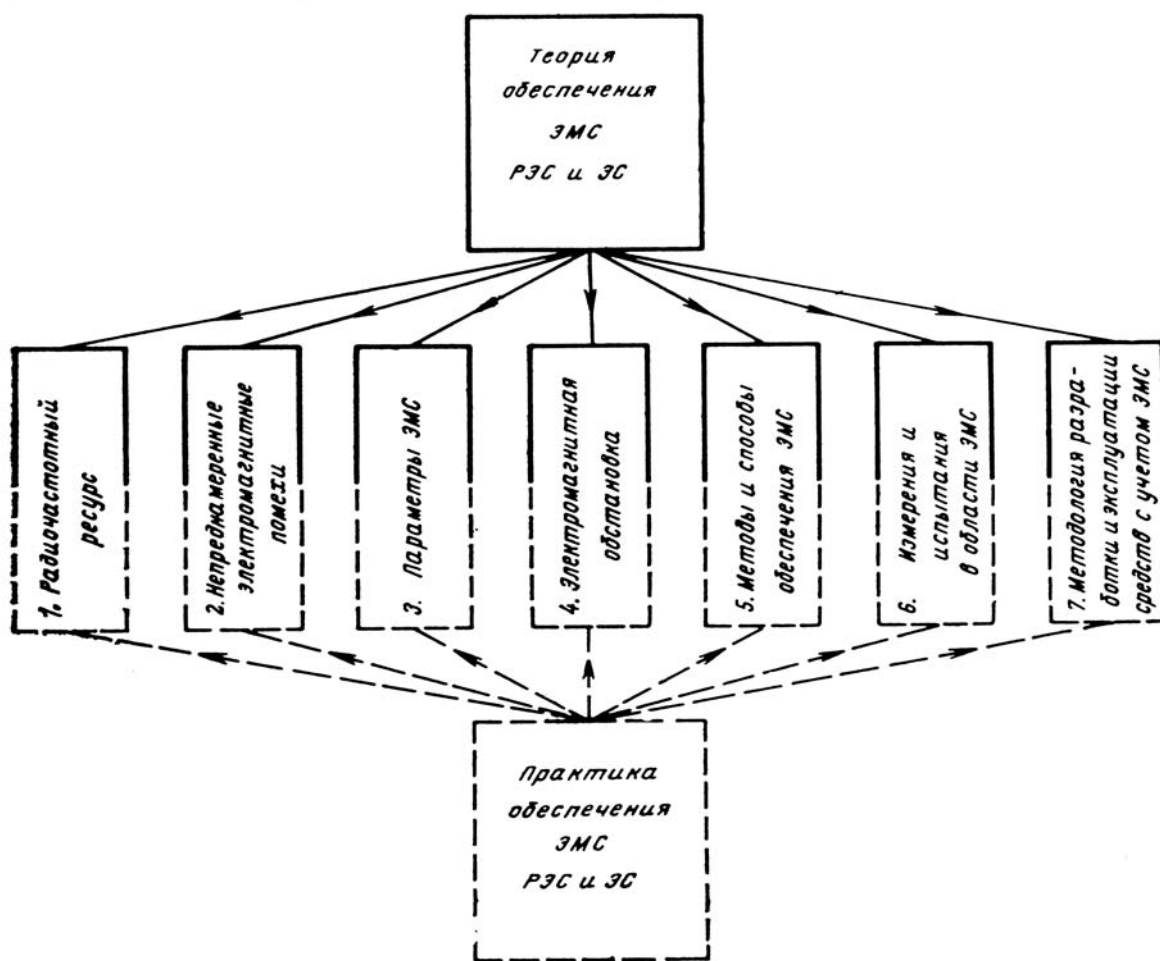


Рис. 1. К пояснению современного состояния проблемы обеспечения ЭМС радиоэлектронных средств

количественные, в том числе статистические, значения, и реализация требований НТД к таким параметрам в процессе создания средств и их эксплуатации.

К теории относится моделирование параметров ЭМС с целью создания инженерных методов расчета и научного обоснования путей совершенствования параметров ЭМС, а также исследования при разработке НТД, регламентирующей допустимые количественные значения параметров (характеристик) ЭМС технических средств.

4. Электромагнитная обстановка (ЭМО) - это реальные электромагнитные условия, в которых функционирует или должно функционировать конкретное средство при наличии или отсутствии полезного сигнала на его сигнальном входе при действии

(или возможном действии) НЭМП через этот вход или помимо него. ЭМО может быть внешней или внутренней по отношению к средствам конкретного назначения в определенных пространственных условиях, диапазонах и полосах частот. К практике определения ЭМО относятся измерения электромагнитных полей полезных сигналов и помех, а также напряжений (токов) в сетях первичных источников электропитания в заданных частотных и пространственно-временных условиях в зависимости от потребностей в функционировании некоторого технического средства. К практике относятся также сбор и анализ информации об использовании радиоканалов с заданными частотами, о параметрах (характеристиках) НЭМП (энергетических, частотных и временных) и параметрах (характеристиках) средств, функционирующих в заданном пункте пространства. Все это необходимо для анализа ЭМС средств любой радиослужбы.

К теории относятся методы аналитической оценки возможной ЭМО и прогноз ЭМО для средства конкретного назначения. С этой целью создаются модели ЭМО - вероятностные, детерминированные и комбинированные, в ряде случаев позволяющие учесть динамику изменения ЭМО и возможность адаптации средств к изменениям.

5. Методы и способы обеспечения ЭМС. О содержании такого направления говорит его название. Можно отметить задачи обеспечения ЭМС на трех уровнях радиоэлектронных и электронных средств. Первый уровень - обеспечение ЭМС между системами, например космической радиосвязи, второй - обеспечение ЭМС внутри сложного радиоэлектронного комплекса, например летательного аппарата, и третий - обеспечение ЭМС внутри блоков (приборов) между их узлами и компонентами, например внутри блока передатчика или ЭВМ.

По методам и способам обеспечения ЭМС накоплен значительный практический опыт как в виде общих технических решений задачи ослабления НЭМП в их источниках и среде распространения, например путем применения фильтров, экранов,

рационального монтажа, эффективного заземления, так и в виде многочисленных частных решений схемного и конструктивно-технологического характера при создании конкретных устройств помехозащиты и помехоподавления. Эффективность таких решений повышается, если они предусматриваются на начальных этапах разработки и производства изделий.

К теоретическим аспектам задачи обеспечения ЭМС относятся анализ, прогнозирование и расчеты ЭМС средств на всех упомянутых выше уровнях. Это, например, методы аналитического определения частотно-пространственных разнесов между средствами конкретной радиослужбы, методы теоретического анализа прогнозируемых НЭМП внутри сложного радиоэлектронного комплекса или между узлами блока (прибора) и методы инженерного расчета эффективности устройства помехоподавления. Такие аспекты во многих случаях подкреплены программами решений на ЭВМ.

Методы и способы обеспечения ЭМС связаны также и с разработкой (реализацией) различной НТД, в том числе стандартной, которая имеет важное значение для области ЭМС, поскольку регламентирует требования к организационным и техническим мероприятиям по обеспечению ЭМС.

6. Измерения и испытания в области ЭМС. Развитию проблемы ЭМС сопутствует потребность в особых методах измерений и испытаний радиоэлектронных, электротехнических и электронных средств и в особых типах измерительной аппаратуры и испытательного оборудования. Соответственно возникают и новые задачи в технике измерений. Это измерения несинусоидальных и нерегулярных, в том числе редкоимпульсных, НЭМП в диапазонах от нескольких десятков герц до нескольких гигагерц; измерения помех в ближней (индукционной) зоне; измерения побочных колебаний радиопередатчиков в волноводных трактах, где поле распространяется многими типами (модами) волн; антенные измерения в пределах нескольких октав частот; измерения затухания между близко размещенными антеннами; измерения шумовых

излучений передатчиков; измерения эффективности экранирования источников НЭМП и устройств, восприимчивых к различным видам помех; измерения восприимчивости к импульсным нерегулярным НЭМП, в том числе созданным нестационарными процессами в сетях электропитания, и ряд других видов измерений.

Из аппаратуры нового типа следует особо выделить автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы. Новые задачи возникли при стандартизации методов измерений и испытаний, а также в метрологическом обеспечении соответствующей измерительной аппаратуры, в частности в создании образцовых и поверочных средств.

Для ряда методов измерений параметров ЭМС особенностью является принципиально существующая методическая погрешность. Это, например, относится к методу трактовых измерений побочных колебаний радиопередатчика. Погрешность такого рода обусловлена отличием параметров реального объекта измерений от приписываемой ему математической модели измерений. Исключить такую погрешность на данном этапе развития техники затруднительно, но при практической оценке результатов измерений учитывать ее необходимо.

7. Методология создания и эксплуатации средств с учетом ЭМС. Содержание этого направления - организационные и технические мероприятия по обеспечению ЭМС различных технических средств на всех этапах их жизненного цикла: проектирования, конструирования, производства, испытаний и эксплуатации. Важнейшим выводом из накопленного опыта является экономическая концепция о выгоде учета требований к обеспечению ЭМС при разработке средств, начиная с самого раннего этапа - составления технического задания на разработку.

При формировании общей методологии создания и эксплуатации технических средств по показателям ЭМС целесообразно пользоваться аналогией с методологическими принципами обеспечения надежности тех же средств. По аналогии

можно считать, что сущность методологии состоит в том, чтобы на всех этапах жизненного цикла любого средства выявлялись факторы, влияющие на совместно-одновременную работу совокупности средств, вскрывались их причины и разрабатывались такие мероприятия, которые препятствовали бы появлению недопустимых НЭМП и обеспечивали нормальное функционирование каждого средства при воздействии на них НЭМП некоторого (допустимого) уровня. К этой методологии относится проведение специфических испытаний, целью которых является контроль реализации требований к обеспечению ЭМС, а также сбор и статистическая обработка информации о факторах, влияющих на обеспечение ЭМС, создание и практическое внедрение различной НТД и особенно-стандартных требований к параметрам ЭМС. На этапах производства и эксплуатации различных технических средств в общие принципы методологии входят мероприятия технической диагностики средств по параметрам их ЭМС.

Системный подход при разработке таких средств приводит к необходимости считать, что в совокупность свойств каждого технического средства, обладающего параметрами ЭМС, должно входить целенаправленное свойство функционировать совместно с другими средствами, не нарушая их нормальную работу. С этой точки зрения совершенствование НТД и экономических концепций в области ЭМС способствует переходу качества продукции на новый, более высокий уровень. Иными словами, к показателям качества продукции

[1,3,4,6,9,11] надо относить также и показатель обеспеченности ЭМС. Это обстоятельство приобретает особое значение в связи с необходимостью аттестации промышленной продукции (в данном случае обладающей электромагнитными свойствами). Очевидно, что определение категории качества должно проводиться с учетом характеристик ЭМС такой продукции, для чего должны быть разработаны необходимые технические требования.

Для формирования рассматриваемой методологии важную роль играет научная обоснованность применяемой терминологии.

Применение в области ЭМС известных и распространенных математических методов или, точнее, отсутствие необходимости в привлечении или разработке нового математического аппарата следует объяснить тем, что в этой области глубоко исследуются в принципе известные электромагнитные явления и процессы, для изучения которых можно пользоваться уже разработанным математическим аппаратом.

При формировании нового научного направления необходимо выявлять признаки его отличия от других направлений. В данном случае существенно выявить линию раздела между теориями ЭМС РЭС и помехоустойчивости приема.

Анализ основной литературы по теории помехоустойчивости [1,2,3,4 и др.] позволяет сделать вывод, что главная концепция этой теории - изучение влияния флуктуационных помех на сигнал, принимаемый по основному каналу, и в связи с этим разработка оптимальных методов радиоприема. Эта концепция, возникшая в 1947 г. в виде теории потенциальной помехоустойчивости, изучает закономерности случайных процессов изменения параметров полезного сигнала, законы распределения флуктуационных помех отдельно и совместно с сигналом, а также принципы построения оптимальных (т. е. наилучших в смысле ослабления влияния флуктуационных помех) приемников с эффективным способом обработки сигналов, включая рациональный (по способу такой обработки) выбор методов модуляции и кодирования при передаче. С конца 60-х гг. в области теории помехоустойчивости начали появляться работы, в которых наряду с влиянием флуктуационных помех на принимаемый сигнал учитывались помехи станционные и промышленные. Однако при этом ощущалась недостаточность теории помехоустойчивости. Так, например, не рассматриваются модели промышленных импульсных помех негауссовского вида, представляющих собой нестационарные случайные процессы.

Соответственно не рассматриваются и особенности совместного прохождения флуктуационных и импульсных помех через приемник, являющийся оптимальным при влиянии только флуктуационных помех. Аналогичные аспекты относятся и к особенностям влияния стационарных помех.

Далее следует заметить, что в литературе наряду с термином «помехоустойчивость» распространен термин «помехозащищенность», причем иногда оба термина применяются без существенного различия между выражаемыми ими понятиями, хотя в ряде случаев эти термины означают разные понятия. Дадим им определения. *Помехоустойчивость* устройства - это его способность противостоять внутренним (флуктуационным) и внешним помехам, которая зависит от основного принципа его построения. Этот термин можно относить и к системе (например, «помехоустойчивость радиосвязи»), когда указанная способность противостоять помехам определяется еще и выбранной структурой передаваемого сигнала, оптимальной по ряду признаков. *Помехозащищенность* - это способность того же устройства противостоять внешним и внутренним помехам, которая зависит от специально применяемых дополнительных схемотехнических и конструктивных средств и способов, не нарушающих основные принципы построения устройства. Примером помехозащищенности устройства является применение в нем средств ослабления (фильтры и экраны) промышленных радиопомех, проникающих через цепи питания. Как известно [3,4], соответствующие теоретические обоснования к применению таких средств и расчеты не рассматриваются в теории помехоустойчивости. В целом, понятие «помехозащищенность», выражающее целенаправленное свойство устройства или системы, относится к области обеспечения ЭМС. Различие между теориями обеспечения ЭМС РЭС и помехоустойчивости радиоприема можно характеризовать и другими примерами [1,4].

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Электромагнитная обстановка - это совокупность в заданной области пространства электромагнитных, электрических и/или магнитных полей и токов (напряжений) помех и полезного сигнала, которая влияет или может влиять на функционирование определенного технического средства (комплекса средств).

Такое определение содержит существенный признак понятия, а именно - электромагнитные условия работы конкретного технического средства (комплекса средств), а не вообще существование электромагнитных полей в некоторой области пространства. Последнее обстоятельство следует отнести к другому понятию - «электромагнитная среда», которое надо понимать как наличие электромагнитных полей и токов (напряжений) с всевозможными частотами и в различных диапазонах частот, которые могут влиять, а могут и не влиять на функционирование некоторого средства. Иными словами, понятие «электромагнитная обстановка» (ЭМО) связано не только с электромагнитной помехой (ЭМП) и полезным сигналом, но и с определенными свойствами технических средств, т. е. с их восприимчивостью и чувствительностью. Например, ЭМО, в которой функционирует радиоприемное устройство, может характеризоваться влиянием интермодуляционных помех, однако такое влияние, как известно [3,4], зависит также и от параметров ЭМС радиоприемного устройства.

Электромагнитная обстановка может быть *внешней* по отношению к рассматриваемой системе или отдельному средству и *внутренней* в системе по отношению к ее составной части. Является ли ЭМО внешней или внутренней, зависит от того, что подразумевается под «системой». Внешняя ЭМО отдельного устройства, например радиоприемного, определяется влиянием помех и полезного сигнала через антенну. Внутренняя ЭМО системы во многих случаях, особенно на частотах ниже 300 МГц, характеризуется полями ближней зоны помех и токами помех в цепях

питания, коммутации и заземления. Соответственно можно рассматривать внешнюю и внутреннюю ЭМО по отношению к отдельному прибору, блоку или узлу.

Информация об ЭМО необходима во многих случаях, например для определения степени использования РЧР, обоснования выбора частоты некоторому средству, расчета ЭМС средств определенного вида, прогноза НЭМП в месте размещения средства. Определяют ЭМО расчетными, или экспериментальными методами, или их совокупностью. Круг вопросов, связанный с анализом ЭМО, иллюстрирует рис. 2.

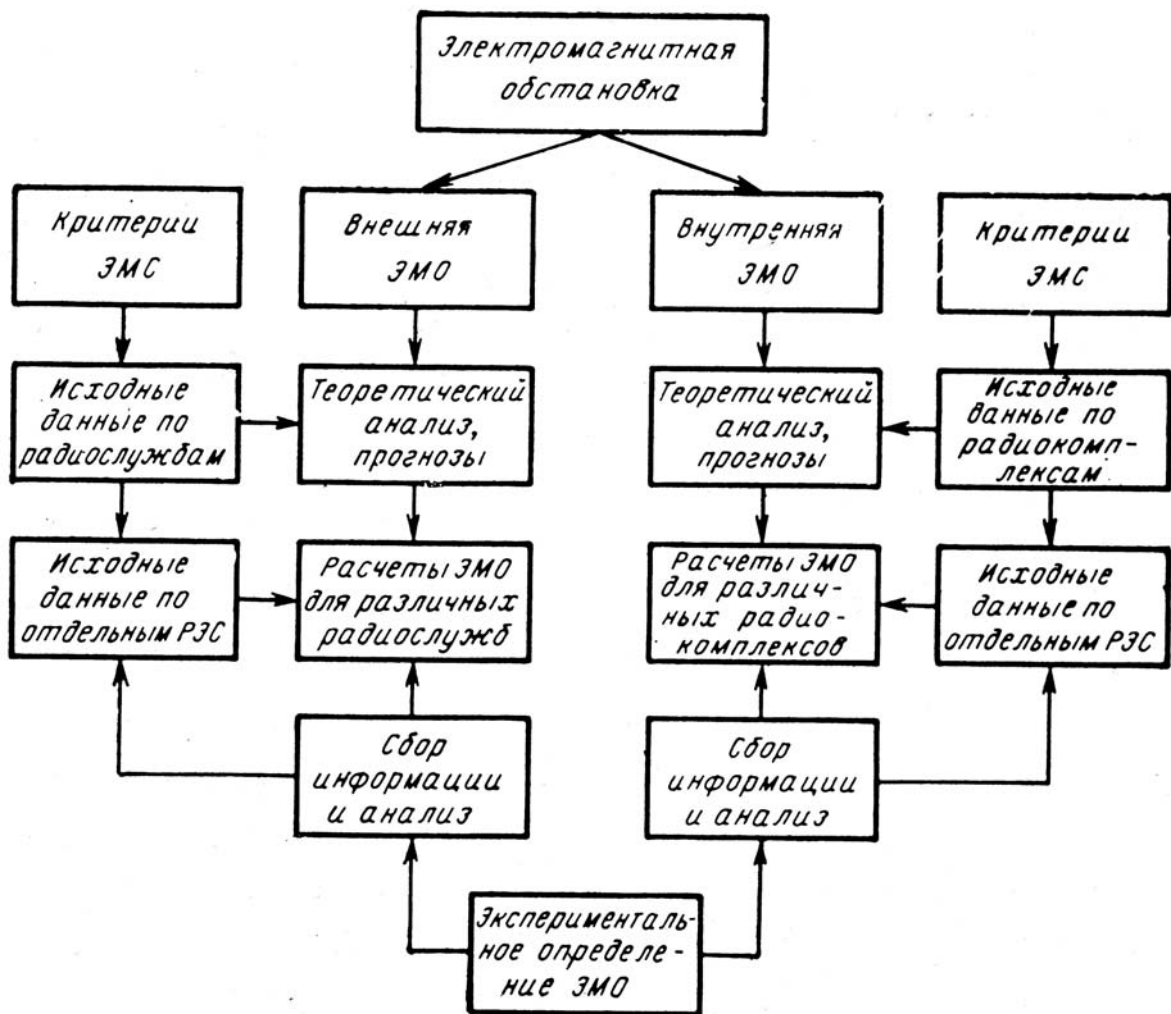


Рис. 2. Основные аспекты анализа ЭМО

Знание внешней ЭМО необходимо для многих ведомств и предприятий, разрабатывающих и эксплуатирующих

радиоэлектронные комплексы, системы и отдельные РЭС. Расчеты внешней ЭМО имеют свои особенности для каждой радиослужбы. Исходными данными при этом являются сведения о пространственном размещении средств, присвоенных частотах, местоположении источников ЭМП, допустимых отношениях сигнал-помеха, условиях распространения мешающих сигналов, координационных зонах и др. Такая информация может быть получена из анализа ТУ на устройства, создающие ЭМП, расчетов распространения ЭМП, литературных материалов, а также результатов экспериментальных наблюдений степени использования соответствующих полос частот и рабочих каналов. В ряде случаев внешняя ЭМО может быть весьма сложной. Например, в крупных аэропортах внешняя ЭМО представляет собой совокупность стационарных помех от наземных средств УВД, бортовых средств летательных аппаратов, перемещающихся в зоне аэропорта, и помех от РЭС, нередко находящихся в непосредственной близости к аэропорту, но ему не принадлежащих. При размещении радиоприемных устройств в промышленных центрах в расчетах внешней ЭМО учитывают усредненный «фон индустриальных радиопомех», характеристики которого изучаются особо; при выборе площадок для космических центров связи или астрономических наблюдений учитывают, например, необходимость исключения ЭМП от устройств автомобильного зажигания и т. д.

Знание внутренней ЭМО необходимо для определения условий обеспечения ЭМС в сложных системах и комплексах. Чем сложнее система и ее функции, тем тщательнее надо анализировать внутреннюю ЭМО во избежание снижения эффективности системы и ограничения возможности пользования выделенными для нее радиоканалами. Особой сложностью характеризуется внутренняя ЭМО в комплексе радиоэлектронного оборудования самолетов, ИСЗ, морских судов и других подвижных объектов. Например, в самолетном комплексе, имеющем в своем составе несколько десятков РЭС различного назначения и до 30 ... 40 приемных и передающих

антенн, можно обнаружить почти все виды ЭМП, распространяющихся в дальней и ближней зонах путем излучений через антенны и помимо них, а также путем распространения в проводящих средах, в том числе в проводах монтажной схемы комплекса. и т. д.

Существенное значение для обеспечения ЭМС РЭС следует придавать определению ЭМО на начальных стадиях их разработки. Целесообразно при этом составлять матрицу потенциальных источников и рецепторов ЭМП и уточнять ее на всех последующих этапах. Для оценки ЭМО важен сбор и обработка данных об ЭМО, характерной для различных прототипов разрабатываемых средств, особенно если эти данные получены экспериментально.

Важнейшая особенность ЭМО - ее вероятностный характер, что приводит к необходимости статистической о

Инженерные расчеты по определению ЭМО (внешней и внутренней) базируются на большом числе частных моделей источников, рецепторов и условий распространения ЭМП. В ряде случаев на разных этапах разработки изделий прибегают к физическому моделированию ЭМО путем натурных испытаний отдельных РЭС и/или их комплекса при имитации реальных особенностей ЭМО. Результаты анализа ЭМО используют для разработки организационно-технических мероприятий по уточнению частотных и пространственных разнесов средств, улучшению параметров ЭМС оборудования, выбору способов помехозащиты, составлению монтажной схемы комплекса ценки факторов, определяющих ЭМО. При анализе внутренней ЭМО статистическая оценка, как правило, определяется статистически устойчивыми факторами, т. е. ЭПМ, параметры которых хотя и случайны (зависят от режима источника, экземпляра источника, внешней среды, времени и т. д.), но обладают определенной однородностью. В подавляющем большинстве случаев такие параметры ЭМП соответствуют заданным нормам, что позволяет считать их выборочные значения принадлежащими к устойчивой генеральной совокупности случайных

величин. Это означает принципиальную возможность определения средних значений и дисперсий параметров ЭМП, следовательно, и прогноза ЭМО на основе априорно известных факторов.

При анализе внешней ЭМО статистическая оценка усложняется. С одной стороны, можно выделить факторы, также обладающие статистической устойчивостью, а именно стационарные помехи от известных источников, размещенных на известных расстояниях от приемника, что позволяет осуществлять их статистическую оценку. При распространении таких помех в различных условиях земной поверхности считается, что их уровни с достаточным для практики приближением соответствуют нормальному распределению вероятностей. С другой стороны, ЭМО может определяться факторами, статистически неопределенными или неустойчивыми, как, например, в системах подвижных служб радиосвязи, где велика вероятность возникновения интермодуляционных помех, статистическая оценка которых затруднительна. ЭМО в таких системах может характеризоваться неопределенностью числа мешающих сигналов и их уровней.

Как отмечалось, понятие об ЭМО связано с влиянием помех на функционирование технического средства. Нормальное функционирование средства оценивается критерием (числовым показателем) обеспечения его ЭМС с источником ЭМП или, наоборот, источника ЭМП со средством, подверженным действию ЭМП. В общем случае «критерий ЭМС» - это допустимое отношение сигнал-помеха на входе устройства ($S / I_{вх}$) при условии, что его численное значение (дБ) определяется по допустимому эффекту влияния помехи на полезный сигнал на выходе устройства, т. е. по допустимому численному значению (дБ) отношения ($S / I_{вых}$). В свою очередь, это значение определяется допустимой величиной потери информации в полезном сигнале, что зависит от назначения системы передачи сигнала и требований к качеству сигнала при его использовании.

В общем случае критерий обеспечения ЭМС выражается зависимостью

$$(S/I)_{вх} = \kappa (S/I)_{вых},$$

где κ - коэффициент ослабления мешающего действия помехи при ее совместном с сигналом прохождении от входа до выхода устройства.

Однако при определении критерия ЭМС приходится считаться с собственным шумом устройства. Если внешних помех нет, то требуемое качество полезного сигнала должно обеспечиваться при допустимом отношении $[(S + N)/N]_{вх}$, где S - средняя мощность полезного сигнала, дБ; N - средняя мощность шума собственного устройства, дБ.

В случае действия стационарной помехи I требуемое качество сигнала должно обеспечиваться при допустимом отношении

$[(S + N + I)/(N + I)]_{вых}$, где I - средняя мощность помехи на входе устройства, дБ. При этом

$$(S/I)_{вх} = (S/N)_{вх} - (I/N)_{вх}.$$

Такие соотношения очевидны, когда стационарная помеха (мешающий сигнал) действует в основном канале приема, полностью или частично совпадая с полосой частот полезного сигнала. Однако критерий ЭМС используется и в других случаях, когда помеха действует по неосновному каналу приема, например по соседнему, комбинационному или интермодуляционному. Помеха может действовать и помимо сигнального входа устройства, например по цепям питания. В таком случае необходимо особо рассматривать критерий ЭМС как допустимое отношение мощностей сигнала, помехи и собственных шумов при соответствующем пересчете, принимая это отношение как количественное значение критерия. В общем случае само отношение сигнал-помеха на входе и/или выходе устройства может рассматриваться как качественный признак критерия ЭМС.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ

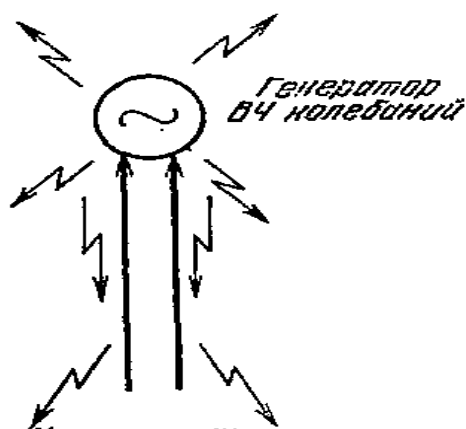
3.1. Основные определения и физические представления

Под *паразитной наводкой* понимается передача напряжения из одного изделия или его части в другое, не предусмотренная его схемой и конструкцией. Такая наводка возникает вследствие *паразитной связи* между ними, связи по электрическим цепям, появляющимся в устройстве независимо от желания конструктора. Между двумя электрическими цепями, находящимися на некотором расстоянии друг от друга, могут возникать электромагнитные связи через: электрическое поле; магнитное поле; электромагнитное поле; провода и волноводы, соединяющие эти цепи. Подавление паразитных наводок сводится к устранению или ослаблению до допустимых величин паразитных связей между источниками и приемниками наводок. В первую очередь это ослабление должно производиться прямым уменьшением величин паразитных сопротивлений. Способы такого уменьшения элементарны: размещение вероятных источников и приемников наводки на максимально возможном расстоянии друг от друга; правильная взаимная ориентация их деталей и контуров; сведение к минимуму общих сопротивлений, которые могут оказаться в цепях источника и приемника; изъятие посторонних проводов, которые могут связать источник и приемник и т. д. При недостаточности всех этих мер приходится прибегать к экранированию.

Экранированием называется локализация электромагнитной энергии в пределах определенного пространства, достигаемая путем преграждения распространения ее всеми возможными способами. Для ясного понимания этой формулировки представим себе (рис. 3) некоторый высокочастотный генератор, питаемый от сети постоянного или переменного тока. Очевидно, что этот генератор будет излучать в окружающее пространство электромагнитную энергию. При этом излучающими элементами могут быть как отдельные детали самого генератора, так и цепь питания.

Экранирование применяется, когда требуется защитить внешнее по отношению к генератору пространство от электромагнитного поля, создаваемого генератором. Так, в примере, изображенном на рис. 4, электромагнитная энергия ограничивается с помощью экрана, состоящего из металлического кожуха и фильтрующей цепи. Из этих экранирующих деталей первая препятствует распространению энергии, излучаемой непосредственно деталями генератора, а вторая - распространению энергии вдоль проводов питания.

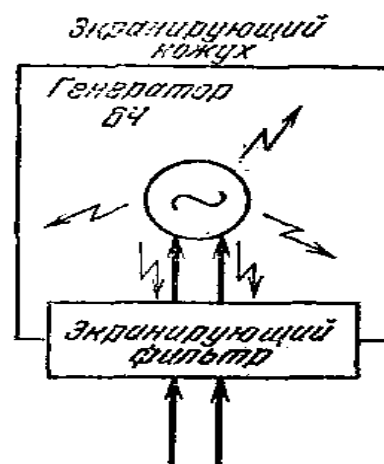
Таким образом, в понятие *экран* входят как детали механической конструкции: корпус, коробки, перегородки, так и электротехнические детали: дроссели, резисторы, конденсаторы, составляющие



Цепь питания

питания

Рис. 3. Излучение генератора генератора высокочастотных колебаний



Цепь

Рис. 4. Экранирование колебаний высокой частоты

фильтрующие цепи и развязывающие ячейки. Только совместное действие всех этих деталей дает необходимый результат. Но не во всех случаях требуются все виды экранирующих деталей. Например, если источник и приемник наводки сильно разнесены, то паразитная

связь между ними устанавливается в основном по проводам. В таких случаях достаточно включить в эти провода одну или несколько развязывающих ячеек, чтобы получить необходимое подавление помехи, обойдясь без механических экранирующих деталей. Наоборот, введя в хорошо механически заэкранированное пространство неотфильтрованный провод, получим полное нарушение экрана [2].

Эффективностью экранирования (и фильтрации или развязки) называется отношение напряжений, токов, напряженностей электрического и магнитного полей в экранируемом пространстве или на конце фильтруемого провода при отсутствии и наличии экрана:

$$\mathcal{E} = U/U' = I/I' = E/E' = H/H'. \quad (1)$$

В технике проводной связи эту величину принято давать в неперах (Нп):

$$B = 1n\mathcal{E} = 0,115 A. \quad (2)$$

В радиотехнике эффективность экранирования дают в децибелах (дБ):

$$A = 20lg\mathcal{E} = 8,7 B. \quad (3)$$

3.2. Принципы экранирования электрического поля

Рассмотрим влияние экранирующего металлического листа (рис. 5) для частного случая, когда точка B , относящаяся к приемнику наводки, связана с корпусом только емкостью C_B . Тогда напряжение, наведенное на приемник без экрана, определяется формулой

$$U_H = E_{ИСТ} \frac{C_{нар}}{C_B + C_{нар}}.$$

Наличие экранирующего листа разделяет емкость $C_{нар}$ на две последовательно соединенные емкости $C1$ и $C2$, к которым присоединена параллельно небольшая остаточная емкость $C'_{нар}$. Для определения напряжения U_n можно, пренебрегая емкостью $C'_{нар}$, считать, что напряжение в точке B определяется напряжением на экране $U_э$, который заменяет в этом случае точку A на рис. 5, а. Тогда напряжение U_n для рис. 5, б равняется

$$U_n = U_э \frac{C2}{C_B + C2}.$$

Напряжение на экране, с учетом тех же соображений и емкости $C3$ между экраном и корпусом, будет равно

$$U_э = E_{ист} \frac{C1}{C1 + C3},$$

и окончательно напряжение в точке B после установки, экрана делается равным

$$U_n = E_{ист} \frac{C1 C2}{(C1 + C3)(C_B + C2)}.$$

Это напряжение после установки экрана может оказаться как выше, так и ниже, чем до его установки. Действительно, сравнивая приведенные выражения для U_n до и после установки экрана, можно получить разные результаты.

1. Если экран установлен так, что его емкость относительно точки A велика, а относительно корпуса мала, т. е. если $C1$ значительно больше $C3$, то напряжение на экране будет примерно равно напряжению

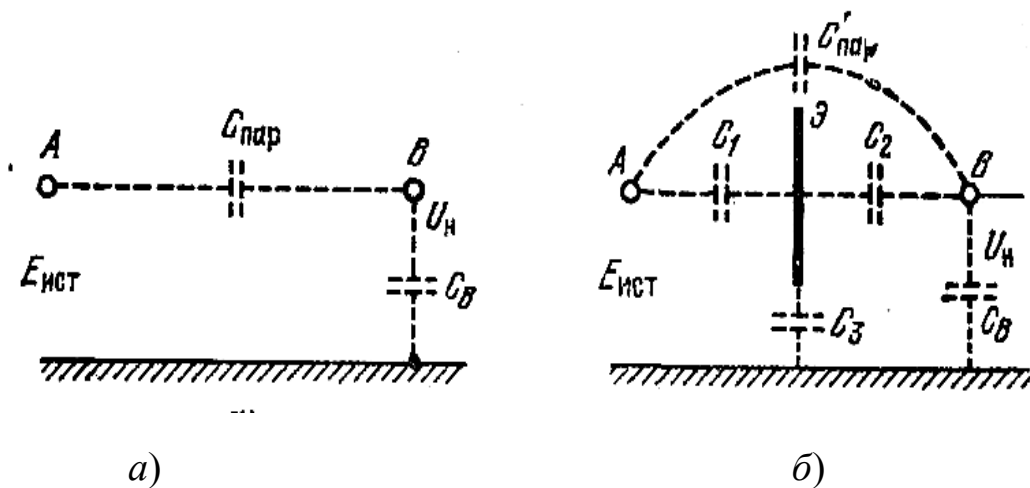


Рис. 5. Действие экрана, не соединенного с корпусом прибора:

а) без экрана ; б) с металлическим листом, не соединенным с корпусом в точке A . В результате, так как емкость C_3 всегда больше емкости $C_{пар}$, напряжение U_n после установки экрана будет выше, чем до установки, и экран оказывается не полезным, а вредным.

2. Если экран установлен так, что емкость его C_3 относительно корпуса прибора велика, то напряжение при наличии экрана будет меньше, чем без него. Таким образом, с увеличением C_3 экранирование становится более эффективным.

Увеличение C_3 до ∞ равносильно короткому замыканию между экраном и корпусом (рис. 6). Если при этом не учитывать остаточной паразитной емкости $C'_{пар}$ между точками A и B , то напряжение U_n окажется равным нулю и показанная на рис.6 конструкция экрана даст идеальный экранирующий эффект. В действительности напряжение U_n не будет равно нулю, но его величина, определяемая из соотношения

$$U'_n = E_n \frac{C'_{пар}}{C'_{пар} + C_2 + C_B} \approx E_n \frac{C'_{пар}}{C_2 + C_B},$$

(4)

оказывается значительно меньше величины U_n до установки экрана, так как $C'_{пар}$ значительно меньше $C_{пар}$. На основании

изложенного можно считать, что *физический смысл экранирующего эффекта, получаемого от металлического листа, соединенного с корпусом прибора, заключается в создании короткого замыкания на корпус для большей части паразитной емкости, имеющейся между экранируемыми друг от друга точками.*

На основании (1), взяв отношение U_n к (4), получим, что эффективность экранирования электрического поля

$$\mathcal{E} = U_n / U'_n \approx C_{\text{пар}} / C'_{\text{пар}} \quad (5)$$

определяется исключительно отношением паразитных емкостей между точками A и B до и после установки экранирующего листа. Любые мероприятия, приводящие к снижению $C'_{\text{пар}}$, увеличивают эффективность экранирования.

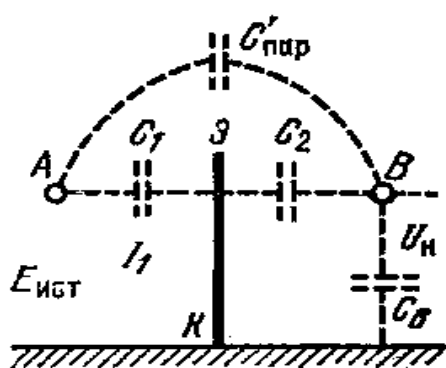


Рис. 6. Действие экрана, соединенного с корпусом прибора

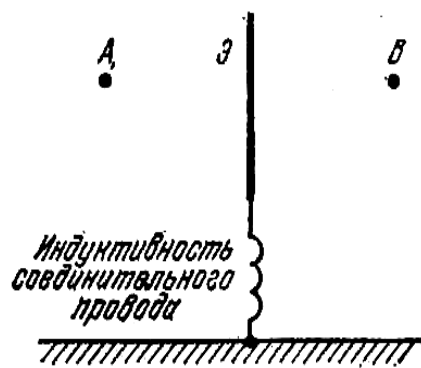


Рис. 7. Влияние индуктивности провода, соединяющего экран с корпусом

От качества соединения экрана с корпусом прибора и частей экрана друг с другом сильно зависит его экранирующее действие. Особенно важно не иметь соединительных проводов между частями экрана и корпусом. Индуктивное сопротивление такого провода (рис. 7), воз-растающее с повышением частоты, по своему влиянию эквивалентно уменьшению емкости C_3 на рис. 5, б. На

коротковолновом, и особенно ультракоротковолновом, диапазонах соединительные проводники длиной в несколько сантиметров могут резко ухудшить экранирование прибора.

Важно также обеспечить надежный контакт, не изменяющийся с течением времени между частями экрана. В тех случаях, когда невозможно непосредственно соединить части экрана, приходится прибегать к широким «шинам металлизации», рассмотренным в [2].

На еще более коротких волнах дециметрового и сантиметрового диапазонов соединительные проводники и шины между экранами совершенно недопустимы. Для получения высокой эффективности экранирования электрического поля здесь необходимо применять непосредственное сплошное соединение отдельных частей экрана друг с другом [1,2,5]. В разъемных соединениях можно использовать различные варианты токопроводящих прокладок.

Узкие щели и отверстия в металлической перегородке не ухудшают экранирование электрического поля, если они малы по сравнению с длиной волны. Происходит это потому, что щели и отверстия лишь незначительно изменяют показанные на рис. 5, б и рис. 6 емкости $C'_{нар}$, C_2 и C_B , определяющие наведенное напряжение в точке B . Если щели и отверстия сравнимы с длиной волны, то связь экранируемых элементов может происходить через электромагнитное поле.

Эффективность экранирования электрического поля не зависит от толщины и материала экрана. Причиной этого является незначительная величина токов, текущих по экрану. Как видно из рис. 6, величина тока I_1 , текущего по цепи A -Э- K , определяется сопротивлением емкости C_1 , которое (при хорошо выполненном присоединении экрана к корпусу прибора) несравненно выше сопротивления экрана и корпуса, имеющих сравнительно большую поверхность.

Посмотрим теперь, как повлияет на напряжение, наведенное в точке B , металлический лист, прикрывающий обе экранируемые друг от друга точки. Этот случай показан на рис. 8, на котором нанесены

все паразитные емкости, обозначенные так же, как на рис. 5, б. Легко убедиться в том, что напряжение U_n , определяемое из тех же соображений, что и на рис.5,б, при наличии листа будет значительно большим, чем без него, так как последовательно соединенные емкости $C1$ и $C2$ значительно больше емкости $C_{нар}$, а емкость $C3$ невелика. Совершенно иная картина получится, если соединить металлический лист с корпусом прибора. Тогда емкости $C1$ и $C2$ оказываются подключенными к корпусу, напряжение в точке B будет определяться соотношением между емкостью $C'_{нар}$ и суммой емкостей $C'_{нар} + C2 + C_B$.

Так как емкость $C'_{нар}$ меньше $C_{нар}$, а сумма $C'_{нар} + C2 + C_B$ больше суммы $C_{нар} + C_B$, то очевидно, что такая присоединенная к корпусу прибора крышка даст некоторый экранирующий эффект, несмотря на то, что она расположена не между экранируемыми друг от друга точками. Экранирующий эффект может быть довольно велик, если лист проходит вблизи от экранируемых точек.

Различным действием присоединенного и не присоединенного к корпусу металлического листа можно легко объяснить хорошо известное на практике явление, заключающееся в том, что поднесение руки к открытому монтажу увеличивает нежелательные наводки, а в усилителях приводит часто к самовозбуждению или к искажению частотных характеристик. Если же приближать руку к монтажу, одновременно прижимая ее к корпусу прибора, то генерация часто уменьшается или пропадает вовсе. Очевидно, что причина явления кроется в том, что рука заменяет собой металлический экран, который, не будучи присоединенным к корпусу, увеличивает связь между различными точками монтажа, а в присоединенном состоянии, наоборот, уменьшает ее.

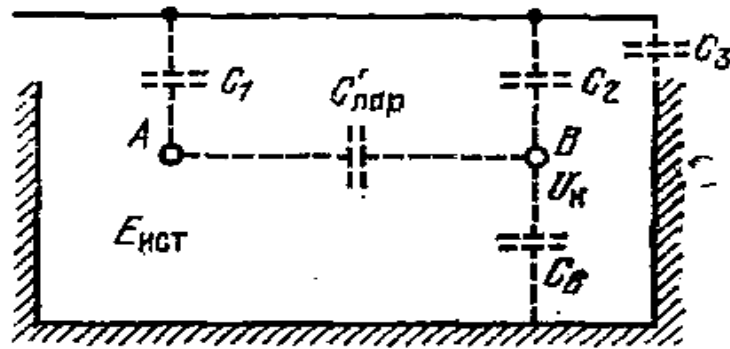


Рис. 8. Действие металлической крышки экрана

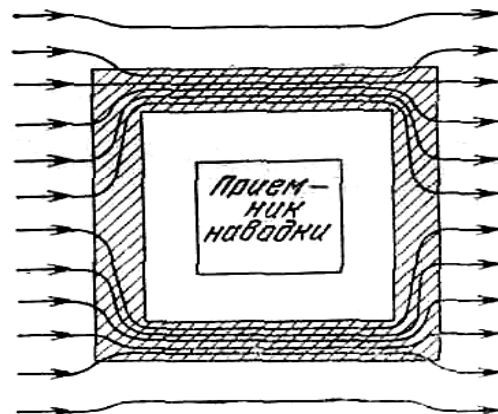
Практическому расчету эффективность экранирования электрического поля не поддается. Дело в том, что величина $C'_{пар}$, входящая в (5), зависит от конструкции экрана и может быть сделана сколь угодно малой. Для этого достаточно заключить источник или приемник наводки в сплошной, замкнутый со всех сторон экран, с пропайкой или проваркой швов по всем сторонам. В такой идеальной конструкции $C'_{пар} = 0$ и $\mathcal{E} = \infty$. В реальной конструкции приходится делать доступ внутрь экрана и щели для управления и ввода проводов. Из-за этого экранирование падает и оценить его можно только экспериментально, и то совместно с другими видами экранов.

3.3. Принципы экранирования постоянного и медленно изменяющегося магнитного поля

От постоянного и медленно изменяющегося переменного магнитного поля защищаются с помощью экранов, изготовленных из ферромагнитных материалов (пермаллоя или стали) с большой относительной магнитной проницаемостью μ_r . При наличии такого экрана линии магнитной индукции проходят в основном по его стенкам

(рис. 9), обладающим малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана. Качество экранирования таких полей зависит от магнитной проницаемости

экрана и сопротивления магнитопровода, которое будет тем меньше, чем толще экран и чем меньше в нем стыков и швов, идущих поперек направления линий магнитной индукции. Этот вид экранирования называется *магнито-статическим* или *шунтированием магнитного поля экраном*. Он



используется редко, только при необходимости подавить наводку на частотах 0 ... 1 кГц. Рис. 9. Действие экрана,

Здесь эффективность экранирования не зависит от частоты. Ее можно приблизительно определить

здесь эффективность экранирования не зависит от частоты. Ее можно приблизительно определить магнитного материала

литить, [2], по уравнению

$$\mathcal{E} = 1 + \mu_r d / D, \quad (6)$$

где μ_r - относительная магнитная проницаемость материала экрана, d - толщина стенок экрана, D - диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий к длине стенки кубического экрана.

3.4. Принципы экранирования высокочастотного магнитного поля

Экранирование переменного высокочастотного магнитного поля производится с помощью экранов, изготовленных из немагнитных и ферромагнитных металлов. Оно основано на использовании того же явления магнитной индукции, которое приводит к возбуждению наведенных ЭДС и токов. Таким образом, явление индукции, временно квалифицированное нами как нежелательное, делается опять полезным.

Поставим на пути равномерного переменного магнитного поля (рис. 10, а) медный цилиндр. В нем возбудятся переменные ЭДС, которые, в свою очередь, создадут переменные индукционные

вихревые токи (токи Фуко). Магнитное поле этих токов (рис. 10, б) будет замкнутым; внутри цилиндра оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами - в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле (рис. 10, в) оказывается ослабленным внутри цилиндра и усиленным вне его, т. е. происходит вытеснение поля из пространства, занимаемого цилиндром, в чем и заключается его экранирующее действие. Очевидно, что оно будет тем больше, чем больше создаваемое цилиндром обратное магнитное поле и, следовательно, чем больше протекающие по нему вихревые токи. Этот вид экранирования называется *электромагнитным или вытеснением магнитного поля экраном*.

Вихревые токи в экранирующем цилиндре распределяются неравномерно по его сечению. Это вызывается *явлением поверхностного эффекта («скин-эффекта»)*, сущность которого заключается в том, что переменное магнитное поле ослабляется по мере проникновения в глубь металла, так как внутренние слои экранируются вихревыми токами, циркулирующими в поверхностных слоях.

Из-за поверхностного эффекта плотность вихревых токов и напряженность переменного магнитного поля по мере углубления в

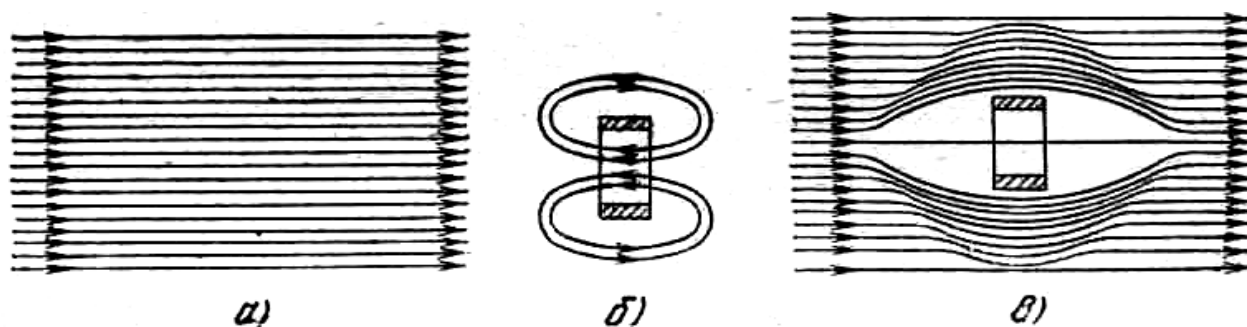


Рис. 10. Вытеснение магнитного поля вихревыми токами в экране металл падает по экспоненциальному закону:

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-x/\delta}, \quad (7)$$

где J_x и J_0 - плотность тока на глубине x и на поверхности соответственно; δ - показатель уменьшения поля и тока, который называют *эквивалентной глубиной проникновения*, м,

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 0,52 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda\rho}{\mu_r}} \quad (8)$$

Здесь σ - удельная проводимость материала экрана, См/м; $m = \mu_0 \mu_r$ - магнитная проницаемость материала; $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$ - магнитная проницаемость вакуума, Г \times м $^{-1}$; μ_r - относительная магнитная проницаемость материала; $\omega = 2\pi f$ - угловая частота; λ - длина волны в воздухе, м.

Величиной эквивалентной глубины проникновения удобно характеризовать экранирующий эффект вихревых токов. Чем меньше δ , тем больший ток течет в поверхностных слоях экрана, тем больше создаваемое им обратное магнитное поле, вытесняющее из пространства, занятого экраном, внешнее поле источника наводки.

Если экран сделан из немагнитного материала, то в выражении (8) $m = \mu_0$ и экранирующий эффект зависит только от удельной проводимости материала и частоты экранируемого поля.

Если экран сделан из ферромагнитного материала, то при прочих равных условиях внешним полем в нем будет наводиться большая ЭДС благодаря большей концентрации магнитных силовых линий. При одинаковой удельной проводимости материала увеличатся вихревые токи, что приведет к меньшей глубине проникновения и к лучшему экранирующему эффекту. Этим объясняется наличие в знаменателе выражения (8) величины магнитной проницаемости μ . В результате экранирующее действие вытеснением магнитного поля, даваемое любым металлом магнитным и немагнитным, характеризуется произведением $\mu\sigma$.

Из выражения (7) после подстановки в него значения $x = \delta$ следует, что на глубине δ плотность тока и напряженность магнитного поля падает в e раз, т. е. до величины $1/e$, т. е. до величины $1/2,72$,

составляющей 0,37 от плотности и напряженности на поверхности. Так как ослабление поля всего в 2,72 раза на глубине δ недостаточно для характеристики экранирующего материала, то пользуются еще двумя величинами глубины проникновения $\delta_{0,1}$ и $\delta_{0,01}$, характеризующими падение плотности тока и напряженности поля в 10 и 100 раз от их значений на поверхности.

Для определения этих величин на основании выражения (7) составим уравнения

$$e^{-\delta_{0,1}/\delta} = 0,1 \quad \text{и} \quad e^{-\delta_{0,01}/\delta} = 0,01 \quad ,$$

решив которые, получим

$$\begin{aligned} \delta_{0,1} &= \delta \ln 10 = 2,3\delta ; \\ \delta_{0,01} &= \delta \ln 100 = 4,6\delta . \end{aligned}$$

(9)

Для всех высоких частот, начиная с диапазона средних волн, экран из любого применяемого металла толщиной 0,5 ... 1,5 мм действует весьма эффективно.

При выборе толщины и материала экрана следует исходить не из электрических свойств материала, а руководствоваться соображениями механической прочности, веса, жесткости, стойкости против коррозии, удобства стыковки отдельных деталей и осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, удобства пайки, сварки и пр.

Для частот выше 10 МГц медная, и тем более серебряная, пленка толщиной около 0,1 мм дает значительный экранирующий эффект. Поэтому на частотах выше 10 МГц вполне допустимо применение экранов из фольгированного гетинакса или стеклотекстолита.

Значения глубины проникновения для стали с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 50$ показывают, что и на высоких частотах сталь дает больший экранирующий эффект, чем немагнитные металлы. Однако в случае применения экранов из стали необходимо учитывать то, что они могут вносить значительные потери в экранируемые цепи вследствие большого удельного сопротивления ρ и явления гистерезиса. Поэтому такие экраны применимы только в тех случаях, когда с вносимыми потерями можно не считаться.

Листовая сталь обычно не применяется в качестве сердечников высокочастотных катушек, так как вносит весьма большие потери. В этих случаях применяют сердечники из магнитоэлектриков, которые имеют малые потери и малую относительную магнитную проницаемость μ_r .

В связи с этим существует ошибочное мнение о том, что μ_r листовой стали резко падает с повышением частоты, в то время как малое изменение индуктивности при внесении листовой стали в катушку вызывается не столько малым μ_r , сколько размагничивающим действием вихревых токов. В диапазоне частот 10 ... 100 МГц магнитная проницаемость стали изменяется мало и не может упасть ниже 50 [2,9].

Для приближенного расчета учтем, что эффективность экранирования вихревыми токами определяется двумя факторами: обратным полем, создаваемым токами, протекающими в экране, и поверхностным эффектом в материале экрана. На низких частотах, когда толщина экрана $d < \delta$, поверхностный эффект незначителен, действует практически только первый фактор и расчет производится по приближенному уравнению [2,5,9]

$$\mathcal{E} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \mu_0 \sigma D d}{2m} \right)^2} . \quad (10)$$

На высоких частотах, при относительно толстом материале экрана $d > \delta$ действуют оба фактора и эффективность экранирования можно определить по приближенному уравнению [9]

$$\mathcal{E} \approx e^{d/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8 m \mu_r \delta} \right) . \quad (11)$$

В последних двух уравнениях d - толщина стенок экрана; D - ширина коробки прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического экрана; m - коэффициент формы экрана, для прямоугольного $m=1$, для цилиндрического $m=2$, для сферического $m=3$.

На частотах 0,1 ... 1 кГц экранирование вихревыми токами почти не действует и получить ослабление магнитного поля можно только шунтированием его ферромагнитным материалом с большой μ_r . С повышением частоты увеличивается поверхностный эффект, вытесняющий магнитное поле из толщи ферромагнитного материала, уменьшается действующая толщина экрана и эффективность экранирования шунтированием поля падает, а вытеснением поля растет.

Получение большой эффективности экранирования магнитного поля в диапазоне частот 0,1 ... 1 кГц является труднейшей задачей. К конструированию экранов, действующих в этом диапазоне, прибегают в исключительных случаях, когда исчерпаны все другие способы ослабления паразитной индуктивной связи, включая отказ от применения трансформаторов и дросселей или перемещение их в удаленные блоки. Изредка пользуются многослойными экранами из различных материалов [9].

На частотах выше 10 кГц всегда можно подобрать материал и его толщину так, чтобы получить $d > \delta$. Это позволяет пользоваться формулой (11), состоящей из произведения двух членов, из которых первый зависит только от отношения d / δ , а второй всегда больше единицы. Пренебрегая увеличением эффективности экранирования, даваемым вторым членом, получим выражение для минимальной эффективности

$$\mathcal{E}_{\min} = e^{d/\delta}; \quad B_{\min} = \ln \mathcal{E}_{\min} = d/\delta, \quad (12)$$

удобное для ориентировочных расчетов.

При правильно выбранной толщине и материале экрана рассчитанная эффективность экранирования магнитного поля почти всегда оказывается намного больше необходимой. Коэффициент паразитной индуктивной связи пропорционален паразитной взаимоиндуктивности $M_{\text{пар}}$. Очевидно, что подобно паразитной емкостной связи остаточная паразитная индуктивная связь после экранирования магнитного поля будет пропорциональна $M'_{\text{пар}}$. Учитывая, что все другие величины при экранировании не изменяются, получим, что действительная эффективность экранирования магнитного поля

$$\mathcal{E} = M_{\text{пар}} / M'_{\text{пар}} \quad (13)$$

зависит исключительно от качества конструкции и выполнения экрана.

3.5. Одновременное экранирование электрического и магнитного полей

Электрическое и магнитное поля экранируются одними и теми же конструкциями, но действуют они по-разному. Токи, протекающие по экрану под влиянием магнитного поля, значительно превосходят токи, наблюдаемые при экранировании электрического поля. Причиной этого является то, что токи, возбуждаемые в экране магнитным полем, протекают в короткозамкнутом поверхностном слое тела самого экрана, сопротивление которого невелико, в то время как в цепь тока, протекающего при электрическом экранировании, всегда включено

большое сопротивление паразитной емкости между экранируемой точкой и экраном.

Эффективность электрического экрана почти целиком определяется наличием короткого замыкания между экраном и корпусом прибора. При экранировании магнитного поля присоединение экрана к корпусу совершенно не изменяет величины возбуждаемых в экране токов и, следовательно, на эффективность магнитного экранирования не влияет.

Изменение частоты не оказывает влияния на действие электрического экрана. Точно так же незначительно влияет удельная проводимость материала, из которого сделан экран.

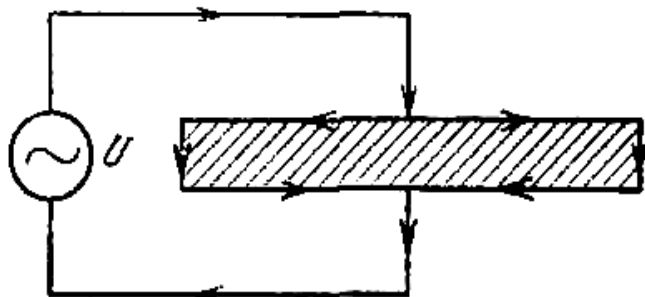


Рис. 11. Поверхностный эффект в идеально проводящей пластине

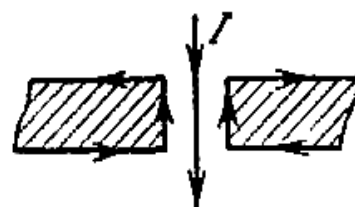


Рис. 12. Проводник с током, пропущенный через отверстие в идеально проводящем материале

Магнитное экранирование целиком зависит от частоты. Чем ниже частота, тем слабее действует магнитный экран, тем большей толщины приходится его делать для достижения одного и того же экранирующего эффекта.

Для создания хорошо действующего экрана необходимо, прежде всего, усвоить следующее.

1. Внутри идеального проводника, т. е. проводника с бесконечно большой проводимостью или сопротивлением, равным нулю, не могут существовать переменные электрические и магнитные поля. На рис. 11 показана пластина из идеального проводника, к которой подведено переменное напряжение. Токи будут протекать по поверхности, не проникая в глубину металла, несмотря на то, что путь по поверхности пластины значительно длиннее прямого. В реальном проводнике с конечной проводимостью поверхностный эффект проявляется в меньшей степени, чем в идеальном, и состоит в уменьшении величины тока по мере удаления от поверхности проводника. Чем выше частота, тем больше вытесняется ток на поверхность проводника и тем, следовательно, ближе такой проводник к идеальному по поверхностному эффекту.

2. Если через отверстие в пластине из идеального проводника (рис. 12) пропустить провод, несущий ток высокой частоты, то в пластине возбудятся поверхностные токи такой силы и такого направления, что сумма токов, протекающих через поперечное сечение отверстия, будет равна нулю. Это необходимо учитывать при установке перегородки, разделяющей экранируемое пространство на два отсека (рис. 13). В таком экране возникают блуждающие токи, создающие высокочастотные разности потенциалов между отдельными точками экрана. При сближении точек присоединения к экрану a и b токи, протекающие по более коротким путям, будут постепенно увеличиваться, а все остальные уменьшаться. Если присоединение к корпусу сделать в точках a_1 и b_1 , то блуждающие токи останутся значительными, особенно в перегородках между отсеками. Только соединение с корпусом в точках a_2 и b_2 позволяет

освободить его и перегородку от блуждающих токов. Это верно для частот, на которых влиянием паразитных емкостей цепи ab и включенных в нее деталей относительно корпуса можно пренебречь. На более высоких частотах к токам, показанным на рис. 13, добавляются емкостные токи, и *любое перемещение точек a и b не избавит корпус от блуждающих токов.*

3. Если на пути переменного магнитного потока (рис. 14) установлен металлический лист из идеального проводника с отверстием, то суммарный поток через отверстие будет равен нулю. Это означает, что число магнитных силовых линий, выходящих из отверстия, равно числу линий, входящих в него.

Из этих положений следует, что если генератор высокой частоты вместе с его электропитанием заключен в экран из хорошо проводящего материала без отверстий с толщиной стенок примерно 1 мм, то снаружи экрана не будет ни электрического, ни магнитного поля.

Малые отверстия почти не ухудшают качество экрана, так как согласно рис. 14 магнитное поле, выходящее из малого отверстия, может быть обнаружено только вблизи отверстия. Длинные узкие щели, допустимые в электрическом экране, опасны в магнитном, если они направлены поперек направления вихревых токов (рис. 15). В тех случаях, когда экранируются сложные электрические цепи, в которых направления магнитных потоков могут быть самыми разнообразными, следует избегать длинных щелей. Для этого желательно крышки и экраны скреплять друг с другом и с корпусом прибора так, чтобы возможные щели не превосходили по длине 0,1 ... 1,0 % длины волны. Это важно и для экранирования электрического поля, так как от качества контакта между частями экрана, определяющего разность потенциалов между ними, почти целиком зависит эффективность электрического экрана

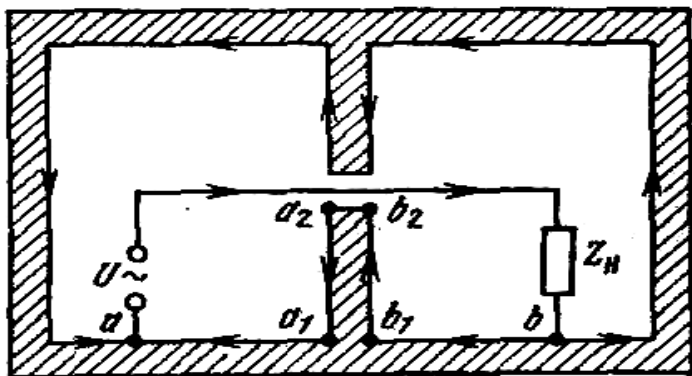


Рис. 13. Возникновение в экране блуждающих токов

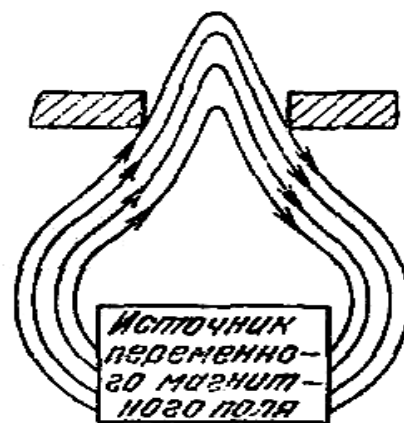


Рис.14. Прохождение магнитного потока через отверстие

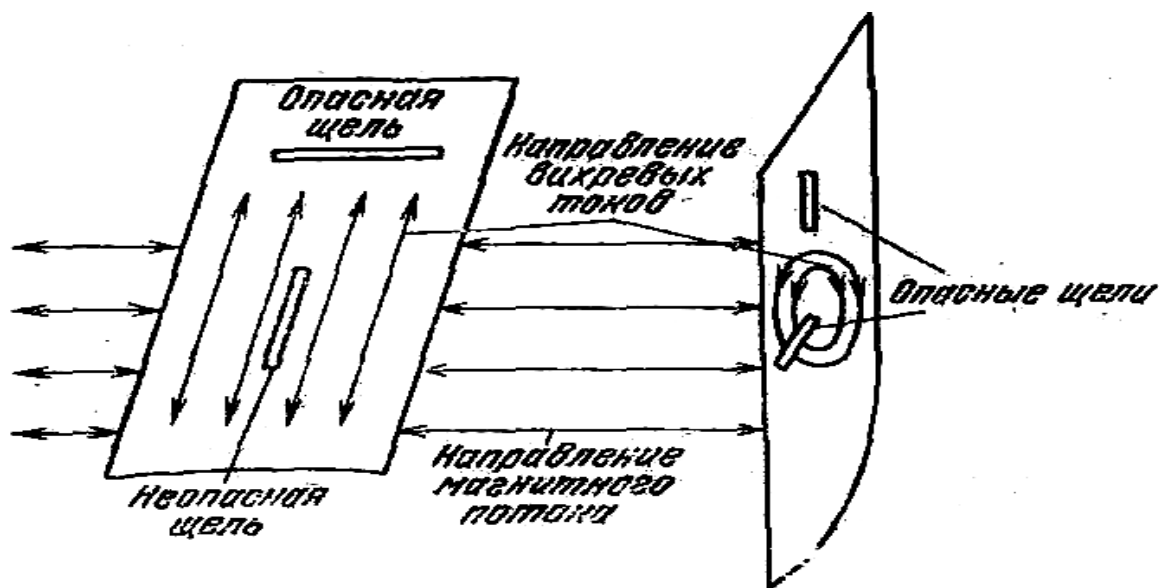


Рис. 15. Влияние длинных узких щелей в экране

3.6. Конструкция крышек экранов

Особенно тщательно нужно подходить к выбору конструкции крышек, прикрывающих одновременно несколько экранированных отсеков. Пусть четыре отсека А, Б, В и Г (рис. 16), экранированные друг от друга перегородками, прикрываются общей крышкой, имею-

щей хороший контакт по периметру в точках I и $б$. При снятой крышке

(рис. 16, a) источники наводки $И$, расположенные в отсеках A и $Б$, связаны с приемниками наводки $П$, расположенными в отсеках B и $Г$,

через паразитные емкости C_1, C_2, C_3 и C_4 . Когда крышка надета (рис. 16, $б$), между ней и точками $И$ и $П$ образуются емкости C'_1, C'_2, C'_3 и C'_4 . При работе на относительно низкой частоте, на которой влияние индуктивного сопротивления крышки и переходного сопротивления контактов в точках I и $б$ незначительно, эти емкости оказываются соединенными с корпусом и крышка почти полностью устраняет паразитные наводки.

На высоких, и особенно ультравысоких, частотах точки $И$ и $П$ оказываются опять связанными через те же емкости C'_1, C'_2, C'_3 и C'_4

и

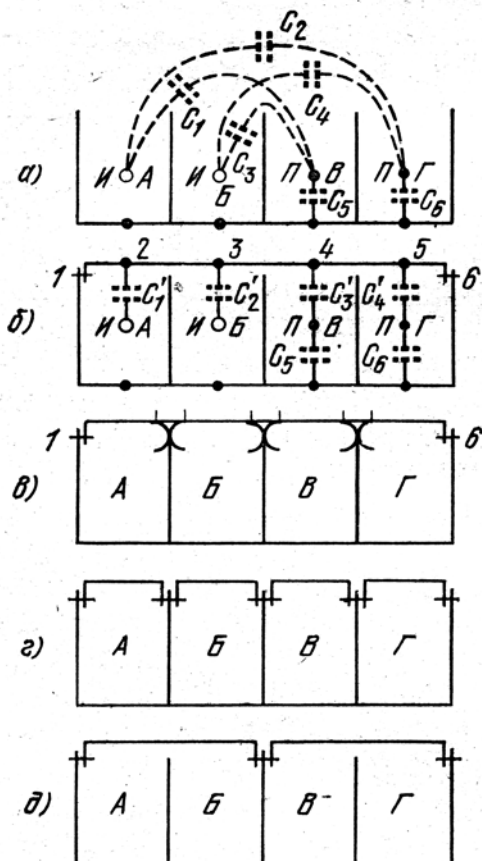


Рис. 16. Паразитная связь: a – без общей крышки; $б$ – с общей крышкой; $в$ – при наличии контактных губок; $г$ – при наличии отдельных крышек; $д$ – при наличии общих крышек для двух и более отсеков

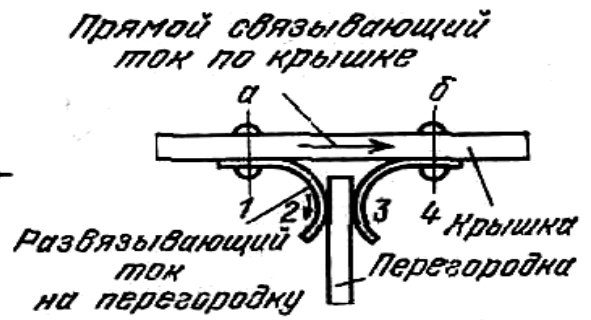
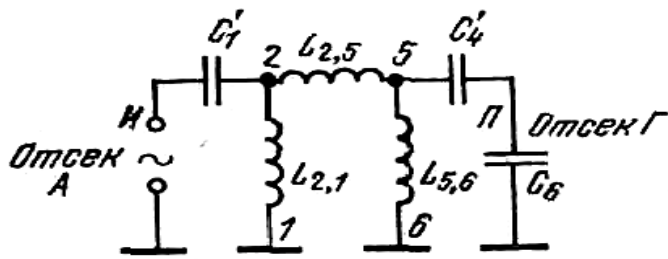


Рис. 17. Эквивалентная схема паразитной связи через крышку

Рис.18.Остаточная паразитная связь при соединении крышки с перегородкой контактными губками

оказываются опять связанными через те же емкости C'_1 , C'_2 , C'_3 и C'_4 и индуктивные делители, образованные крышкой. Так, например, (рис. 16, б и 17), напряжение источника, находящегося в отсеке А, через первый делитель, составленный из емкости C'_1 и индуктивности $L_{2,1}$ участка крышки 2-1, через второй делитель, составленный из индуктивностей $L_{2,5}$ и $L_{5,6}$ участков крышки 2-5 и 5-6, и через третий делитель, составленный из емкостей C'_4 и C_6 , передается в отсек Г, в котором находится приемник наводки. Так как емкости C'_1 , C'_2 , C'_3 и C'_4 значительно больше емкостей C_1 , C_2 , C_3 и C_4 то может оказаться, что закрывание экранированных отсеков крышкой не только не ослабит паразитную связь, но даже увеличит ее, несмотря на хороший контакт между крышкой и общим корпусом.

Для устранения паразитной связи этого вида к крышке приклепывают пружинные контактные губки (рис. 16, в), обеспечивающие контакт с промежуточными перегородками почти по всему их периметру. Такое решение имеет следующие недостатки:

- а) требуется точная установка перегородок и губок, чтобы обеспечить их сопряжение;
- б) имеется опасность повреждения губок при надевании крышки;
- в) для изготовления губок необходимо применять специальный хорошо пружинящий металл;

г) паразитная связь устраняется не полностью вследствие того, что участок, состоящий из четырех переходных контактов 1 , 2 , 3 и 4 (рис. 18), шунтируется прямым участком крышки $a - б$.

От этих недостатков свободна конструкция, показанная на рис. 16, $з$, где каждый отсек закрывается отдельной крышкой. Кроме того, в этом варианте не обязательно иметь хороший контакт по всей поверхности соприкосновения крышки с экранируемым отсеком; достаточно прикрепить ее в нескольких точках.

Если заведомо известно, что источники наводок находятся в отсеках A и B , а приемники - в отсеках B и $Г$ или что связь между конкретными отсеками менее опасна, чем связь между другими отсеками, то можно упростить конструкцию, применив общие крышки для двух или более отсеков, как это показано на рис. 16, $д$.

3.7. Экранирование электромагнитного поля излучения

Если на пути распространяющейся в воздухе электромагнитной волны поставить экранирующий металлический лист толщиной d , то действие его определится двумя факторами: отражением волны от металлической поверхности экрана и затуханием преломленной волны в теле экрана [1,2,5,9].

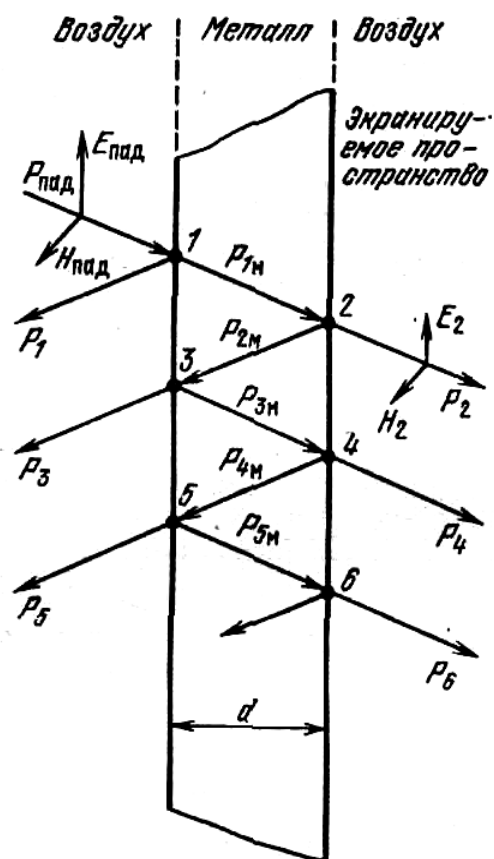


Рис. 19. Действие экрана на пути электромагнитной волны

Пусть (рис. 19) на металлический экран падает плоская волна $P_{пад}$ с векторами электрического $E_{пад}$ и магнитного $H_{пад}$ полей, параллельными плоскости экрана. В точке 1, находящейся на границе сред воздух - металл, произойдет частичное отражение падающей волны, в результате которого появится обратная волна P_1 , и частичное преломление, в результате которого в тело экрана проникнет волна P_{1M} . Распространяясь в металлической среде, преломленная волна P_{1M} будет затухать по экспоненциальному закону (7) и в точке 2, расположенной на границе сред металл - воздух, напряженности обоих полей будут в $e^{d/\delta}$ раз меньше, чем в точке 1. В точке 2 снова произойдет преломление и отражение. Преломленная волна P_2 выйдет в экранируемое пространство, а отраженная волна P_{2M} будет затухать в

металле и в точке 3 напряженности полей окажутся в $e^{2d/\delta}$ раз меньше, чем в точке 1. Затем будут происходить отражения и преломления в точках 3, 4, 5 и т. д. до полного затухания волны в металле.

В экранируемое пространство будут проникать волны P_2, P_4, P_6, \dots , преломленные в точках 2, 4, 6, Суммарное их воздействие определяет напряженности полей E и H за экраном. Напряженности полей волны P_4 будут $e^{2d/\delta}$ в раз меньше, чем волны P_2 ; волны P_6 - в $e^{4d/\delta}$ раз меньше, чем волны P_2 и т. д. Учтем, что экранирование электромагнитного поля излучения может представлять интерес только на частотах не ниже 10^7 Гц, на которых при толщине любых применяемых металлов $d > 0,1$ мм эквивалентная глубина проникновения $\delta < 0,5d$. Взяв минимальное соотношение $d = 2\delta$, получим, что напряженности полей волны P_4 будут в $e^4 = 55$ раз меньше напряженностей полей волны P_2 . Это позволяет упростить расчет, пренебрегая всеми волнами, поступающими в экранируемое пространство, кроме P_2 . Ошибка, получающаяся при таком допущении, не превосходит 2 %.

Для расчета напряженности полей E_2 и H_2 в экранируемом пространстве рассмотрим процесс отражения и преломления электромагнитной энергии от границ сред воздух - металл и металл - воздух. Он определяется соотношением между волновым сопротивлением воздуха

$$Z_{с\text{ возд}} = 377 \text{ Ом},$$

которое чисто активно, и модулем волнового сопротивления металла

$$Z_{с\text{ мет}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}, \quad (14)$$

который в сотни и тысячи раз меньше волнового сопротивления воздуха. При отражении происходит поворот на 180° фазы одного из векторов, составляющих падающую волну E или H , так как только в этом случае направление движения волны изменится на обратное. От-

ражение волны, распространяющейся в воздухе, от металлической поверхности сопровождается поворотом вектора E , а отражение волны, распространяющейся в металле, от поверхности раздела металл - воздух сопровождается поворотом на 180° вектора H .

Физически это объясняется тем, что экран имеет большую проводимость σ и на нем могут получаться только небольшие падения напряжения, даже при протекании больших токов. Поверхность экрана почти эквипотенциальна, параллельный ей вектор электрического поля должен быть очень мал, что и обеспечивается появлением отраженной волны $P_{от}$ (рис. 20, а) с вектором $E_{от}$ обратного знака. В проникающей в металл волне электрическое поле $E_{пр}$ близко к нулю и энергия волны, распространяющейся в металле, почти целиком сосредоточена в магнитном поле $H_{пр}$. Соотношение между полями в металле $E_{пр} / H_{пр} = Z_{с\text{ мет}}$ соответствует малой величине волнового сопротивления металла. При переходе волны из металла в воздух отражающей поверхностью является воздух (рис. 20, б) при $\sigma = 0$ и получающееся в нем магнитное поле определяется только малыми токами смещения. Уменьшение

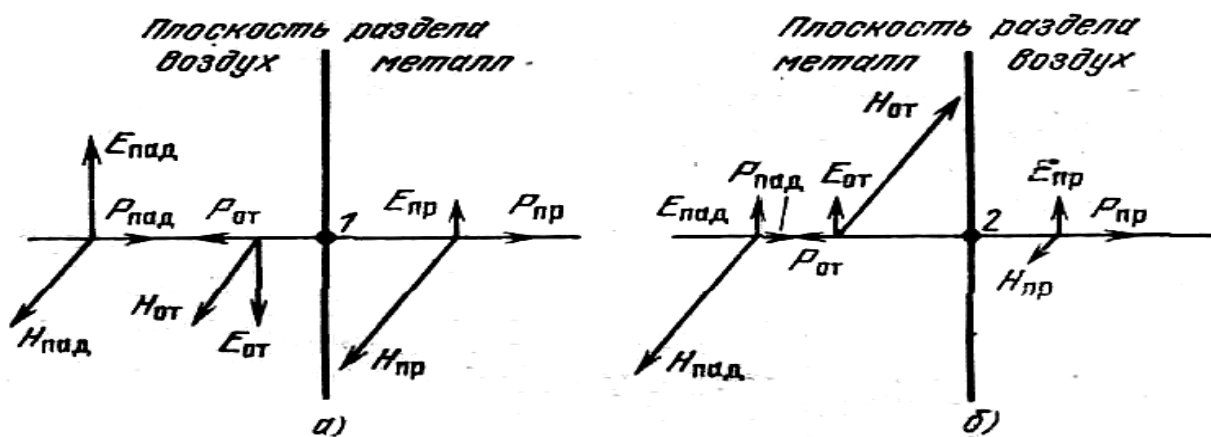


Рис. 20. Отражение и преломление электромагнитной волны

магнитного поля $H_{пр}$ по сравнению с полем в металле $H_{пад}$ обеспечивается поворотом на 180° отраженного вектора $H_{от}$. В результате в вышедшей за пределы экрана волне восстанавливается

соотношение между векторами E_{np} и H_{np} , соответствующее величине $Z_{c\text{ возд}} = 377 \text{ Ом}$.

Рассмотренный выше процесс подобен отражению электромагнитной волны, движущейся вдоль несогласованной длинной линии. Если она на конце закорочена, то отраженная волна напряжения противоположна по фазе падающей волне и результирующее напряжение равно нулю, как и должно быть при коротком замыкании. Волна тока отражается без изменения фазы и результирующий ток короткого замыкания в два раза больше тока, протекающего через согласованную нагрузку. При разомкнутой линии волна тока отражается со сдвигом фазы на 180° по отношению к падающей волне. Результирующий ток равен нулю, как и должно быть в разомкнутой цепи. Волна напряжения отражается без изменения фазы и результирующее напряжение в два раза больше напряжения на конце согласованной линии.

Определим коэффициенты преломления электрической и магнитной волн для плоскостей раздела сред воздух - металл и металл - воздух. Напряженности электрического и магнитного полей в обеих средах плоскости раздела должны иметь одинаковые значения. Поэтому, в соответствии с рис. 20, а, для плоскости раздела воздух - металл можно написать:

$$E_{nad} - E_{om} = E_{np} \quad , \quad (15)$$

$$H_{nad} + H_{om} = H_{np} \quad . \quad (16)$$

Учтя, что $E_{nad} / H_{nad} = E_{om} / H_{om} = Z_{c\text{ возд}}$ и $E_{np} / H_{np} = Z_{c\text{ мет}}$, в последнем уравнении можно сделать замену:

$$E_{nad} / Z_{c\text{ возд}} + E_{om} / Z_{c\text{ возд}} = E_{np} / Z_{c\text{ мет}} \quad . \quad (17)$$

Решая совместно (15) и (17), после преобразований получим величину коэффициента преломления волны E при переходе из воздуха в металл:

$$K_{np \text{ в м}}^E = \frac{E_{np}}{E_{над}} = \frac{2Z_{с мет}}{Z_{с возд} + Z_{с мет}} . \quad (18)$$

Произведя замену в (15), получаем уравнение

$$E_{над} Z_{с возд} - H_{от} Z_{с возд} = H_{np} Z_{с мет} , \quad (19)$$

решая которое совместно с (16), после преобразований получим величину коэффициента преломления волны H при переходе из воздуха в металл:

$$K_{np \text{ в м}}^H = \frac{H_{np}}{H_{над}} = \frac{2Z_{с возд}}{Z_{с возд} + Z_{с мет}} . \quad (20)$$

Аналогично, на основании рис. 20, б составляются уравнения

$$E_{над} + H_{от} = E_{np} , \quad (21)$$

$$H_{над} - H_{от} = H_{np} , \quad (22)$$

в которые вводятся значения волновых сопротивлений сред $Z_{с мет}$
 $= E_{над} / H_{над} = E_{от} / H_{от}$ и $Z_{с возд} = E_{np} / H_{np}$, а после совместных решений и преобразований получаются величины коэффициентов преломления волн E и H при переходе из металла в воздух:

$$K_{np \text{ м в}}^E = \frac{2Z_{с возд}}{Z_{с возд} + Z_{с мет}} , \quad (23)$$

$$K_{np \text{ м в}}^H = \frac{2Z_{с мет}}{Z_{с возд} + Z_{с мет}} . \quad (24)$$

Сравнивая полученные значения коэффициентов преломления для рассмотренных четырех случаев, можно установить, что они имеют две разные, резко отличные величины. Большой коэффициент преломления

$$K_{np \text{ в м}}^H = K_{np \text{ м в}}^E = \frac{2Z_{с возд}}{Z_{с возд} + Z_{с мет}} \quad (25)$$

получается в тех случаях, когда отражающая поверхность имеет большую проводимость для поля H (почти короткое замыкание) или малую проводимость для поля E (почти холостой ход). При уменьшении $Z_{c\text{ мет}}$ эти коэффициенты растут медленно и когда $Z_{c\text{ мет}} \rightarrow 0$ $K_{пр\ в\ м}^H = K_{пр\ м\ в}^E \rightarrow 2$, что соответствует приведенной выше аналогии с длинной линией. Малый коэффициент преломления

$$K_{пр\ в\ м}^E = K_{пр\ м\ в}^H = \frac{2Z_{c\text{ мет}}}{Z_{c\text{ возд}} + Z_{c\text{ мет}}} \quad (26)$$

получается, когда отражающая поверхность имеет большую проводимость для поля E или малую проводимость для поля H . При $Z_{c\text{ мет}} \rightarrow 0$ $K_{пр\ в\ м}^E = K_{пр\ м\ в}^H \rightarrow 0$, что также соответствует аналогии с длинной линией.

Возвращаясь к рис. 17, определим напряженности полей E и H в точках 1 и 2. Преломленная волна P_{1M} будет иметь в точке 1 напряженности $E_{1M} = K_{пр\ в\ м}^E E_{над}$ и $H_{1M} = K_{пр\ в\ м}^H H_{над}$. Распространяясь в металлической среде, эта волна будет затухать по экспоненциальному закону, и в точке 2 ее напряженности уменьшатся до значений

$$E'_{1M} = K_{пр\ в\ м}^H e^{-d/\delta} E_{над}$$

и

$$H'_{1M} = K_{пр\ в\ м}^H e^{-d/\delta} H_{над} .$$

После преломления в точке 2 волна P_2 , вышедшая в экранируемое пространство, будет иметь напряженности

$$\begin{aligned} E_2 &= K_{пр\ м\ в}^E E'_{1M} = K_{пр\ в\ м}^E K_{пр\ м\ в}^E e^{-d/\delta} E_{над} , \\ H_2 &= K_{пр\ м\ в}^H H'_{1M} = K_{пр\ в\ м}^H K_{пр\ м\ в}^H e^{-d/\delta} H_{над} . \end{aligned}$$

На основании (25) и (26) установим, что входящие в последние две формулы произведения коэффициентов преломления для полей E и H имеют одну величину

$$K_{пр\ в\ м}^E K_{пр\ м\ в}^E = K_{пр\ в\ м}^H K_{пр\ м\ в}^H = \frac{4Z_{c\text{ мет}} Z_{c\text{ возд}}}{(Z_{c\text{ возд}} + Z_{c\text{ мет}})^2} . \quad (27)$$

Отсюда следует, что эффективность экранирования электромагнитного поля излучения, одинаковая для полей E и H , составляющих волну, будет равна

$$\mathcal{E} = \frac{E_{над}}{E_2} = \frac{H_{над}}{H_2} = e^{d/\delta} \frac{(Z_{с\text{ возд}} + Z_{с\text{ мет}})^2}{4Z_{с\text{ мет}}Z_{с\text{ возд}}} \approx \frac{e^{d/\delta} Z_{с\text{ возд}}}{4Z_{с\text{ мет}}} \quad (28)$$

3.8. Экранирование проводов. Кабели

В пространстве, окружающем провод, соединяющий генератор переменного напряжения U с нагрузкой Z_H (рис. 21), создаются переменные электрическое и магнитное поля. Они могут оказаться причиной наводки паразитных напряжений в находящихся вблизи деталях. Применение провода с экранирующей металлической оболочкой, не соединенной с корпусом, никакого экранирующего эффекта не дает.

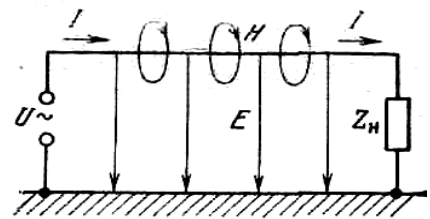


Рис.21. Электрическое и магнитное поля в пространстве, окружающем провод

Напряженность магнитного поля не изменится, так как в оболочке не могут возникнуть дополнительные токи, магнитное поле которых могло бы уменьшить поле, создаваемое основным током в проводе.

Напряженность электрического поля также почти не изменится, так как емкость C_0 , которую имел провод относительно корпуса, при наличии оболочки разделится на две последовательно соединенные емкости: провод - оболочка и оболочка - корпус. Эти емкости в сумме будут лишь немного больше емкости C_0 из-за влияния изоляционного материала с диэлектрической постоянной $\epsilon_r \neq 1$ в промежутке провод - оболочка.

При соединении оболочки с корпусом в любой одной точке (рис. 22) емкость оболочка - корпус оказывается замкнутой накоротко, все электрическое поле концентрируется в емкости провод - оболочка.

- оболочка и внешнее электрическое поле отсутствует. Такое соединение резко увеличивает емкостный ток, который протекает по цепи генератор - провод - оболочка - корпус - генератор, минуя полезную нагрузку Z_H . Чтобы полностью защитить внешнее пространство от воздействия электрического поля, необходимо особенно тщательно выполнять соединение оболочки с корпусом, через которое протекает указанный емкостный ток. Здесь совершенно недопустимы соединительные провода любой длины. Подключение оболочки должно осуществляться путем непосредственного контакта, лучше всего с припайкой или приваркой к корпусу. Соединение оболочки с корпусом в одной точке не освобождает окружающее пространство от магнитного поля.

Для экранирования магнитного поля необходимо создать поле такой же величины и обратного направления. Для этого нужно весь обратный ток генератора, который в схеме рис. 21, 22 протекает по корпусу прибора, направить через экранирующую оболочку провода.

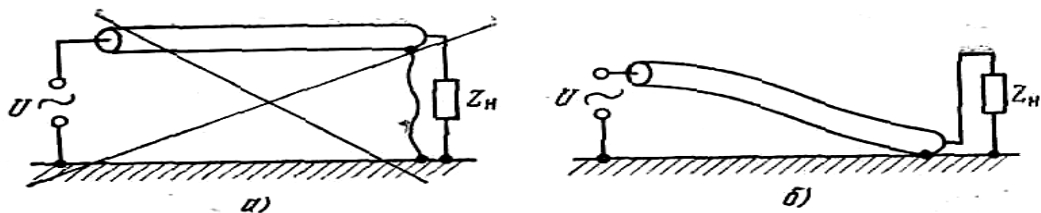


Рис. 22. Экранирование только электрического поля: а – плохое; б - хорошее

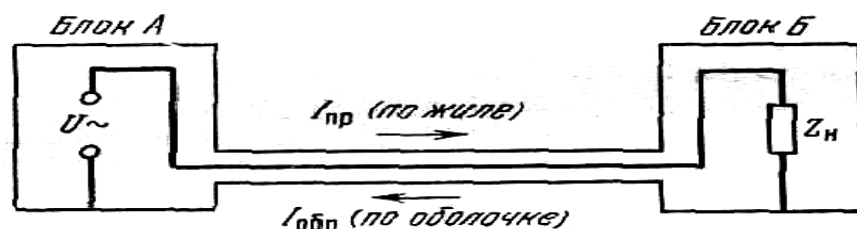


Рис. 23. Полное экранирование электрического и магнитного полей

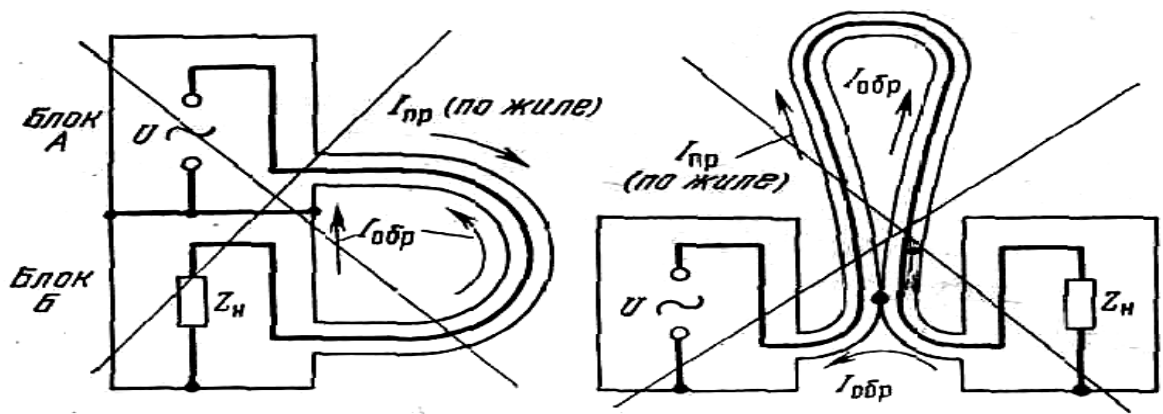


Рис. 24. Нарушение экранировки при замыкании корпусов приборов или экранирующей оболочки провода

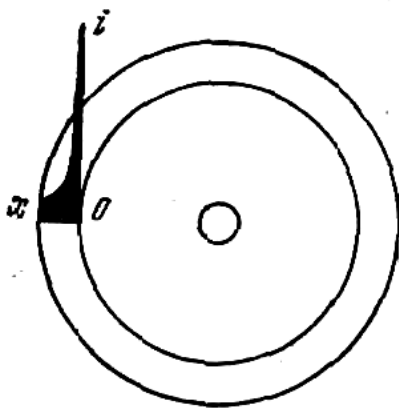


Рис. 25. Распределение плотности тока по экранирующей оболочке

Тогда магнитный поток $\Phi_{пр}$, создаваемый током $I_{пр}$, протекающим по проводу, будет равен магнитному потоку $\Phi_{обр}$, создаваемому обратным током $I_{обр}$, протекающим по оболочке, и в любой точке окружающего пространства выполнится условие $\Phi_{пр} - \Phi_{обр} = 0$. Для полного осуществления этого принципа необходимо, чтобы экранирующая оболочка была единственным соединением корпуса отсека генератора и отсека нагрузки (рис. 23).

На низких частотах дополнительное соединение корпусов или частичное замыкание оболочки (рис. 24) может нарушить экранирование, так как при этом часть обратного тока будет протекать, минуя оболочку.

На высоких частотах из-за поверхностного эффекта обратный ток протекает в основном по внутренней поверхности оболочки. Величина его уменьшается по экспоненциальному закону по мере приближения к наружной поверхности (рис. 25). Чем выше частота, тем меньше глубина проникновения тока внутрь оболочки, тем

меньшая часть тока протекает по ее наружной поверхности и тем меньше проявляется эффект нарушения экранирования при наружном коротком замыкании оболочки (рис. 24). Практически, если глубина проникновения $\delta_{0,01}$, рассчитанная по (9), меньше толщины стенок экранирующей оболочки, ток, протекающий по наружной поверхности, составляет меньше 1 % от полного тока, протекающего по оболочке. Этот ток создает между корпусами приборов и отдельными точками экранирующей оболочки настолько малую разность потенциалов, что нарушение экранирования от наружного короткого замыкания оболочки на частотах выше 10 МГц почти не наблюдается.

Прежде чем применить провода с экранирующими оплетками, необходимо учесть следующие их особенности, которые могут привести к нарушению нормальной работы прибора.

Наличие экранирующей оболочки резко увеличивает емкость провода на корпус, что большей частью нежелательно, за исключением случаев экранирования проводов питания, когда эта емкость оказывается включенной параллельно емкости блокировочного конденсатора.

Экранированные провода громоздки, неудобны при монтаже и требуют предохранения от случайных соединений с другими деталями.

Длина экранированного участка должна быть меньше четверти длины самой короткой волны передаваемого по проводу спектра частот. Если это условие не соблюдается, то применение экранированного провода нельзя рассматривать как введение дополнительной емкости. Тогда экранированный участок будет длинной коаксиальной линией, которая во избежание возникновения стоячих волн, могущих привести к искажению формы сигнала, должна быть нагружена на сопротивление, равное волновому.

Поэтому применение экранированных проводов всегда крайне нежелательно. В тех случаях, когда экранирование производится в *пределах одного металлического кожуха*, следует рассмотреть

всевозможные варианты устранения паразитных связей, прежде чем прибегнуть к экранированным проводам. При этом *почти всегда* найдется более выгодный вариант и можно будет обойтись без экранированных проводов. В частности, можно применять «скрученные пары».

Таким образом, экранированные провода, коаксиальные кабели и многожильные экранированные шланги с экранированными проводами внутри них следует применять в основном для соединения отдельных блоков и узлов друг с другом. В этом случае экранирование проводов позволяет:

- а) освободиться от взаимных паразитных наводок внутри устройства, состоящего из нескольких блоков;
- б) защитить многоблочные устройства от паразитных наводок со стороны других приборов;
- в) предохранить от паразитных наводок приборы, находящиеся в пространстве, окружающем многоблочное устройство.

Выполнение всех этих функций целиком зависит от качества экрана и присоединения его к корпусам соединяемых приборов.

Сплошное экранирование проводов и коаксиальных кабелей металлической трубой применяется крайне редко. В большинстве случаев используется оплетка из луженого или серебряного провода, имеющая ряд механических преимуществ, но содержащая отверстия, достигающие 10 ... 30 % общей площади экрана. Эти отверстия почти не влияют на экранирование электрических полей, но ухудшают экранирование магнитных полей, действуя на величины вихревых токов в теле экрана. Иногда улучшение эффективности экрана достигается применением двух или трех слоев оплетки [2].

Значительное уменьшение внешних полей можно получить, не прибегая к экранированным кабелям, применением двухпроводной линии, провода которой скручены в шнур или проложены параллельно на небольшом расстоянии. Такая линия действует хорошо, если по обоим проводам протекают в противоположные стороны одинаковые токи.

3.9. Экран как объемный резонатор

Как и во всяком замкнутом объеме, процесс движения электромагнитной энергии в экране сопровождается рядом явлений, к которым относятся:

накопление и поглощение энергии; отражение электромагнитных волн и перераспределение электромагнитного поля;

резонансные явления; реакция экрана на экранируемые устройства;

излучение электромагнитной энергии через отверстия и щели в экране; проникновение в экран внешних электромагнитных полей.

Эти явления могут возникать при расположении излучателя (источника) электромагнитных колебаний как внутри, так и вне объема экрана. Более удобным для анализа является случай расположения источника внутри экрана. Поэтому внешний источник поля целесообразно представлять эквивалентным ему внутренним излучателем.

Каждое из указанных явлений может в определенной степени привести к нарушению условий функционирования экрана, т. е. к недопустимому снижению его эффективности.

В зависимости от назначения и конструкции экрана влияние указанных факторов будет различным: некоторые будут иметь преобладающее значение, другие - второстепенное, последствиями третьих можно практически пренебречь.

Экран как объемный резонатор обладает распределенными параметрами, значения которых определяются его формой и размерами, толщиной и свойствами материала, особенностями конструкции. С целью упрощения допустим, что экран представляет собой параллелепипед (рис. 26), длина которого l , ширина b и высота h .

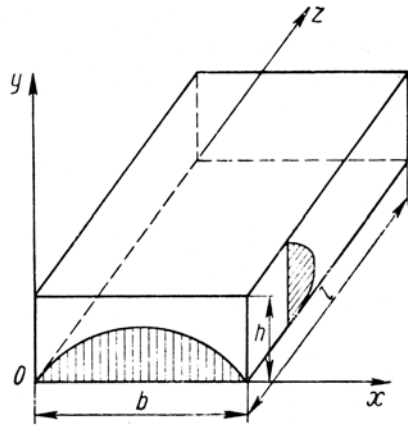


Рис. 26. Распределение поля основ-ного типа в резонаторе

Обобщенным параметром, характеризующим размеры экрана, является *эквивалентный радиус*

$$R_{\text{э}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\rho} blh} \approx 0,62 \sqrt[3]{V_{\text{экр}}}, \quad (29)$$

где $V_{\text{экр}}$ - внутренний объем экрана, м^3 .

Если стороны параллелепипеда находятся в соотношениях «золотого сечения» $8 : 5 : 3$, при которых внутри экрана наблюдается наиболее равномерное распределение поля $E(H)$, то

$$b^2 = hl; \quad h + b = l, \quad S = bl = 1,62 V_{\text{экр}}^{3/2};$$

$$h = 0,62 \sqrt[3]{V_{\text{экр}}}; \quad b = \sqrt[3]{V_{\text{экр}}}; \quad l = 1,62 \sqrt[3]{V_{\text{экр}}};$$

$$S = bl = 1,62 V_{\text{экр}}^{3/2}; \quad \sum S = 6,5 \sqrt[3]{V_{\text{экр}}}, \quad (30)$$

где $\sum S$ - общая поверхность экрана.

Когда правило «золотого сечения» удовлетворяется, то, как следует из (30), $R_{\text{э}} = h$.

Как известно, способность резонатора накапливать энергию электромагнитного поля оценивается его собственной добротностью:

$$Q = \omega_0 \frac{W}{P_n} = \frac{\omega_0 L_{\text{э}}}{R_{0\text{э}}}, \quad (31)$$

где ω_0 - резонансная частота; W - запасенная в резонаторе энергия; P_n - мощность потерь, рассеиваемая в резонаторе; $L_{\text{э}}$ - эквивалентная индуктивность резонатора; $R_{0\text{э}}$ - общее сопротивление потерь резонатора.

При заданной напряженности электрического и магнитного полей количество запасенной в резонаторе энергии пропорционально его объему $V_{экр}$, а мощность потерь пропорциональна объему поверхностного слоя $\delta \Sigma S$, в котором происходят потери. Поэтому

$$Q \approx V_{экр} / \delta \Sigma S . \quad (32)$$

Следовательно, добротность замкнутого экрана как резонатора пропорциональна его объему и обратно пропорциональна глубине проникновения поля в его металлическую поверхность. В идеальном случае добротность велика, причем она больше для немагнитных материалов, у которых δ больше, но потерь меньше.

Запасенная резонатором электромагнитная энергия [9]

$$W = \frac{\varepsilon}{8} E^2 V_{экр} , \quad (33)$$

где ε - диэлектрическая постоянная среды внутри резонатора; E - напряженность поля внутри резонатора.

В зависимости от мощности излучения накопленная резонатором энергия может оказаться значительной, тогда E достигает больших значений. С другой стороны, по аналогии с акустическим полем в замкнутом объеме, когда длина волны меньше и соизмерима с линейными размерами резонатора, энергия стоячей волны может быть определена из выражения [9]

$$W = \frac{P}{\Sigma S} \frac{4R_0}{(1 - R_0)c} V_{экр} , \quad (34)$$

где $V_{экр}$ - объем резонатора; P - мощность излучателя; R_0 - коэффициент отражения поверхности резонатора; c - скорость распространения электромагнитной волны.

Из (33) и (34) находим напряженность поля в резонаторе:

$$E \approx \sqrt{\frac{32 PR_0}{ce \Sigma S (1 - R_0)}} .$$

Для воздуха при $\varepsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф / м получим

$$E \left[\frac{B}{m} \right] \approx 110 \sqrt{\frac{PR_0}{(1-R_0)\Sigma S}} \quad (35)$$

Если размеры экрана значительно превышают длину волны, то это приводит к неравномерному распределению поля внутри него. В отдельных местах внутреннего пространства, особенно в углах, может наблюдаться значительная концентрация поля, в то время как в других частях экрана поле будет ослаблено. Щели, отверстия в экране приводят к дополнительному уменьшению запасенной энергии. Поэтому в общем случае формула (35) является приближенной. Кроме того, определяемая выражением (35) напряженность поля характеризует только одну часть общего поля в замкнутом экране - *диффузное поле*, под которым понимается поле, возникшее в установившемся режиме после многократных отражений внутри резонатора. Вторым слагаемым является поле прямой волны. Таким образом, общая электромагнитная энергия

$$W_{об} = W_{отр} + W_{пр}.$$

На частотах выше 100 МГц обычно рассматривается плотность потока мощности. В диффузном поле плотность потока мощности

$$\Pi_{отр} = \frac{P}{\Sigma S} \frac{4R_0}{1-R_0},$$

а плотность потока мощности падающей волны $\Pi_{пр} = PG / 4\pi r^2$.

Общая плотность потока мощности в резонаторе

$$\Pi_{об} = \Pi_{отр} + \Pi_{пр} = \frac{PG}{4\pi r^2} + \frac{P}{\Sigma S} \frac{4R_0}{1-R_0}, \quad (36)$$

где P - средняя мощность излучения; R_0 - коэффициент отражения; G - коэффициент усиления антенны (излучателя) в данном направлении; r - расстояние до источника (излучателя).

Как видно из (36), плотность потока мощности в падающей волне является функцией расстояния до источника и его направленности как излучателя, а эквивалентная плотность потока мощности отражения распределена почти равномерно по всему объему. При отсутствии поглощающего материала внутри экрана

мощность поля в резонаторе может быть во много раз больше мощности источника из-за накопления энергии. При поглощении поля внутри экрана плотность потока мощности также получает некоторое приращение, которое определяется качеством поглощающего материала и аналитически обусловлено множителем $4R_0/(1 - R_0)$. Этот множитель очень велик при R_0 , близких к единице, при $R_0 = 0,2$ он становится равным единице и тогда эквивалентная плотность потока отраженной мощности является функцией только общей поверхности экрана.

При $R_0 \leq 10^{-3}$ множитель $4R_0 / (1 - R_0) \leq 0,004$. Следовательно, суммарное поле определяется только падающей волной.

Накопление энергии электромагнитного поля в экране как в объемном резонаторе является одним из наиболее существенных факторов, которые должны учитываться как при проектировании системы экранирования, так и в ходе ее эксплуатации. Влияние этого фактора на функционирование экрана и находящиеся внутри объекты определяется снижением эффективности экранирования, опасностью пробоя диэлектрика внутри экрана, воздействием поля на экранируемые устройства, воздействием электромагнитного поля на оператора, находящегося в экранированном объеме.

Для обеспечения нормального функционирования экрана при фиксированной мощности излучателя необходимо должным образом выбрать ΣS , R_0 , r . Возможность варьировать величину r определяется из соотношения между плотностью потока мощности падающей волны и диффузного поля:

$$A = \frac{\Pi_{np}}{\Pi_{отр}} = \frac{G \Sigma S (1 - R_0)}{16\pi r^2 R_0} .$$

Приравняв это отношение единице, найдем расстояние до излучателя, при котором плотность потока мощности прямой волны равна плотности потока мощности диффузного поля

$$r_{зр} = 0,14 \sqrt{G \Sigma S (1 - R_0) / R_0} , \quad (37)$$

где r_{gp} - граничное значение r .

Если $r < r_{gp}$, плотность потока мощности определяется в основном падающей волной, а при $r > r_{gp}$ - диффузным полем. В стальном экране для точечного источника при $R_0=0,99$, $\sum S=100$ м² имеем $r_{gp}=0,14$ м. Следовательно, в этом случае только в непосредственной близости от источника ($r < 0,14$ м) плотность потока мощности определяется прямой волной. В реальном экране из-за наличия щелей и отверстий плотность потока мощности диффузного поля уменьшается, в результате чего r_{gp} возрастает, и практически измерение плотности потока мощности прямой волны производится на расстояниях, не превышающих 0,3 м.

При конструировании экранов для мощных источников помимо учета распределения поля необходимо принять меры по уменьшению потерь в экране. Потери в экране создаются за счет вихревых токов, протекающих по экрану и вызывающих его нагревание. Интенсивные потери мощности в экране могут привести к значительному его перегреву, вплоть до расплавления, в частности, при экранировании сильных электромагнитных полей. Принято, что экран должен иметь такие размеры и конструкцию, быть изготовленным из такого материала, чтобы потери не превышали 1 % мощности излучения. Потери в резонаторе могут быть определены из (31) и (32):

$$P_n = \omega_0 W \delta \frac{\sum S}{V_{\text{экр}}} \quad (38)$$

В реальных экранах потери на вихревые токи для точечного источника можно определить по эмпирической формуле

$$P_n = 8 \frac{P_{\text{изл}}}{\sqrt[3]{V_{\text{экр}}}} \sqrt{\frac{\mu_r f}{\sigma}}, \quad (39)$$

где P_n - потери в экране, Вт; $P_{\text{изл}}$ - мощность излучения, Вт; $V_{\text{экр}}$ - объем экрана, м³; μ_r - относительная магнитная проницаемость

материала экрана; f - частота, МГц; σ - проводимость материала экрана, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

У цилиндрического экрана, экранирующего катушку мощного ко-лебательного контура, мощность потерь определяется выражением [9]

$$P_n = \frac{2\pi n^2 I^2 r_k^4}{l_k r_{\text{ЭК}}^3 \sigma \delta}, \quad (40)$$

где n - число витков катушки; I - действующее значение тока в катушке; $r_{\text{ЭК}}$ - радиус экрана; r_k - радиус катушки; l_k - длина катушки.

При экранировании колебательных контуров потери в экране можно представить как некоторое эквивалентное дополнительное сопротивление в колебательной цепи, влияющее на ее первичные и вторичные параметры. В результате происходит взаимное воздействие экранируемого объекта на экран и наоборот. Это взаимное воздействие будет тем больше, чем ближе экран расположен к экранируемому объекту. Оно проявляется в увеличении активного сопротивления и емкости контура, в уменьшении его индуктивности и добротности.

Начальные параметры катушки (без экрана), экранируемой цилиндрическим экраном, в результате реакции последнего при сравнительно малых приращениях изменяются на величины $\Delta L = -\beta_L L_0$ и $\Delta R = \beta_R R_H$, где коэффициенты $\beta_L, \beta_R \geq 0$, в сущности своей являющиеся модулями производных соответствующих функций, зависят от материала экрана, частоты, отношений диаметров катушки к диаметру экрана и длины катушки к длине экрана.

Любой вид электрической волны, установившийся в процессе колебаний в резонаторе, должен быть таким, чтобы напряженность электрического поля у стенок была равна или близка к нулю и в соответствии с этим волна должна установиться поперек резонатора (рис. 26). Такое же распределение напряженности электрического поля может иметь место, когда волна движется вдоль

оси z . Резонатор может оказаться настроенным в резонанс, если вдоль ребра b укладывается целое число полуволн. В прямоугольном резонаторе могут существовать колебания различных типов, отличающиеся друг от друга распределением полей и частотой. Каждому типу колебаний соответствует своя резонансная частота, и следовательно, экрану как объемному резонатору присуще множество резонансных частот. Как известно, резонансная длина волны резонатора (в метрах) при колебаниях типа $TE_{m,n,p}$ и $TM_{m,n,p}$ определяется как

$$\lambda_{рез} = 2 / \sqrt{(m/l)^2 + (n/b)^2 + (p/h)^2} = 300 / f_{рез}, \quad (41)$$

где l, b, h - размеры сторон резонатора; m, n, p - индексы, обозначающие число стоячих полуволн, укладываемых вдоль сторон резонатора; $f_{рез}$ - частота резонанса, МГц.

Определим резонансные частоты и длины волн при различных типах колебаний. Задачу решаем в следующем порядке:

а) определяем коэффициенты $M = \pi m / l, N = \pi n / b, P = \pi p / h$;

б) находим коэффициент фазы $\alpha = \sqrt{M^2 + N^2 + P^2}$;

в) определяем резонансную частоту

$$f_{рез} = \frac{c\alpha}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{M^2 + N^2 + P^2}$$

и резонансную длину волны

$$\lambda_{рез} = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{\sqrt{M^2 + N^2 + P^2}}.$$

Результаты вычислений в общем виде сведены в таблицу (табл.1). Как видно из данных таблицы, наимизшим типом поперечно-магнитных колебаний, соответствующим первым значениям m, n и наименьшему значению собственной частоты $f_{рез}$, является тип TE_{110} . При вычислении резонансной частоты предполагают, что стороны l и b являются большими сторонами резонатора. Как правило, в первую очередь следует определить наимизшую резонансную частоту для данных размеров экрана, так как возникновение резонанса в экране

сопровождается резким возрастанием амплитуды поля и при использовании электрически тонкого материала для экрана наблюдается интенсивный спад его эффективности.

Наинизшую резонансную частоту экрана (в МГц) удобно вычислять не в зависимости от размеров сторон экрана, а в функции наиболее общего его параметра $R_э$, по приближенной формуле

$$f_{рез} \approx 138 / R_э, \quad (42)$$

где $R_э$ - эквивалентный радиус экрана, м.

Добротность резонатора для колебаний типа TE_{110} может быть определена из (32):

$$Q_{TE_{110}} \approx \frac{V_{экр}}{\partial \Sigma S} \approx \frac{0,5}{\partial(1/l + 1/b + 1/h)}. \quad (43)$$

Например, для экрана изготовленного из стали, стороны которого равны $l=3$ м, $b=2$ м и $h=1$ м, при работе его на частоте $f=30$ МГц и $\delta=3 \cdot 10^{-6}$ м имеем

$$Q_{TE_{110}} \approx \frac{0,5}{\delta \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h} \right)} = \frac{0,5 \cdot 10^6}{3 \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + 1 \right)} = 3 \cdot 10^5.$$

Реальная добротность из-за наличия отверстий и щелей будет на один - два порядка ниже расчетной.

Резонансные частоты реальных экранов не всегда соответствуют расчетным, так как из-за наличия в экране каких-либо предметов частота его резонанса сдвигается. Обычно у распространенных на практике экранов РЭС резонансные частоты лежат выше 30 ... 1000 МГц. С увеличением размеров экрана резонанс сдвигается в сторону более низких частот, как это видно из (42).

При резонансе напряженность поля внутри замкнутого экрана возрастает в Q раз, а следовательно, эффективность экранирования уменьшается в Q раз относительно результирующей эффективности, учитывающей поглощение и отражение электромагнитных волн. Для электрически тонких материалов, эффект экранирования которых про-является только в результате отражения, эффективность экрана при резонансе становится весьма незначительной. Это явление в

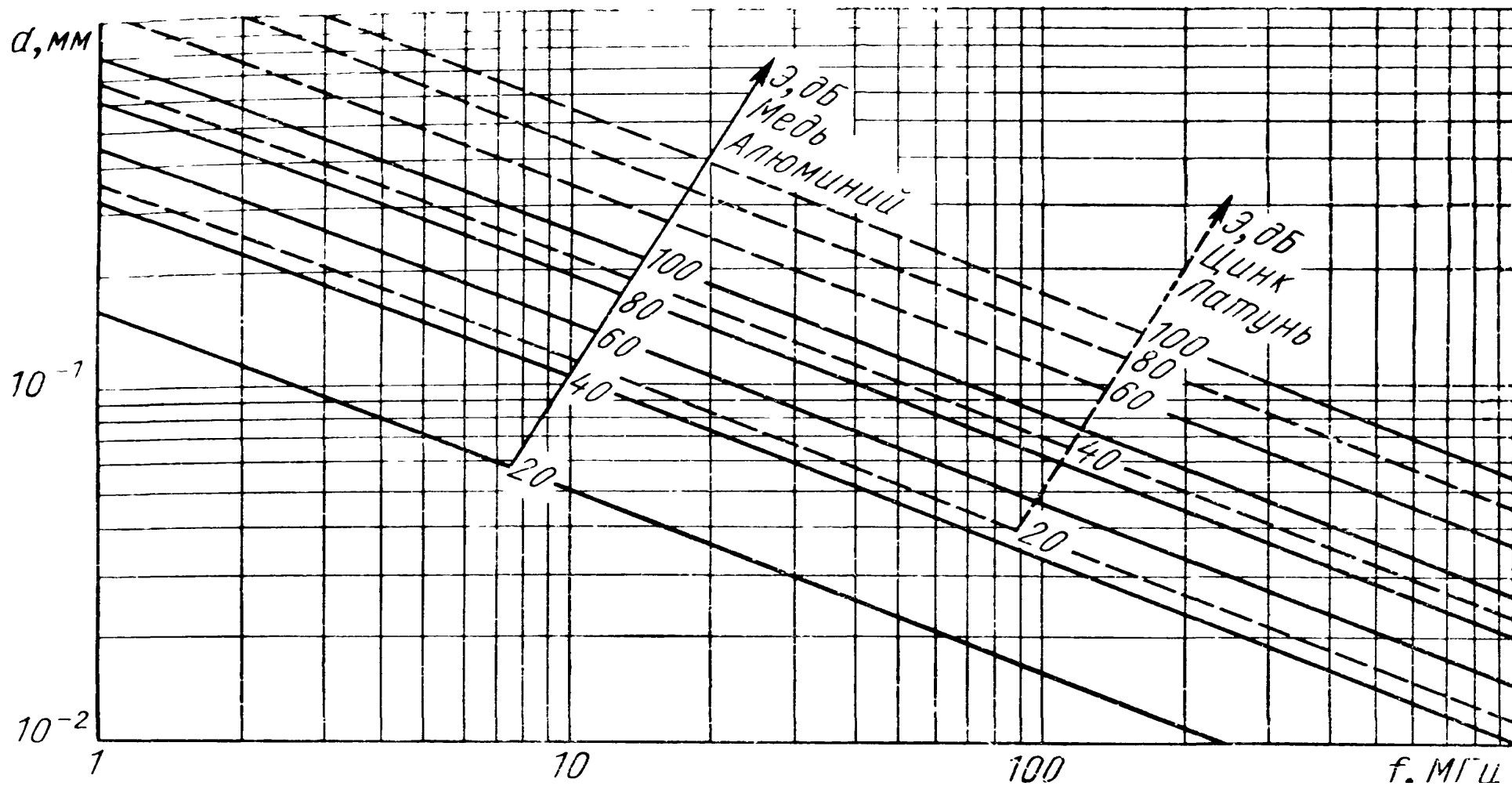
практике экранирования достаточно часто наблюдается и иллюстрируется графиками (рис. 27). Здесь показана эффективность экранов на самой низкой

Таблица 1

Частоты собственных колебаний для различных типов волн

Типы волн		TE_{110}	TE_{101}	TM_{011}	TM_{111}, TE_{111}
Характеристические числа	m	1	1	0	1
	n	1	0	1	1
	p	0	1	1	1
Коэффициенты	M	π/l	π/l	0	π/l
	N	π/b	0	π/b	π/b
	P	0	π/h	π/h	π/h
Коэффициент фазы α		$\pi\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$	$\pi\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}$	$\pi\sqrt{\left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}$	$\pi\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}$
Частота собственных колебаний резонатора $f_{рез}$, МГц		$150\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$	$150\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}$	$150\sqrt{\left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}$	$150\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}$
Резонансная длина волн λ , м		$\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}}$	$\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}}$	$\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}}$	$\frac{2}{\sqrt{\left(\frac{1}{l}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{h}\right)^2}}$

резонансной частоте в зависимости от толщины материала экрана d и эквивалентного радиуса экрана $R_э$. Как видно из приведенных графиков, например, применение алюминия толщиной 0,02 мм при $R_э = 2,3$ м на резонансной частоте 60 МГц дает эффективность экранирования не более 20 дБ несмотря на то, что вне резонанса этот же экран будет обладать эффективностью более 100 дБ. Поэтому обязательным условием использования электрически тонких материалов является предварительное определение, находится ли в допустимых пределах величина уменьшения эффективности в полосе резонанса



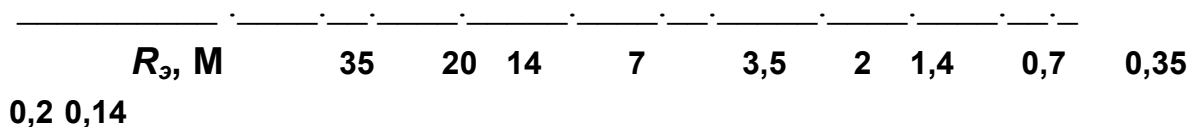


Рис. 27. Эффективность экранирования на самой низшей резонансной частоте экрана в зависимости от его параметров

Физически падение эффективности на резонансных частотах можно объяснить уменьшением отражения, что обусловлено проникновением поля за пределы экрана. Очевидно, что в условиях резонанса (продольного или поперечного) отражающие поверхности становятся прозрачными, что возможно, когда толщина экрана становится равной целому числу половин длины волны в материале, т. е.

$$d = m \lambda_m / 2, \quad (44)$$

где m - целое положительное число; λ_m - длина волны в материале.

Поскольку длина волны в металле определяется [9] выражением $\lambda_m = 2\pi\sqrt{2/\omega\mu_r\sigma} = 2\pi\delta$ и для исключения влияния резонанса $d > 0,5\lambda_m > \pi\delta$, толщина материала экрана становится, таким образом, зависимой от его вида и линейных размеров. Максимальное отражение от стенок экрана имеет место при $d = \lambda_m / 4$.

При использовании сетчатых материалов их следует проверять аналогично по эквивалентной толщине, определяемой по формуле $d_s = \pi r_s^2 / S$, где r_s - радиус проволоки сетки; s - шаг сетки.

Физические явления, наблюдаемые в замкнутом экране как в объемном резонаторе, должны всегда учитываться при конструировании реальных экранов.

4. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

4.1. Тракт переноса помех

Подавление радиопомех на путях их переноса осуществляется в тракте, который является частью помехонесущей сети. Под *трактом переноса помех* [9] понимается совокупность элементов и устройств РЭС и среды распространения, связывающих один источник (генератор) помех с одним приемником (восприимчивым к этим радиопомехам элементом аппаратуры). Иначе говоря, тракт переноса помехи является той частью помехонесущей сети, которая выделяется при рассмотрении элементарной ситуации воздействия одного генератора помех на один приемник. При этом другие элементы сети (генераторы и приемники), не влияющие на рассматриваемые генератор и приемник, из анализа исключаются, а при наличии такого влияния оно учитывается в эквивалентных параметрах тракта.

Тракт передачи помехи отличается от тракта радиосвязи меньшей протяженностью, разнообразием и сложностью структуры, наличием большого количества случайных элементов, способствующих распространению помехи или вызывающих ее затухание. Возможность распространения помехи от генератора к приемнику несколькими путями вызывает в тракте явления, аналогичные замираниям сигналов и помех в каналах радиосвязи. Таким образом, в общем виде тракт переноса помех можно моделировать четырехполюсником с переменными параметрами, изменения которых во времени могут быть случайными [9]. Каналы с переменными параметрами являются предметом изучения теории и практики связи, и прежде всего радиосвязи. Однако теория радиосвязи не может быть в полной мере отнесена и к трактам переноса помех из-за того, что они могут быть более сложными, чем радиоканалы. Поэтому сравнительно небольшое количество работ, в которых рассматриваются эти тракты, нельзя считать достаточным для общего, даже приблизительного,

решения проблемы подавления помех. В итоге получается, что достигнутые здесь инженерные решения базируются в основном на анализе различных частных случаев.

Наибольшую сложность [1,3,4 и др.] представляет анализ тракта переноса помех, распространяющихся путем непосредственного их излучения. В радиосвязи эти вопросы касаются преимущественно изучения электромагнитных полей в дальней зоне излучения. Для подавления взаимных и промышленных радиопомех различными методами, в том числе экранированием источников помех или восприимчивых к ним элементов РЭС и отдельных радиоустройств, рассмотрение полей ближней зоны является не менее важным, чем дальней или промежуточной зоны. При этом необходимо подчеркнуть, что излучателями и приемными антеннами для взаимных и промышленных радиопомех во многих случаях служат не собственно антенные или антенно-фидерные системы, а всевозможные детали и узлы конструкции РЭС или мобильных и стационарных объектов, где эта аппаратура размещается; линейно-кабельные сооружения и устройства; электрические сети электропитания, управления, сигнализации, связи и др.

В *ближней зоне* магнитное поле определяется током, электрическое - зарядами в соответствующих излучателях. Поле имеет преимущественно реактивный характер, так как векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются во времени по величине и направлению аналогично изменениям напряжения и тока в реактивном элементе. В этой зоне при колебательном характере движения главной части энергии электрическое и магнитное поля в некоторых точках пространства могут существовать отдельно с преобладанием той или иной составляющей, поскольку при расстояниях, меньших длины волны, для мгновенных значений переменных полей применимы законы постоянных полей.

Поле в ближней зоне существенно неравномерно, а волновые сопротивления составляющих поля являются взаимнообратными. Электрическое поле обладает высоким волновым сопротивлением

(Ом), магнитное - низким. В [9] показано, что если при нормальном падении волны принять:

$$\text{для электрического вибратора } Z_E = \bar{E}_E / \bar{H}_E ,$$

$$\text{для магнитного } Z_H = \bar{E}_H / \bar{H}_H ,$$

где $\bar{E}_E, \bar{E}_H, \bar{H}_E, \bar{H}_H$ - комплексные амплитуды соответственно электрической и магнитной составляющих поля; Z_E - полное сопротивление среды электрической составляющей волны, которое для простоты называют электрическим волновым сопротивлением; Z_H - магнитное волновое сопротивление, то значения модулей указанных сопротивлений для ближней и дальней зон определяются из выражений

$$Z_E = \frac{Z_0}{1 + (\beta r)^2} \sqrt{\frac{(\beta r)^6 + 1}{(\beta r)^2}} ;$$

$$Z_H = Z_0 \left[1 + (\beta r)^2 \right] \sqrt{\frac{(\beta r)^2}{1 + (\beta r)^6}} , \quad (45)$$

где $\beta = 2\pi / \lambda$.

На рис. 28 представлены функции $Z_H = Z_H(2\pi r / \lambda)$ и $Z_E = Z_E(2\pi r / \lambda)$, соответствующие формулам (45). В предельном случае при $\beta r \ll 1$, наиболее характерном для ближней зоны, $Z_E \approx Z_0 / \beta r$, $Z_H \approx \beta r Z_0$, $Z_E \gg Z_H$.

В другом предельном случае при $\beta r \gg 1$, наиболее характерном для дальней зоны, $Z_E \approx Z_H \approx Z_0 = 377$ Ом. Это есть случай образования в дальней зоне волны с одинаковыми значениями электрической и магнитной составляющих, образующих единый электромагнитный процесс. При промежуточных значениях βr происходит приближение Z_E и Z_H к Z_0 . При $\beta r \approx 0,71$ имеем $Z_E \approx Z_H$, что соответствует явлениям, характерным для дальней зоны. При дальнейшем увеличении βr имеем $Z_H > Z_E$. Однако это неравенство при последующем росте βr ослабевает и практически при $r > 3\lambda$

превращается в приближенное равенство, точность которого монотонно увеличивается с ростом r . Переход кривых через точку $Z_H = Z_E$ и достижение ими при $2\pi r/\lambda = 1,15$ экстремальных значений, равных соответственно $Z_{H \min} = 0,68Z_0$ и $Z_{H \max} = 1,47Z_0$ означают, что, начиная с $\beta r = 0,71$, магнитный вибратор создает электрическое поле, а электрический - магнитное. Как известно, с увеличением расстояния энергия поля, создаваемая электрическим вибратором, затухает обратно пропорционально r^3 для электрической составляющей и r^2 для магнитной. Практически для электрической составляющей поля ослабление следует считать пропорциональным $1/r^3$ для $r \leq 0,1\lambda$, пропорциональным $1/r^2$ для $0,1\lambda \leq r \leq 3\lambda$ и при $r > 3\lambda$ пропорциональным $1/r$. Последнее обстоятельство необходимо часто учитывать, так как подавляющее большинство измерений радиопомех как в дальней, так и в ближней зонах осуществляется путем определения электрической составляющей.

Основное практическое значение функций $Z_H = Z_H(2\pi r/\lambda)$ и $Z_E = Z_E(2\pi r/\lambda)$, приведенных на рис. 28, заключается в возможности определения волновых сопротивлений составляющих поля на заданном расстоянии от источника, а следовательно, и приближенного определения одной из составляющих поля при известной другой. Схема расчета может выглядеть следующим образом. При известных значениях λ , r , E или H сначала определяют βr , затем находят соответствующие значения Z_E / Z_0 и Z_H / Z_0 . Поскольку эти величины соответствуют определенным отношениям составляющих поля, то последние определяются элементарными вычислениями. Однако такое решение не является однозначным с точки зрения определения характера вибратора.

Если характер излучателя неизвестен, то можно дать лишь качественную оценку, используя общие свойства источника помех и учитывая при этом, что если эквивалентный излучатель является электрическим вибратором, то значением магнитной составляющей поля можно пренебречь.

Количественную оценку можно осуществить, сравнивая поля эквивалентной горизонтальной рамки с полем эквивалентного вертикального электрического вибратора. Поэтому при определении электрической составляющей напряженности поля измерения следует производить как при горизонтальном, так и при вертикальном положениях антенны измерителя.

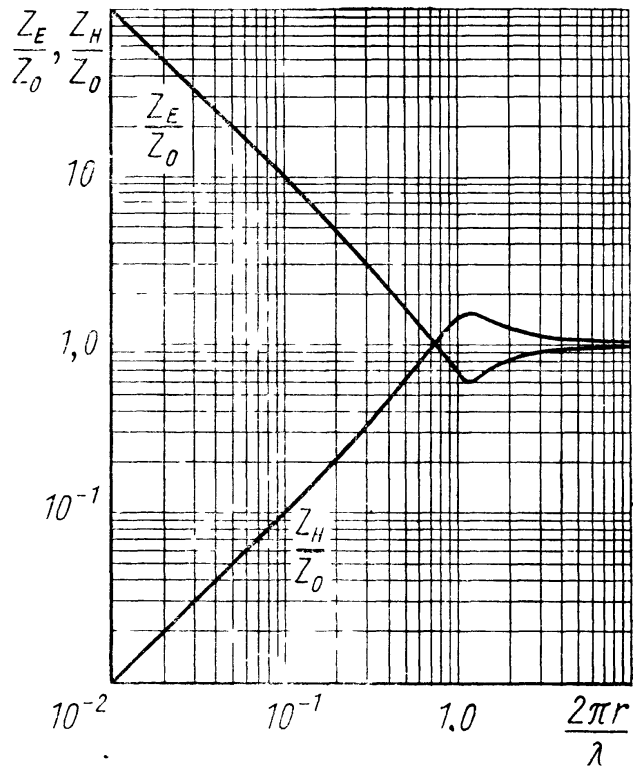


Рис. 28. Зависимость волновых сопротивлений составляющих поля от $2\pi r/\lambda$

При отсутствии возможностей дифференцированной оценки составляющих поля по характеру, величине и пространству используют более обобщенную характеристику излучателя - действующую высоту (площадь) эквивалентной антенны. Учитывая явления убывания интенсивности электрического поля в ближней зоне по мере удаления от излучателя, можно считать, что

$$E_a = \frac{\alpha h_\partial}{r^3} U_n \quad , \quad (46)$$

где α - коэффициент пропорциональности и согласования размерностей левой и правой частей выражения; h_∂ - действующая

высота приемной антенны; r - кратчайшее расстояние от антенны до эквивалентного излучателя; U_n - действующее значение напряжения помехи, подаваемого на излучатель.

В дальней зоне напряженности электрического и магнитного полей пропорциональны частоте колебаний, а мощность колебаний пропорциональна квадрату частоты, чем и объясняется увеличение эффективности антенны фиксированных геометрических размеров с ростом частоты.

Электрическое и магнитное поля в распространяющейся электромагнитной волне непрерывно взаимно преобразуются. На равных расстояниях от излучателя электрическое и магнитное поля находятся в фазе и образуют поверхность в виде сферы, называемую *волновой поверхностью*. Следовательно, распространяющиеся в пространстве электромагнитные волны являются сферическими. При значительном радиусе сферы небольшая площадка на ее поверхности может приближенно считаться плоской. Поэтому в зоне излучения при незначительных размерах приемных антенн всегда оперируют с плоскими волнами, для которых известны соотношения между составляющими поля.

Пространство, в котором распространяются помехи, при излучении обычно не бывает однородным. Это могут быть части конструкции РЭС, объемы внутри и вне аппаратуры с различными параметрами внутренней среды, наконец, это может быть территория промышленного или радиотехнического объекта с принадлежащими ей строениями, коммуникациями, металлическими и другими сооружениями. Все эти элементы изменяют условия распространения радиоволн, конфигурацию и распределение поля. Определение аналитическим путем результирующей напряженности поля в любой точке этого пространства является весьма сложной задачей даже для стационарных РЭС и сравнительно несложных стационарных объектов, так как при распространении радиопомех наблюдается многократное отражение, интерференция и дифракция радиоволн. Еще более сложным является решение этой задачи для мобильных РЭС и

объектов. Поэтому исследование электромагнитной обстановки района или участка распространения помех производится экспериментально с обработкой многократных для различных условий результатов измерений методами математической статистики. При этом необходимо понимание основных закономерностей отдельных явлений и процессов образования и распространения радиопомех, что позволяет корректировать и использовать для подавления помех снятую экспериментально электромагнитную обстановку, приспособив ее к конкретным условиям. Для указанных целей можно воспользоваться различными техническими средствами.

В общем случае при наличии на пути распространения препятствия с электрическими параметрами, отличными от параметров волны, электрическое поле изменяется за счет вторичного поля, рассеиваемого препятствием. Сущность этих изменений аналогична явлениям отражения и преломления волн на границе двух сред, но при этом значительно сложнее. Практическое использование этих явлений для уменьшения влияния помехи может иметь место и при наличии естественных преград, что должно учитываться в конкретной обстановке.

Ослабление помех, распространяющихся в тракте переноса путем излучения, можно получить, используя эффекты поляризации радиоволн [9]. Использование поляризационной избирательности устройств, выполняющих функции приемных антенн у восприимчивых к помехам элементов РЭС, может значительно уменьшить воздействие этих помех. Практика показывает, что при отсутствии возможности широкого применения разветвленных поляризационных решеток можно добиться некоторого уменьшения воздействия источника помех на приемную антенну, ориентируя ее перпендикулярно излучателю и получая тем самым простейшую поляризационную развязку. В некоторых задачах проектирования радиотехнических объектов представляется целесообразным использование различных материалов и сред распространения радиоволн для получения поляризационной развязки источников и приемников помех или для повышения

поляризационной избирательности элементов РЭС, подверженных воздействию помех. Это связано с тем, что, как известно, волна, прошедшая из одной среды в другую, в общем случае не только отражается и ослабляется, но и изменяет свою поляризацию. С другой стороны, естественные преграды не в одинаковой мере ослабляют волны различной поляризации. Например, при вертикальной поляризации излучения небольшое ослабление вызывают вертикальные преграды так же, как при горизонтальной поляризации - горизонтальные преграды. Указанные явления почти всегда учитываются при проектировании экранов в той мере, как этого требуют электромагнитная обстановка, структура объекта, нормы подавления радиопомех и тип экрана.

Следует отметить еще два важных обстоятельства использования явлений, характерных для дальней зоны, с целью подавления радиопомех, реализации требований по совместному и близкому размещению элементов РЭС и, следовательно; проектирования как сравнительно небольших экранов, так и крупных систем электромагнитного экранирования.

Первое обстоятельство заключается в том, что зависимости направленности излучения, дифракции, поглощения, интерференции и поляризации радиоволн от частоты не имеют резко выраженного характера. Частотные границы этих зависимостей «размазаны», и их сравнительно широкополосный характер не дает возможности получить только в результате экранирования полное пространственное и поляризационное разнесение источников и приемников помех. При этом без принятия специальных мер не может быть достигнут существенный выигрыш и по частотной совместности РЭС или их элементов. Поэтому при работе в перегруженных участках радиочастотного диапазона, смежных или близких частотных полосах РЭС и их элементов, взаимные удаления которых на расстояния, обеспечивающие требуемые затухания помех, невозможны, приходится прибегать к временному разделению в функционирования аппаратуры и к мерам частотной фильтрации.

Включение фильтров в аппаратуру может быть различным. Они могут находиться в различных трактах, но могут быть и элементами излучателей и приемных антенн, существенно ограничивающими их частотные диапазоны. В качестве примера можно привести применение решетки из предельных волноводов, устанавливаемой перед приемной антенной и эквивалентной, как известно, фильтру верхних частот [9]. Отметим также, что экранирование устройств, находящихся в ближней зоне, или непосредственно самого излучателя также является широкополосным. Поэтому применение средств радиочастотного фильтрования оказывается не менее необходимым для развязки совместно расположенных элементов внутри РЭС и при совместном размещении РЭС, чем экранирование.

В большинстве случаев системы экранирования и фильтрации существенно влияют на массогабаритные характеристики аппаратуры, что заставляет практически полностью отказываться от реализации необходимых связей между элементами РЭС одного и того же объекта путем излучений сигналов, а прибегать всюду, где это возможно, к использованию экранированных фидеров и кабелей.

Второе обстоятельство заключается в том, что дальняя зона характеризуется наличием уже сформировавшихся свойств направленности излучателей и приемных антенн. В нашем рассмотрении каждое из этих устройств в подавляющем большинстве конкретных ситуаций не является специализированной антенно-фидерной системой. Можно говорить, что с позиций экранирования свойства излучения и приема электромагнитных волн являются почти всегда побочными, сопутствующими основным функциям элементов РЭС. Однако для любого излучающего или принимающего излучения элемента РЭС среди различных типов передающих или приемных антенн может быть найдена своя приближенная аналогия, с соответствующей этому элементу конфигурацией, геометрическими размерами и способом питания.

По известным диаграммам направленности аналогичной антенны, условиям ее работы, рабочему диапазону частот и другим

параметрам можно приближенно определить для данного элемента РЭС структуру поля и возможности приема и излучений помех, а также характер взаимодействия этого элемента с другими полями помехонесущей сети. Значит, наличие характеристик антенны-аналога и спектральных характеристик возможных излучений и каналов приема позволяет в некоторой степени оценить роль рассматриваемого устройства в общей электромагнитной обстановке на объектах, прогнозировать ее и принимать соответствующие предварительные решения по выбору направлений проектирования системы подавления взаимных и промышленных радиопомех. Очевидно, что прогноз может учитывать не только пространственные и спектральные характеристики излучений и каналов приема, но и их энергетические показатели, а также продолжительность вероятных интервалов одновременной работы РЭС.

Обычно район непосредственного действия помехи не выходит за пределы окружности, в центре которой расположен источник, а максимальный радиус составляет от 100 м до нескольких километров. В некоторых случаях помеха обнаруживается на удалениях до десяти и более километров от объекта, содержащего излучающие устройства. Часто это имеет место тогда, когда помеха распространяется вдоль какой-либо достаточно длинной линии.

Известно, что в электромагнитных процессах сосредоточение электромагнитной энергии происходит, главным образом, не в проводниках, а в пространстве, окружающем проводник. Проводник, как правило, образует границу того пространства, в котором происходят электромагнитные процессы. Чем выше частота и больше проводимость металла, тем меньше электромагнитной энергии проникает в толщу проводника. Поэтому простейшая двухпроводная линия, представляющая собой два линейных близко расположенных параллельных проводника, проложенная вблизи источника излучения, независимо от ее назначения оказывается переносчиком этой высокочастотной энергии.

Таким образом, даже из краткого рассмотрения видов радиопомех и методов их подавления можно заключить, что наряду с применением для таких целей других технических средств основным следует считать комплексное использование электромагнитного экранирования (ЭМЭ) и фильтрацию цепей.

Современный комплекс радиоэлектронных средств является, как правило, организацией достаточно высокого порядка. К нему вполне применимо определение его как системы. Поэтому более целесообразно считать ЭМЭ мерой ослабления, прежде всего, внутрисистемных помех. Последнее, впрочем, не является бесспорным [9], так как определяется тем содержанием, которое вкладывается в сами термины «внутрисистемные» и «внесистемные» помехи.

ЭМЭ является не только одним из способов обеспечения ЭМС РЭС, но и позволяет решать задачи биологической защиты, увеличения разрешающей способности измерительной аппаратуры, повышения надежности функционирования РЭС, применение которой не связано с работой радиолиний.

Свойства промышленных радиопомех, анализ возможных методов их подавления и практические результаты, достигнутые в этом направлении, позволяют считать ЭМЭ важнейшим, а иногда единственным способом ослабления таких помех. Применение ЭМЭ против промышленных радиопомех имеет ряд особенностей [1,5,9 и др.]. Среди них необходимо, прежде всего, отметить сочетание ЭМЭ с фильтрацией сетей питания, блокировки, управления и сигнализации, придающее мероприятиям по ЭМЭ комплексный характер. Второй наиболее важной особенностью является увеличение объемов экранируемых пространств часто до весьма значительных размеров стационарного промышленного или научно-технического объекта.

ЭМЭ тесно связано с радиотехникой. Эта связь обусловлена не только областью применения и задачами ЭМЭ, но и широким использованием радиотехнических методов для исследований вопросов экранирования, проектирования и оценки эффективности экранов. ЭМЭ и радиотехника имеют во многом общую

теоретическую основу, базирующуюся на теории электромагнитного поля и теории электрических цепей, а в инженерных приложениях - на теоретической электротехнике. При всей общности с радиотехникой ЭМЭ имеет все же ряд существенных особенностей, придающих ему осязаемое самостоятельное значение. Спецификой ЭМЭ, прежде всего, является большой удельный вес конструкторской деятельности с привлечением опыта и сведений из механики, физики, химии и материаловедения. В правильном сочетании конструкторской работы с анализом причин возникновения, путей распространения и спектральных характеристик радиопомех заключается значительная доля успеха проектирования экранов.

4.2. Назначение и основные характеристики экранов

Электромагнитные экраны предназначаются для локализации в некотором объеме пространства полей, создаваемых излучателями электромагнитной энергии с целью ослабления или исключения воздействия излучателей на чувствительные элементы РЭС и аппаратуру в целом. В зависимости от назначения различают экраны с *внутренним возбуждением электромагнитного поля*, в которых обычно помещается источник помех, и *экраны внешнего электромагнитного поля*, во внутренней полости которых помещаются чувствительные к этим полям устройства. В первом случае экран предназначен для локализации поля в некотором объеме, во втором - для защиты от воздействия внешних помех.

Экранирование как техническое мероприятие призвано обеспечить надежность работы РЭС: подавить до требуемого уровня влияние непреднамеренных излучений электромагнитной энергии, препятствующих эффективному функционированию элементов РЭС. Определение назначения экрана в каждом отдельном случае производится с учетом характера источника помех и чувствительных к ним элементов, их размеров, пространственного размещения, вида

подводимых коммуникаций и допустимой величины воздействия экрана на экранируемые элементы.

Как всякая техническая отрасль, электромагнитное экранирование имеет свои специфические особенности, обусловленные его физической сущностью, принципами действия и конкретными условиями применения экранов, что находит свое выражение в количественной оценке эффективности экранирования. Для оценки функциональных качеств экрана могут быть использованы различные характеристики. Наиболее обобщенной является эффективность экранирования (ЭЭ).

Понимая под эффективностью экранирования (см. раздел 3) отношение действующих значений напряженности электрического поля E_1 (магнитного поля H_1) в данной точке при отсутствии экрана к напряженности электрического поля E_2 (магнитного поля H_2) в той же точке при наличии экрана (см. формулы (1) и (2)), запишем еще раз:

$$\mathcal{E}_{0E} = \frac{E_1}{E_2}, \quad \mathcal{E}_{0H} = \frac{H_1}{H_2}.$$

Здесь эффективность выражается в относительных единицах (разах). На практике обычно эффективность экранирования представляют в логарифмических единицах - децибелах (дБ):

$$\mathcal{E}_E = 20 \lg \frac{E_1}{E_2}, \quad \mathcal{E}_H = 20 \lg \frac{H_1}{H_2}.$$

Очевидно, что эффективность экранирования и близкие к ней формально и по физическому смыслу характеристики экранов являются функциями пространства и частоты, а параметрами их можно считать ширину полосы частот, в которой определяются действующие значения напряженности поля.

Можно [9] действие экрана учитывать *коэффициентом экранирования* :

$$S = E_2 / E_1, \quad (47)$$

который изменяется от 1 до 0, характеризуя в последнем случае максимальный эффект экранирования.

При необходимости оценить общую ЭЭ исходя из допустимой величины ЭДС помехи, наводимой в цепях РЭС, пользуются эквивалентной высотой устройства

$$h_0 = U_H / E_1, \quad (48)$$

где U_H - действующее значение ЭДС помехи, наводимой на элементы, находящиеся внутри экрана, м; E_1 - действующее значение напряженности внешнего поля, В/м. Величина h_0 характеризует как бы действующую высоту экрана (по аналогии с действующей высотой антенны).

Учитывая, что ЭДС помехи пропорциональна напряженности поля внутри экрана, находим

$$h_0 = \alpha E_2 / E_1 = \alpha / \mathcal{E}_{0E}. \quad (49)$$

Второй характеристикой качества экрана является мера его воздействия на параметры экранируемых элементов, определяемая количественно *коэффициентами реакции экрана*. При всех видах экранирования, за исключением статического, из-за отражения электромагнитной энергии от стенок экрана происходит взаимодействие между экраном и экранируемым устройством. Экран, защищая цепи, детали, колебательные контуры от воздействия внешних полей, оказывает существенное влияние на параметры экранируемых элементов. Из-за перераспределения электромагнитного поля внутри экрана происходят изменения первичных параметров элементов. В результате, например, изменяются магнитные связи, уменьшается первичная индуктивность катушек, увеличивается емкость контуров, возрастает активное сопротивление, а далее это ведет к изменению частоты настройки и добротности колебательных контуров, потерям энергии и т. д. Относительные изменения параметров экранируемых элементов можно учесть с помощью коэффициентов

$$P_{ij} = 1 - A_{\mathcal{E}ij} / A_{0ij},$$

где $A_{\mathcal{E}ij}$ - значение i -го параметра j -го экранируемого элемента при наличии экрана; A_{0ij} - значение первичного i -го параметра j -го

элемента при отсутствии экрана. Каждый из P_{ij} является коэффициентом реакции экрана на i -й параметр j -го элемента.

Задаваясь допустимыми пределами изменений параметров и зная размеры экранируемых элементов, можно определить габаритные размеры экрана, материала, из которого он должен быть изготовлен, и условия размещения элементов внутри него.

4.3. Особенности конструирования электромагнитных экранов

Современные РЭС отличаются большой сложностью и состоят из множества элементов. Взаимодействие между ними должно происходить по строго определенным каналам, трактам и схемам. Появление каких-либо других направлений взаимодействия элементов РЭС нарушает условия нормального функционирования аппаратуры.

Одним из основных способов устранения взаимных связей, не предусмотренных функциональной схемой, является *поэлементное, блочное и общее* экранирование РЭС. В этом смысле экранирование выполняет вспомогательную роль, а конструирование экранов зависит от их конкретного назначения. Если при разработке РЭС общий замысел конструктора, расположение и компоновка частей аппаратуры не учитывают необходимости экранирования, то обусловленные им задачи конструирования оказываются в сугубо подчиненном положении, что часто приводит к непреодолимым трудностям. Если же подавление нежелательных паразитных связей между элементами РЭС является одним из основных условий проектирования, то экранирование приобретает ведущую роль, что способствует более эффективному и качественному решению основной задачи [5,9 и др.].

Таким образом, конструирование электромагнитных экранов может иметь следующие особенности.

Во-первых, оно может заключаться в разработке самостоятельных конструкций экранов. Тогда экран представляет собой внешний кожух аппаратуры и должен обеспечить тепловой режим, защиту от пыли и влаги, устойчивость к вибрации, ослабление

воздействия внешних электромагнитных полей на устройство в целом или локализацию его электромагнитных излучений.

Во-вторых, могут разрабатываться конструкции экранов для отдельных элементов и узлов РЭА, когда размеры и даже форма экрана практически уже определены самим экранируемым объектом. В данном случае экран должен вписываться в общее устройство, обеспечивать минимальную реакцию на экранируемый объект, ремонтпригодность и нормальный режим работы РЭС.

И, наконец, в-третьих, задача конструирования может состоять в разработке электромагнитных экранов как самостоятельных сооружений, не связанных с каким-либо отдельным типом РЭС. Такие экраны предназначены для защиты от внешних полей или локализации излучений целого радиоэлектронного комплекса, для проведения специальных измерений в условиях, приближающихся к условиям свободного пространства, для сборки и наладки аппаратуры и т. д.

Решение задачи по конструированию экранов в зависимости от их назначения имеет свою специфику, обусловленную объемом работ и последовательностью решений.

Если экран является внешним кожухом аппаратуры, он определяет общую компоновку, внешний вид и условия эксплуатации РЭС. Такой случай является наиболее общим, так как при этом должны решаться вопросы блочного и поэлементного экранирования и фильтрации цепей при максимальном использовании стандартизованных и нормализованных изделий, а также освоенных производством изделий из другой аппаратуры. Проектирование должно вестись с учетом особенностей данного типа РЭС. Достижение простоты конструкции экрана должно сочетаться с его компактностью, исключением излишнего расчленения общей конструкции на отдельные блоки, обеспечивать простоту изготовления, высокую экономическую эффективность и повышение эксплуатационных качеств, удобство обслуживания и ремонта РЭС, а также реализацию требований эргономики и дизайна. С этих позиций важно обоснованно

произвести выбор материала экрана и его покрытий, который определяет технологические характеристики аппаратуры, ее отдельных устройств и их режимы работы. Требования, предъявляемые к экрану, вытекают из общих требований к РЭС и роли, отводимой внешнему кожуху устройства.

Во втором случае технические требования к экрану еще более обусловлены экранируемым элементом. Определяющим здесь является требование обеспечения необходимой эффективности.

В третьем случае, когда экран является самостоятельным сооружением, например экранированным помещением, работа выполняется на основе проектного задания, в котором должны быть решены следующие вопросы:

- установлена необходимая ЭЭ в заданном диапазоне частот;
- выбраны материалы для экрана, размеры его, количество и тип дверных и оконных проемов;
- выбран вариант размещения аппаратуры, обеспечивающий минимальные уровни помех и простоту фильтрации помехонесущих сетей;
- определена конструкция основных узлов: способы соединения листов экрана, крепление его к стенам, полу, потолку, устройство контактных систем, способы экранирования вентиляционных систем и вводов различных коммуникаций;
- установлены типы и количество кабелей, вводимых в экран, выбраны типы фильтров и места их установки, выполнены схемы разводки электросетей;
- выбраны способы прокладки и ввода нефильтруемых кабелей высокой частоты и кабелей, несущих несинусоидальные токи или напряжения.

Одной из основных причин появления взаимных помех является недостаточное внимание к вопросам экранирования и фильтрации РЭС. Это можно подтвердить хотя бы тем [9], что технические требования к РЭС часто не содержат конкретных требований в отношении ограничения излучений и внешней помехоустойчивости.

Между тем известно, что побочные и внеполосные излучения и каналы приема при недостаточной эффективности экранирования возникают не только через антенно-фидерные системы, но и через различные отверстия, щели в устройствах РЭС и открытые (неэкранированные) фидерные линии. Недостаточный учет указанных обстоятельств существенно снижает эффективность разработки РЭС в целом.

Решение общей или частной технической задачи по ЭМЭ обычно начинается с изучения радиоустройства, в результате чего выявляются источники и намечаются наиболее экономичные способы ослабления радиопомех. Эти способы могут предусматривать:

- введение в схемы, конструкцию и размещение узлов аппаратуры дополнительных элементов и изменений, обеспечивающих уменьшение уровней помех до минимальных значений, за счет влияния как на источник помех, так и на пути их распространения;

- защиту наиболее чувствительных элементов РЭС от влияния помех путем частичного или полного экранирования;

- локализацию помех в местах их генерации или в объемах, из которых эти наиболее чувствительные элементы РЭС или сама аппаратура исключаются.

Естественно, что вмешательство в схему и основную конструкцию аппаратуры должно быть минимальным и оправданным с точки зрения изменения ее технических и экономических показателей после экранирования. Таким образом, после анализа принципиальной схемы конструкции РЭС решающим является вопрос о выборе экранируемых объемов, цепей, элементов. При проектировании самого экрана конструктор должен предусмотреть меры по его электрической (и механической, если это требуется) герметичности и непрерывности экранирования, охлаждению и вентиляции, вводу и выводу коммуникаций, фильтрации цепей питания, сигнализации и управления.

При всей кажущейся простоте устройства электромагнитных экранов их техническая реализация часто вызывает определенные трудности. Это вызвано значительным расхождением расчетных

данных по сравнению с экспериментальными при отсутствии достаточно обоснованных методов испытания экранов в широком диапазоне частот. Поскольку во многих случаях система экранирования и фильтрации представляет собой сложный комплекс замкнутых и открытых плоских экранов, волноводных фильтров, электрических фильтров и других элементов, окончательную доработку конструкции приходится производить на макете. Однако при рациональном размещении деталей и элементов системы экранирования в соответствии с расчетными данными коррективы, вносимые в конструкцию, обычно несущественны.

Ведущим рабочим документом проектирования экранов является принципиальная схема системы экранирования, на которой должны быть выделены помехообразующие и излучающие элементы с оценкой уровней помех и восприимчивые (чувствительные) элементы с указанием допустимых значений наводимых ЭДС помех и степени необходимого ослабления. Полученная таким образом схема взаимной связи элементов и узлов последовательно ведется на протяжении всей работы и изменяется по мере достижения удовлетворительных результатов на различных этапах проектирования. Очевидно, что при одних и тех же исходных данных может быть получено определенное количество вариантов таких схем, зависящее от сложности задачи и опыта конструктора. В итоге это должно привести к оптимальному (или предпочтительному) техническому решению. Следует отметить, что необоснованный отказ от какого-либо из вариантов или от учета какого-либо фактора, определяющего интенсивность помех в предположении, что соответствующая корректура будет осуществляться при монтаже устройства, часто приводит к задержке реализации проекта системы экранирования, сдачи в эксплуатацию РЭС и излишним расходам средств. В итоге необходимая эффективность экранирования может быть не обеспечена.

4.4. Материалы для экранов

Длительное время в технике электромагнитного экранирования применялись лишь так называемые «традиционные» материалы - металлические листы. Это объясняется главным образом тем, что их высокая проводимость обеспечивает быстрое затухание электромагнитной энергии в толще металла, а большая разница между поверхностным сопротивлением металла и полным сопротивлением падающей волны приводит к значительным отражениям радиоволн от поверхности экрана. В результате металлический лист незначительной толщины обладает высокой ЭЭ. Однако практика экранирования показывает, что чрезвычайно большие эффективности самого металла фактически реализуются лишь на 10...20 %, поскольку основным фактором здесь является качество конструкции. Естественны сомнения в целесообразности применения высокоэффективных материалов, имеющих сравнительно высокую стоимость, которые не обеспечивают необходимых массогабаритных характеристик и требуемого с точки зрения экранирования и других условий вида конструкций. Поэтому во многих случаях оказывается возможным заменить металлический экран экраном из другого материала. Эта возможность обусловлена также освоением ряда новых материалов. Необходимость получения в итоге требуемой эффективности, задачи обеспечения мобильности конструкции, упрощения ее сборки, снижения стоимости и т. д. создали предпосылки для применения новых материалов, собственная способность которых к экранированию электромагнитных полей может и не быть очень высокой.

4.4.1. Металлические материалы

Металлические материалы выбирают из условий:

- достижения заданной величины ослабления электромагнитного поля и его составляющих в рабочем диапазоне частот при

соответствующих ограничениях размеров экрана и его влияния на экранируемый объект;

- устойчивости против коррозии и механической прочности;
- технологичности конструкции экрана и получения требуемой конфигурации и массогабаритных характеристик конструкции.

Первому требованию практически удовлетворяют все применяемые в настоящее время листовые металлы (сталь, медь, алюминий, латунь), так как они при соответствующей их толщине обеспечивают достаточно высокую эффективность экранирования.

Если рассматривать ЭЭ *магнитными* и *немагнитными* материалами одинаковой толщины в зависимости от частоты, то для различных частотных интервалов экранирующие свойства будут разными. Пока экран работает в магнитоэлектростатическом режиме, эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных. В электромагнитном режиме, в полосе частот, где эффективность экранирования за счет отражения больше эффективности поглощения, немагнитные материалы, обладающие большей проводимостью по сравнению с магнитными, обеспечивают более высокую эффективность. В диапазоне частот, где экранирующие свойства проявляются больше за счет поглощения, влияние немагнитных материалов на общую эффективность экранирования усиливается. Однако в реальных экранах указанные свойства магнитных и немагнитных материалов проявляются слабо. Преимущественное применение стали определяется условиями экономичности и технологичности конструкции.

Преимущества стали теряются при экранировании токонесущих элементов, критичных к вносимым в них потерям. Так, например, сравнивая при прочих равных условиях потери мощности в экранах, выполненных из стали и меди, полагая при этом, что $d \gg \delta$, получаем

$$\frac{P_{ст}}{P_{м}} = \frac{\sigma_{м} \delta_{м}}{\sigma_{ст} \delta_{ст}} = \sqrt{\frac{\sigma_{м}}{\sigma_{ст}}} \mu_r .$$

Из формулы следует, что так как $\sigma_{м} > \sigma_{ст}$ и $\mu_r \gg 1$, потери в стали всегда выше. Например, при $\mu_r = 50$ потери мощности в стальном

экране будут примерно в 18 раз больше, чем в медном. Таким образом, из-за больших потерь, вносимых стальными экранами, в основном ограничено их применение.

При экранировании высокочастотных колебательных цепей и контуров цилиндрическими экранами с условием, что потери колебательной мощности не превышают 1 %, радиус экрана должен быть не менее [8]

$$R \geq 8,5 r_k \sqrt[3]{\frac{n^2 I^2}{\sigma \delta (l_k / r_k) P}} ,$$

где r_k - радиус катушки, м; l_k - длина катушки, м; n - число витков катушки; I - ток катушки, А; σ - удельная проводимость материала экрана, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$; P - мощность генератора, Вт; δ - глубина проникновения, м.

Если в этом случае при прочих равных условиях применять стальные и медные экраны, то отношение их радиусов должно быть

$$\frac{R_{ст}}{R_{м}} = \sqrt[3]{\frac{\sigma_{м} \delta_{м}}{\sigma_{ст} \delta_{ст}}} = \sqrt[3]{\frac{\sigma_{м}}{\sigma_{ст}}} \mu_r .$$

Так как обычно $\sigma_{м} > \sigma_{ст}$ и $\mu_r \gg 1$, то $R_{ст} > R_{м}$ и габариты стального экрана оказываются больше, чем медного. Например, если $\mu_r = 50$, то при одних и тех же потерях радиус стального экрана должен быть примерно в два раза больше радиуса медного экрана.

Примерно так же выглядят результаты сравнения стали с другими немагнитными материалами с точки зрения их использования в электромагнитном экранировании высокочастотных катушек с большой добротностью. Эти результаты оказываются справедливыми для экранов любой формы, приводимой в общем случае к эквивалентному цилиндру или сфере.

Рассеиваемая мощность быстро падает с увеличением эквивалентного радиуса R_s экрана. Если необходимо уменьшить потери при заданном R_s или уменьшить R_s при заданных потерях, то следует экран изготавливать из меди или алюминия.

Для электромагнитного экранирования успешно могут быть использованы тонколистовые и фольговые материалы толщиной 0,01...0,05 мм, которые изготавливаются из диамагнитных материалов. Экраны, изготовленные из указанных материалов, обладают достаточной эффективностью экранирования. Следует, однако, отметить возможность возникновения резонансных явлений, при которых эффективность резко падает.

Что же касается обеспечения устойчивости против коррозии и механической прочности, то этому требованию могут удовлетворять практически все материалы при использовании защитных покрытий. Этому требованию удовлетворяют и все виды сеток. Фольговые материалы также устойчивы против коррозии, но механическая прочность их все же недостаточна. Поэтому применение этих материалов ограничивается случаями, когда они могут быть покрыты защитным, предохраняющим от повреждений слоем или когда условия эксплуатации экрана не требуют его механической прочности.

Наиболее технологичными являются конструкции экрана из стали, поскольку при монтаже такого экрана можно широко использовать сварку.

Практика показала [9], что в широком диапазоне частот для обеспечения ЭЭ 100 дБ и более целесообразно применять листовую сталь, за исключением случаев, где решающее влияние имеют ограничения, рассмотренные выше.

Толщина стали выбирается исходя из вида и назначения конструкции, условий ее монтажа и, главным образом, из возможности осуществления сплошных сварных швов. При сварке на переменном токе толщину берут примерно 1,5 ... 2 мм, на постоянном токе - около 1 мм и при газовой сварке - 0,8 мм.

4.4.2. Сеточные материалы

Сеточные материалы широко применяются для устройства экранов различного назначения. Это объясняется тем, что

металлические сетки легки, а сетчатые экраны проще в изготовлении, удобны в сборке и эксплуатации, обеспечивают достаточный обмен воздуха, светопроницаемы и позволяют получать достаточно высокую эффективность во всем диапазоне радиочастот. К недостаткам сетчатых материалов относят: невысокую механическую прочность и потерю эффективности в результате старения. Однако второй недостаток при соответствующей эксплуатации экрана может быть устранен.

Длительное время считали [9], что уменьшение ЭЭ по мере старения сетки обусловлено нарушением контакта в узлах ее ячеек из-за коррозии и загрязнения, которое приводит к увеличению размера шага. Исследования показали, что эффективность экранирования сеткой почти не зависит от качества контакта в ее ячейках. Нарушение непосредственного контакта между проводами отдельных ячеек не уменьшает общей эффективности на низких частотах. На высоких частотах нарушение контакта между проводами ячейки компенсируется малыми переходными емкостными сопротивлениями.

Уменьшение эффективности может иметь место из-за коррозии. Поэтому для защиты от коррозии сетки целесообразно покрывать антикоррозийным лаком.

Экранирующие свойства металлических сеток проявляются главным образом в результате отражения электромагнитной волны от их поверхности. Параметрами сетки, определяющими ее экранирующие свойства, являются: шаг сетки s , равный расстоянию между соседними центрами проволоки, радиус проволоки r и удельная проводимость материала сетки.

Различают *густые* и *редкие сетки*. К первым относятся сетки, для которых $s / r \leq 8$, у вторых - $s / r > 8$.

Эффективность экранирования сетчатых материалов

$$\mathcal{E}_0 = \frac{\lambda}{2s(\ln(2\pi r / s))} \cdot$$

Результаты, которые дает эта формула, хорошо совпадают с результатами измерений лишь для редких сеток, для густых сеток

расчеты оказываются несколько завышенными. Последнее объясняется тем, что у густых сеток величина $\ln(s/2\pi r)$ определяет индуктивность ячейки. С уменьшением размера ячейки у густых сеток аргументом этой же зависимости становится величина $s/2\pi r$.

4.4.3. Фольговые материалы

К ним относятся электрически тонкие материалы толщиной 0,01...0,05 мм. *Электрически тонкими материалами* называются такие, у которых толщина экрана меньше глубины проникновения ($\delta > d$). Для них расчет ЭЭ ведется с учетом внутренних отражений. В сортамент фольговых материалов входят стальные и диаманитные материалы: алюминий, латунь, цинк. Монтаж фольговых экранов несложен, так как крепление фольги к основе экрана производится клеей. Выбор клея должен производиться с учетом условий эксплуатации экрана, к которым относятся: температурный режим, влажность, вибрационные нагрузки и др.

Фольговые материалы в основном применяются при наличии на токопроводящей несущей конструкции экрана.

Выбор толщины материала должен производиться с учетом возможностей возникновения резонансных явлений, что иллюстрируется графиками, приведенным на рис. 27, где показана эффективность экранирования материала в функции резонансной частоты (или эквивалентного радиуса). Например, если наименьший резонанс ожидается на частоте 100 МГц и при этом необходимо обеспечить эффективность экранирования не ниже 40 дБ, толщина материала из алюминия или меди должна быть не менее 0,03 мм, а из цинка или латуни - не менее 0,06 мм.

Расчет эффективности экранирования фольговыми материалами производится по формулам для электрически тонких материалов

$$\mathcal{E}_0 = 60\pi d / \rho, \quad (50)$$

где ρ - удельное сопротивление материала, Ом · м.

Эффективность этих материалов достаточно высока при экранировании электромагнитного поля и электрической составляющей. Магнитную составляющую такие материалы ослабляют сравнительно мало и тем меньше, чем больше длина волны.

4.4.4. Токопроводящие краски

Использование токопроводящих красок для электромагнитного экранирования является весьма перспективным направлением, так как их применение исключает необходимость проведения сложных и трудоемких работ по монтажу экрана, соединению его листов и элементов между собой. С помощью токопроводящих красок экран любого назначения и на любой основе может быть быстро изготовлен даже не в производственных условиях. При этом может быть обеспечена ЭЭ не менее 30 дБ в широком диапазоне частот.

Токопроводящие краски создаются на основе диэлектрического пленкообразующего материала с добавлением в него проводящих составляющих, пластификатора и отвердителя. В качестве токопроводящих пигментов используются: коллоидное серебро, графит, сажа, окиси металлов, порошковая медь, алюминий. Проводимость покрытий зависит от их толщины, от свойств и концентрации токопроводящего пигмента, от свойств пленкообразующего материала и других факторов. Токо-проводящая краска обычно устойчива и сохраняет свои начальные свойства в условиях резких климатических изменений и механических нагрузок.

Исследования токопроводящих красок [5,9] показали, что в качестве токопроводящих пигментов нецелесообразно применять металлические порошки вследствие окисления их при смешивании с пленкообразующим веществом и растворителем. Наилучшие результаты при наименьших затратах, простоте технологии процесса изготовления краски и способов ее нанесения на поверхности дает использование в качестве токопроводящего пигмента ацетиленовой сажи или графита.

Эффективность экранирования токопроводящими красками в логарифмическом выражении определяется так же, как для электрически тонких материалов, по формуле

$$\mathcal{E}_{кр} = 20 \lg \frac{60\pi}{R_{кв}} + 20 \lg \left(0,21 \frac{\lambda}{R_{\mathcal{E}}} \right), \quad (51)$$

где слагаемое $20 \lg(0,21\lambda/R_{\mathcal{E}})$ является приращением эффективности экранирования электрической составляющей в шаровом экране для $\lambda \gg 2\pi R_{\mathcal{E}}$; $R_{кв}$ - сопротивление на квадрат площади поверхности экрана, Ом. Если в эту формулу подставить значение $R_{кв} = 6$ Ом, получим

$$\mathcal{E}_{кр} = 30 + 20 \lg(0,21\lambda/R_{\mathcal{E}}).$$

Пока длина волны значительно больше эквивалентного радиуса $R_{\mathcal{E}}$ экрана, эффективность экранирования значительно больше 30 дБ. Эффективность в 30 дБ достигается при $\lambda / R_{\mathcal{E}} \approx 5$. Далее по мере повышения частоты эффективность должна уменьшаться. Однако измерения показывают, что при этом ЭЭ все же сохраняется на уровне 30 дБ, а при $\lambda = 10$ см наблюдается даже некоторое ее повышение. Очевидно, что на столь коротких волнах начинает сказываться поглощение электромагнитных колебаний в толще слоя краски.

4.4.5. Металлизация поверхностей

Металлизация поверхностей различных материалов для электромагнитного экранирования получает все большее распространение благодаря большой производительности и универсальности методов нанесения покрытий. Из существующих способов нанесения покрытий наиболее удобным является метод распыления. Нанесение металла на подложку осуществляется пульверизацией расплавленного металла струей сжатого воздуха. Химический состав покрытия отличается от исходного материала, а микроструктура покрытия состоит из наслоения различного размера частиц металла и окисных пленок. В процессе образования покрытия распыленные частицы металла ударяются с большой скоростью о по-

верхность подложки и деформируются, при этом образуется окисная пленка, свойства которой зависят от продолжительности полета частиц и активности металла. От ударов новых частиц пленка разрушается и вытесняется наружу, а частицы металла вступают в непосредственное соприкосновение, обеспечивая прочную связь с подложкой и непрерывную проводимость покрытия.

Нанести металлический слой можно на любую прочную поверхность таких материалов, как плотная бумага, картон, ткань, дерево, текстолит, пластмасса, сухая штукатурка, цементированные поверхности и др. Поверхность этих материалов для лучшей адгезии должна быть шероховатой, что достигается с помощью пескоструйки. Бумага, картон, ткани такой подготовки не требуют. Нанесенный слой металла держится прочно в пределах тех механических нагрузок и деформаций, при которых не происходит разрушения подложки. Например, при смятии тканей слой металлизации не нарушится, однако излом металлизированной бумаги может привести к нарушению слоя покрытия.

Слои металлизации могут быть различной толщины. Толщина слоя не зависит от вида металла-покрытия, а определяется свойствами подложки. Количество наносимого слоя металла должно соответствовать физико-химическим свойствам материала подложки, его прочностным и деформационным характеристикам. Для плотной бумаги слой металла должен быть не более $0,28 \text{ кг/м}^2$, для ткани - до $0,3 \text{ кг/м}^2$. Для жесткой подложки количество наносимого металла существенно не ограничивается, более существенные ограничения обуславливаются массогабаритными характеристиками экрана.

Наиболее распространенным покрытием является цинк. Это покрытие технологично, обеспечивает сравнительно высокую эффективность экранирования и достаточную для многих экранов механическую прочность. Такие же высокие эффективности могут быть получены при металлизации цинком сухой штукатурки, пластмасс, дерева и других аналогичных материалов.

Средняя эффективность экранирования металлизацией поверхности цинком может быть определена с погрешностью не более ± 10 дБ по эмпирической формуле

$$\mathcal{E}_{мет} = 97 + 5 \lg d_0 - 20 \lg f ,$$

где d_0 - количество распыленного металла, $\text{кг}/\text{м}^2$; f - частота, МГц. При этом среднеквадратическое отклонение от среднего значения составляет не более 3 дБ.

Следует иметь в виду, что это выражение по существу определяет эффективность уже реального экрана, так как при выполнении его металлизацией обеспечивается достаточная герметичность. Например, для обеспечения толщины покрытия 0,1 мм требуется расход цинка примерно $0,8 \text{ кг}/\text{м}^2$, что на частоте 10 МГц дает эффективность экранирования более 100 дБ.

Эффективность экранирования алюминиевыми покрытиями примерно на 20 дБ и более выше, чем цинковыми.

В общем случае при прочих равных условиях эффект экранирования металлизированным слоем ниже, чем сплошным листом той же толщины. Это объясняется отличием химического состава покрытия от структуры исходного металла, в результате чего проводимость покрытия обычно меньше проводимости самого металла.

При ручном способе металлизации и малом расходе металла (до $0,12 \text{ кг}/\text{м}^2$) толщина покрытия оказывается неравномерной, отдельные участки поверхности остаются почти полностью прозрачными, что приводит к резкому падению общей эффективности и почти исключает экранирование магнитной составляющей поля. Эффективность может быть повышена до 100 дБ и более, если увеличить расход металла до $0,6 \dots 0,8 \text{ кг}/\text{м}^2$ и наносить его непосредственно на подготовленную прочную основу.

Металлизация поверхностей может успешно применяться для экранирования помещений и кабин в условиях деления РЭС на отдельные экранированные отсеки при неметаллической общей несущей конструкции; для отдельных устройств, монтируемых в пластмассовые корпуса; и во многих других случаях.

К металлизированным поверхностям могут быть припаяны контакты для заземления и подключения других цепей.

4.4.6. Стекла с токопроводящим покрытием

Такие стекла должны обеспечивать необходимую эффективность экранирования при ухудшении их оптических характеристик не ниже установленных граничных значений. Электрические и оптические свойства стекол с токопроводящим покрытием зависят от природы окислов, составляющих проводящую пленку, условий и методов ее нанесения и свойств самого стекла [5,9]. Для экранирования могут применяться пленки из окислов одного металла или смеси металлов. При условиях сохранения прозрачности стекол с потерями не более 20% и обеспечения достаточной электропроводности толщина пленки покрытия может колебаться в широких пределах: от $0,5 \cdot 10^{-8}$ до $(2 \dots 3) \cdot 10^{-6}$ м (от 5 до 2000 ... 3000 нм).

Наибольшее распространение получили пленки из окиси олова, так как они обеспечивают наибольшую механическую прочность, химически устойчивы и плотно соединяются со стеклянной подложкой.

Стекла с токопроводящим покрытием в основном используются в смотровых окнах и шкальных системах РЭС, в экранированных камерах с целью обеспечения доступа в них света. Замкнутый экран из стекол с токопроводящим покрытием используется и тогда, когда требуется наблюдать за происходящими внутри экрана процессами.

В настоящее время имеется номенклатура стекол с токопроводящими покрытиями, имеющих поверхностное сопротивление не менее 6 Ом при ухудшении прозрачности не более чем на 20 %. Эффективность экранирования у таких стекол составляет примерно 30 дБ в радиотехническом диапазоне волн. Поверхностное сопротивление зависит от толщины токопроводящей пленки. Толщина пленки определяет, в свою очередь, величину потери прозрачности. Поэтому при изготовлении и пользовании

стекло с токопроводящей поверхностью необходимо определить оптимальную толщину пленки. Толщина покрытия может быть найдена как

$$d = 0,053 \rho \varepsilon_0,$$

где ρ - удельное сопротивление материала пленки, Ом·м; ε_0 - эффективность экранирования в относительных единицах; d - толщина покрытия, м.

Однако из последнего выражения непосредственно найти толщину тонкой пленки нельзя, поскольку значение ρ определяемое из таблиц, нелинейно уменьшается с толщиной d , а сама зависимость между d и ρ точно неизвестна. Для каждого вида материала она может быть установлена экспериментально. Так, например, в результате обработки экспериментальных данных для алюминия при толщинах до $6 \cdot 10^{-8}$ м (60 нм) получена приближенная формула

$$R_n \approx \exp(9,5 - 4,710^8 d),$$

где R_n - поверхностное сопротивление, Ом; d - толщина пленки, м.

Погрешность вычисления R_n по этой формуле не превышает 20%. Так как стекла с эффективностью ниже 20 дБ практического применения не имеют, то в соответствии с (51) для экранирования в диапазоне частот до 10 ГГц необходимо получить поверхностное сопротивление не менее 19 Ом, поэтому толщина покрытия должна быть более или равна

$$d \geq \frac{4,1 - \lg R_n}{2 \cdot 10^8} \approx \frac{4,1 - 2,8}{2 \cdot 10^8} \approx 0,65 \cdot 10^{-8} \text{ м (6,5 нм)}.$$

Как показывают исследования, эффективность в 20дБ для рассматриваемого случая может быть получена только при незначительном переходном сопротивлении между поверхностью пленки и экраном, что возможно при соответствующем обеспечении надежного и тщательного соединения стекла с каркасом.

По мере улучшения контакта эффективность экранирования приближается к расчетной. Получение надежного контакта по всему периметру токопроводящего слоя стекла с экраном представляет

трудную техническую задачу. Только наличием недостаточно плотного контакта можно объяснить спад эффективности экранирования ниже 20 дБ в диапазоне 60...400 МГц.

Область применения металлизированных стекол в целях экранирования может быть расширена при решении задачи обеспечения надежного контакта между поверхностью стекла и экраном хотя бы за счет уменьшения поверхностного сопротивления на краях стекла, в местах контактирования с экраном, что может быть достигнуто увеличением толщины токопроводящей пленки.

4.4.7. Специальные ткани

Имеется несколько видов специальных тканей (типа РТ и артикула 4381), [5,9] с металлической нитью, отражающих электромагнитные волны. Ткань РТ изготавливается из капроновых нитей, скрученных с расплющенной и посеребренной медной проволокой диаметром 35 50 мкм.

У ткани артикула 4381 нитка свита с эмалированным микропроводом ПЭЛ-0,06 (ГОСТ 2773). Число металлических ниток может быть 30X30, 20x20, 10X10 и 6x6 на 1 см². Поскольку провод изолирован, то поверхностное сопротивление этой ткани велико. В сетке ткани электрический контакт отсутствует. Она предназначена для защиты от колебаний СВЧ. Из такой ткани обычно изготавливают специальные костюмы для индивидуальной биологической защиты.

4.4.8. Радиопоглощающие материалы (РПМ)

Радиопоглощающие материалы (РПМ) не относят к экранирующим материалам, хотя некоторые из них выпускаются на металлической основе, которая при тщательном соединении ее отдельных частей и элементов может служить экраном. Соединение листов введенного в поглощающий слой металла, мягкой сетки или фольги представляет определенные технологические трудности, и

эффективность экранирования такого РПМ будет незначительной. Поэтому поглощающим материалом экран обычно покрывают с основной целью уменьшения отражений радиоволн внутри него. Наличие существенных поглощений электромагнитной энергии в значительной степени устраняет возникновение диффузного поля, ослабляет реакцию экрана на экранируемые элементы, облегчает обеспечение биологической защиты.

Измерение диаграмм направленности антенных устройств, исследование отражающих свойств различных тел, климатические и другие испытания радиотехнической аппаратуры, предусматривающие строгую регламентацию внешних условий (например, влажности, температуры и т. д.), в ряде случаев не могут быть выполнены на полигонах. В цехах и лабораториях эти испытания и измерения должны проводиться в помещениях, имитирующих «свободное» пространство с постоянными параметрами. В таких помещениях, придав им специальную форму и используя РПМ, можно создать некоторый объем, в котором диффузное поле будет ослаблено в 300 ... 1000 раз, т. е. практически будет существовать только поле падающей волны, что позволит проводить достаточно точные измерения.

Если не представляется возможным осуществить устройство воздуховода системы охлаждения РЭС СВЧ диапазона по принципу предельного волновода со сравнительно большим сечением, то эта задача может быть решена созданием воздуховода «коленного» типа с покрытием его внутренней поверхности РПМ.

Приведенные примеры современного применения РПМ показывают, сколь оно широко и разнообразно.

Для выбора соответствующего радиопоглощающего материала необходимо задать диапазон рабочих частот, в котором должно происходить поглощение радиоволн, диапазон рабочих температур, величину допустимого коэффициента отражения, тип основы и самого материала (жесткий, эластичный, принимающий требуемую форму и т. д.).

Распространенные поглощающие материалы обладают коэффициентом отражения 1...3 %, при этом характеристики поглощения ухудшаются по мере увеличения углов падения электромагнитных волн. Имеются узкодиапазонные материалы интерференционного или резонансного типа, диапазонность которых (например, типа ХВ) составляет примерно $\lambda \pm 15\%$, и широкодиапазонные материалы.

Узкодиапазонные материалы представляют собой слой собственно материала с потерями, укрепленный на металлической основе. Толщина слоя $d \approx \lambda_m / 4$, где λ_m - длина волны в материале, точнее, $d = \lambda_m / 4 \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, где ϵ_r , μ_r - соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и относительная магнитная проницаемость покрытия. Поглощение поля в таких материалах получается в основном вследствие интерференции и взаимной компенсации на поверхности РПМ двух волн, которые отражаются соответственно от поверхности поглотителя и от поверхности металлической основы (экрана). Противоположность фаз и равенство амплитуд этих волн достигаются выбором параметров поглотителя. Существенным недостатком таких РПМ является узкодиапазонность. Причем расширение диапазонности в пределах однослойной структуры невозможно. Однако они обладают таким редким для РПМ достоинством как малая толщина (особенно у материалов сантиметрового и более высокочастотных диапазонов).

Широкодиапазонные РПМ, как правило, представляют собой листы однородного поглощающего материала с рельефной поверхностью в виде выступов (шипов) пирамидальной или конусообразной формы. Широкодиапазонные РПМ могут быть образованы и из плоских листов многослойного поглощающего материала. Принцип действия таких материалов основан на постепенном затухании электромагнитной энергии падающих волн в толще материала и превращении ее в тепло-вую, из-за наведения рассеянных слабых токов, магнитогистерезисных или высокочастотных электрических потерь. Широкодиапазонные мате-

риалы работают на всех частотах превышающих некоторую граничную, определяемую толщиной материала и его средней диэлектрической проницаемостью. С уменьшением частоты требуемая толщина поглощающего материала возрастает и на частотах 100...120 МГц уже используются пирамидальные блоки высотой до 500 мм на основаниях площадью до 200x200 мм² или плоские покрытия толщиной до 350 мм.

Предельная энергия излучения, которая может быть поглощена таким материалом, зависит от его максимальной рабочей температуры.

РПМ изготавливаются в виде тонких резиновых ковриков, гибких или жестких листов из поролона или древесных волокон, пропитанных соответствующими составами. Имеются РПМ в виде тонких ферритовых пластин. Материалы могут монтироваться путем склеивания или крепиться к основе конструкции экрана специальными скрепками.

Простейшими поглотителями СВЧ энергии являются краски, имеющие небольшие коэффициенты отражения. Так, например, краска марки НТС00-003 в диапазоне длин волн 1 ... 16 см имеет коэффициент отражения по мощности до 50 %. Такими же параметрами обладает графитированный текстолит № 369-61. В настоящее время как отечественной, так и зарубежной промышленностью выпускается обширная номенклатура РПМ [5,9].

4.4.9. Электропроводный клей (ЭПК)

Заполнение эпоксидной смолы тонкодисперсными металлическими порошками (железо, кобальт, никель, и др.) позволило получить электропроводный клей, обладающий прочностью на отрыв до 50 МПа (500 кГ/см²) с удельной электропроводностью до 10^{-6} (Ом·м)⁻¹, стойкий не только к влаге, но и к различным агрессивным средам и обеспечивающий незначительную усадку после отверждения. Время отверждения может быть доведено до

пяти минут, если этот процесс проводится с помощью токов высокой частоты [9].

Наряду с применением ЭПК взамен пайки, болтовых соединений и т. д., представляется целесообразным использовать его и в технике электромагнитного экранирования. Шовное соединение, крепление контактных систем и различных элементов экранов, заполнение щелей и малых отверстий, установка экрана на несущей конструкции - эти и другие операции успешно могут быть осуществлены с помощью ЭПК при высокой эффективности экранирования и сокращении объема монтажных работ.

Изменяя консистенцию ЭПК до состояния краски и сохраняя поверхностное сопротивление даже до 0,1 Ом на единицу площади, можно получить, как видно из (50), эффективность экранирования 60 ... 65 дБ, приближающуюся к эффективности металлов.

4.4.10. Проводящие пластмассы

Проводящие пластмассы [5] обеспечивают экранирование за счет введения проводящего наполнителя. Преимущества применения проводящих пластмасс объясняются отсутствием трещин, коррозии и отслаивания поверхностного слоя, влияющих на качество экранирования и долговечность изделия. В качестве наполнителей используются смеси графита с карбоволокном, алюминия с углеродом, никеля с графитом, проводящая стеклоткань и т. д. Основой для изготовления подобных пластмасс являются термопластичные полимеры типа пропилена, полистирола и т. д. Для защиты изделий от статического электричества широко применяются в качестве проводящего покрытия карбоновые пластины – графит.

Следует иметь в виду, что свойства пластмассовых кожухов с высокой электропроводностью приближаются к свойствам металлических кожухов, так как теряется характерная для пластмасс электроизоляционность.

4.5. Контактные устройства электромагнитных экранов. Контактные соединения и эффективность экранирования

Реальные экраны, состоящие из большого числа соединенных между собой элементов, нельзя рассматривать как однородные. Необходимо учитывать явления, обусловленные неоднородностью конструкций.

В местах стыков листов и соединений элементов ток проходит через участки с сильно уменьшенным сечением, поскольку надежный контакт осуществляется не по всей поверхности соприкосновения, а лишь в отдельных точках или областях. Это приводит к местным увеличениям плотности и неравномерному распределению токов, к возрастанию сопротивления экрана и снижению его эффективности в целом.

Чтобы уяснить, почему повышение общего сопротивления экрана приводит к снижению его эффективности достаточно представить его как объемный резонатор с распределенными параметрами, в котором добротность Q примерно пропорциональна эффективности \mathcal{E}_0 .

Возрастание сопротивления потерь резонатора (экрана) приводит к снижению его эффективности (31). Общее активное сопротивление экрана $R_{0э}$, складывается из суммы сопротивления R_s сплошного экрана, сопротивления R_k , обусловленного контактами швов, и переходного сопротивления R_n открывающихся и не открывающихся элементов, т. е. $R_{0э} = R_s + R_k + R_n = R_s + R_{доб}$, где добавочное сопротивление потерь $R_{доб} = R_k + R_n$.

Сопротивление R_s сплошного экрана обычно очень мало. Например, на частоте $f = 10$ МГц у экрана из стали оно составляет всего $2 \cdot 10^{-2}$ Ом.

Контактные соединения в экранах по конструкции и выполняемым функциям несколько отличаются от обычных электрических контактов. Под *электрическим контактом* обычно понимают такое соединение двух проводников, при котором

обеспечивается надежное прохождение через эти проводники электрического тока без заметных потерь. С этой точки зрения функции обычных контактных соединений и контактных соединений в экранах одинаковы, поскольку при толщине d экрана меньшей глубины проникновения поля в элементы его конструкции, т. е. $d < \delta$, эффективность прямо пропорциональна проводимости материала экрана. Внесение больших переходных контактных сопротивлений в экран может быть представлено не только как явление, эквивалентное ухудшению добротности резонатора, но и как явление, эквивалентное внесению несогласованных нагрузок в линию передачи или в длинную линию, приводящее к возникновению отражения электромагнитных волн и к неравномерному распределению вихревых токов. Размеры контактных соединений в экране велики и часто перерезают значительную часть его поверхности. Поэтому в указанных представлениях речь идет не о сопротивлениях потерь точечных контактов, а о контактных соединениях больших геометрических размеров, где площади соприкосновения, состояние контактных поверхностей, распределение контактных усилий, износоустойчивость и другие факторы и параметры имеют очень существенное значение. Такие большие контактные соединения поверхностей элементов требуют использования специфических решений при конструировании, как это показано в [5,9].

По своему назначению контактные соединения экранов и их элементов могут быть подразделены на четыре группы.

1. *Неразъемные контактные соединения.* Они предназначены для постоянного соединения частей и элементов экрана. Эти соединения обычно бывают сварными или паяными. Увеличение общего сопротивления потерь из-за таких соединений весьма незначительно, так как здесь при сравнительно простой и отработанной технологии можно обеспечить параметры, близкие к параметрам идеального контакта.

Принципиально возможны три разновидности электрической сварки металлов: нагреванием до сплавления (электродуговая сварка), нагреванием до получения пластического состояния металлов при их одновременном механическом сдавливании (электрическая контактная сварка) и сжатием соединяемых деталей без нагревания (холодная сварка). Сварка по любому из указанных способов заканчивается устранением границы соприкосновения и образованием единой кристаллической монокристаллической структуры.

При дуговой сварке шов получается однородным по структуре, а электрическое сопротивление его не больше сопротивления такого же по длине участка металла в несвариваемой зоне.

Контактная сварка включает в себя точечную и стыковую сварку. Электрическое сопротивление в месте такой сварки обычно не увеличивается по сравнению с сопротивлением сплошного металла.

Разновидностью сварки является пайка, к которой также относят процесс наращивания одного металла на другой, называемый облуживанием. Облуживание ведется при подготовке соединяемых поверхностей к паянию или при подготовке поверхности для обеспечения плотного несварочного соединения.

Паяние металлов возможно благодаря тому, что тесно соприкасающиеся металлы способны растворяться друг в друге, диффундировать друг в друга как в жидком, так и в твердом состоянии. Припой, соединяясь с основными металлами, связывает их механически и электрически, хотя кристаллическая структура соединительного шва отличается от структур паяемых материалов. Большое значение для качества паяного соединения имеет выбор припоя и зазора между металлами. Так как сопротивление припоя обычно не превышает сопротивления основных металлов, то можно считать, что общее сопротивление не возрастает. Следовательно, неразъемный контакт, осуществленный сплошной сваркой или пайкой, практически не изменяет общего сопротивления экрана. Качество сварки и пайки после очистки должно тщательно

проверяться с целью обнаружения непроваренных или непропаянных поверхностей, прожогов и других дефектов.

Неразъемное контактное соединение может быть выполнено и несварным. Так, например, при использовании фольговых материалов соединение листов производят одинарным или двойным фальцем, обеспечивая достаточную эффективность экранирования. При этом на высоких частотах даже при нарушении непосредственного контакта и образовании пленки переходное сопротивление будет незначительным, поскольку влияние переходной емкости при этом достаточно ощутимо.

При осуществлении неразъемного контакта с помощью болтов или точечной сварки с определенным шагом, общее сопротивление возрастает, в результате чего эффективность экранирования уменьшается. К такому виду соединения листов прибегают, когда можно ограничиться сравнительно невысоким ее значением.

2. Разъемные контактные соединения. Эти соединения могут периодически разбираться. К ним относятся установки различных щитков, крышек, перегородок, вмонтированной аппаратуры и др. По виду соединения с экраном они являются прижимными. Поверхности соприкосновения со временем подвергаются окислению и коррозии, прижимные приспособления ослабевают, прокладки сохнут, поэтому разъемные соединения должны периодически подвергаться чистке и профилактическому ремонту.

3. Скользящие контактные соединения. Эти соединения служат для постоянного или периодического изменения относительного расположения элементов экрана. Этот вид контактного соединения применяется главным образом для вращающихся и движущихся частей экрана. Характерным примером здесь является вывод осей устройств настройки и органов управления РЭС за пределы экрана.

4. Контактные соединения открывающихся частей экрана. Этот вид контактной системы по своей конструкции является наиболее сложным, требует тщательного выполнения, так как в

основном определяет величину дополнительного сопротивления потерь.

Исследования показывают, что для экранов сложной конструкции с различными видами контактных соединений $R_{0Э} / R_s$ может достигать 10...15, что соответственно приводит к ухудшению эффективности также примерно в 10...15 раз. Однако практическое уменьшение эффективности может оказаться и не столь большим из-за шунтирования переходного контакта индуктивной и емкостной составляющими его полного сопротивления.

Надежная работа электрических контактов обеспечивается их конструкцией, тщательностью изготовления, правильным выбором покрытий материалов и контактным нажатием. При значительных нажатиях контакты сравнительно хорошо сохраняют малые переходные сопротивления, а при слабых, даже покрытия из благородных металлов и большие контактные поверхности не гарантируют сохранения этого сопротивления в пределах требуемых значений. Однако увеличение контактного давления создает определенные трудности для расчленения контакта. Таким образом, выбор конструкции контактных устройств для открывающихся элементов экрана приходится производить в условиях противоречивых требований. С одной стороны, необходимо обеспечить простое легкое расчленение контакта, например, для открывающихся дверей экрана, с другой - потребуется получить большую эксплуатационную надежность контактной системы при сравнительно небольших переходных сопротивлениях. Теоретические [5,9] и экспериментальные исследования позволили установить зависимость между формой контактных поверхностей, значением переходных сопротивлений и контактным нажатием при его изменении. В ограниченных пределах, эта зависимость представлена графически на рис. 29. Контактные системы для целей электромагнитного экранирования наиболее целесообразно изготавливать из фосфористой бронзы и латуни. Наименьшее переходное сопротивление обеспечивают контакты круглой и

пирамидальной формы. При нажатии, например, с усилием 1 кгс переходное сопротивление составит 10^{-4} Ом. В экранах РЭС, как правило, имеются открывающиеся части в виде дверей, окошек, крышек и т. д. в зависимости от того, как часто необходим доступ к элементам, расположенным внутри аппаратуры и ее блока. Устройство этих узлов экранов является наиболее трудоемким, главным образом из-за необходимости обеспечения плотного металлического контакта между рамками и полотнами дверей, окошек, крышек и т. д.

Контактные устройства, используемые для этой цели, могут быть регулируемые или нерегулируемые (постоянных размеров).

Регулируемый контакт применяется при сравнительно больших дверных проемах, когда требуется обеспечить равномерное контактное давление по всему периметру. Для большей надежности могут применяться двойные контакты. Контактные устройства могут располагаться как на торцевой части дверей, так и на самом полотне. Основные требования, которые предъявляются к контактными устройствам, сводятся к обеспечению плотного контакта по всему периметру, надежности и возможности легкого открывания и закрывания створок. Последнее требование особенно важно в тех случаях, когда двери часто открываются, например, для экранированных помещений кабин и т. д. В этих условиях предпочтительно располагать контактные устройства на полотне двери, но при этом требуются специальные стопорные или прижимные замки, удерживающие двери в таком положении, при котором обеспечивается достаточное сжатие контактов. Лучший результат достигается тогда, когда сжатие электродов контакта происходит под воздействием механической реакции деформированной пружины или реакции деформированной подложенной под контакт резины.

В табл.2 схематически показаны конструкции контактных систем для открывающихся дверей, крышек, люков, смотровых окон,

осей управления и др. Системы должны выполняться таким образом, чтобы

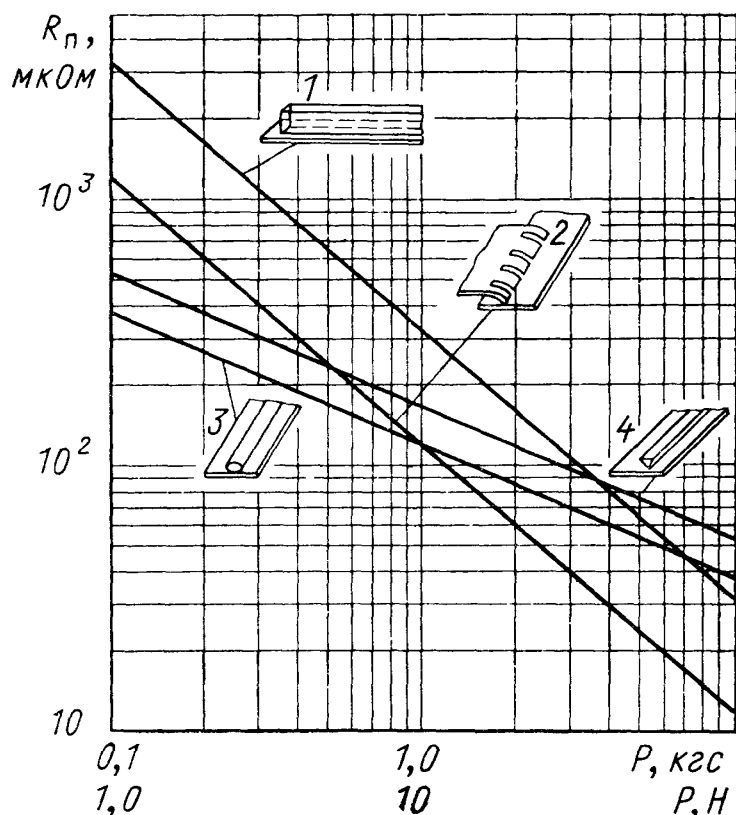


Рис. 29. Зависимость переходного сопротивления от контактного нажатия: 1 - при плоских контактных поверхностях; 2 - для плоской поверхности со щеточным контактом; 3 - для плоской поверхности с цилиндрическим контактом; 4 - для плоской поверхности с пирамидальным контактом; значения P приведены в кгс и в ньютонах (Н)

исключить образование щелей между корпусом экрана и открывающимся элементом.

Характеристикой качества контактной системы является ее электрическая герметичность, которая количественно может быть выражена через эффективность экранирования.

Контактные устройства табл.2 в широком диапазоне частот (0,15 ... 1000 МГц) обеспечивают эффективность экранирования до 80 дБ, а двойные контактные системы с регулированием

контактного давления - до 100 дБ. Экспериментальная проверка экранов с многократным использованием указанных контактных систем показала надежную их работу [9].

Качество контакта со временем вследствие старения ухудшается. Поэтому контактное устройство требует периодического осмотра и профилактического ремонта (чистки поверхностей, регулировки контактного давления и т. д.).

Приведенные контактные системы могут быть использованы в экранах любых типов, однако в каждом конкретном случае применения необходимо исходить из назначения экрана, его размеров, расположения и другим факторов.

В разъемных соединениях для повышения ЭЭ следует применять уплотняющие прокладки. Они должны обеспечивать непрерывность соединения (исключать щели). В связи с этим необходимое сопряжение соединяемых деталей определяется из условия создания низкоомного стабильного контактного сопротивления с учетом шероховатости соединяемых поверхностей, возможности образования на них оксидных пленок и упругости прокладок.

Известны [5] следующие конструкции электромагнитных уплотняющих прокладок: плетеные проволочные; из диэлектрика, армированного проволокой; из мягкого металла (свинца, меди и др.); из проводящей пластмассы и эластомеров; гребенчатые.

Плетеные проволочные наиболее распространены. Они так же, как оплетка коаксиальных кабелей и экранированных проводов, изготавливаются из тонкой металлической проволоки (монели, алюминия, посеребренной латуни, луженой омедненной стали и т.п.). Они выпускаются в виде лент прямоугольного и круглого сечений, а также самостоятельных прокладок различного типоразмера. Плетеные прокладки бывают пустотелыми, заполненными для повышения гибкости эластомерами (резиной, неопреном, силиконом) или имеют металлическую основу.

Усложненные конструкции плетеных прокладок позволяют решать задачи по обеспечению пылевлагозащиты, герметизации от перепадов давления или повышенной жесткости соединения.

Прокладки из диэлектрика, армированного монелевой или алюминиевой проволокой, а также из проводящей пластмассы и эластомеров выпускаются в виде полос и пластин.

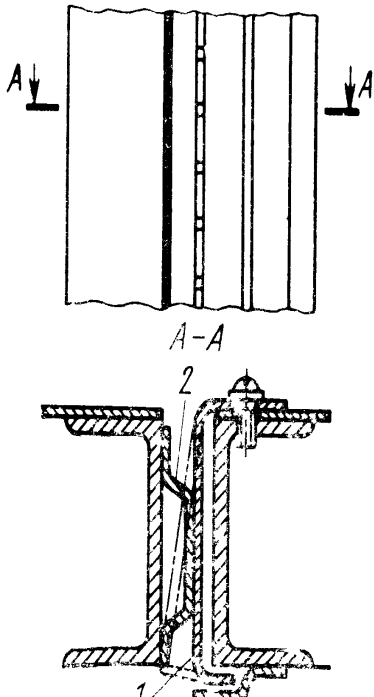
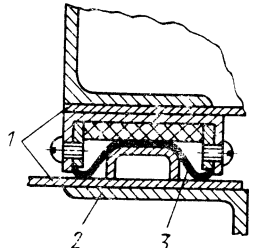
Гребенчатые прокладки различной конфигурации изготавливают штамповкой из бериллиевой бронзы.

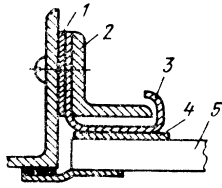
При монтаже прокладки устанавливают в пазы, приклеивают или крепят с помощью болтов или винтов. Материал прокладок должен быть совместим с контактирующими поверхностями.

Установка плетеных проволочных прокладок на металлической основе выполняется с помощью точечной сварки или клепки. Крепление прокладок следует выполнять так, чтобы соединяемые поверхности не скользили, а сдавливались для обеспечения большей электро-герметичности аппаратуры и износостойкости уплотнения.

Таблица 2

Контактные системы для открывающихся, вращающихся и съемных устройств электромагнитных экранов

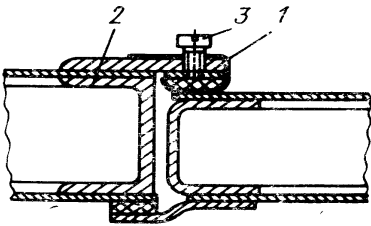
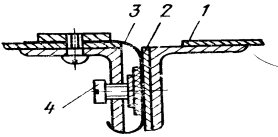
Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Пружинный контакт.</i> Сжатие контактов происходит за счет деформации пружины 1 при соприкосновении с контактной планкой 2.</p> <p>Применяется для обеспечения контакта открывающихся элементов (например, дверей) экранов радиопередатчиков и других радиотехнических устройств.</p> <p>Прост в изготовлении и удобен в эксплуатации. Эффективность экранирования 60...70 дБ</p>
	<p><i>Контакт с резиновой подложкой.</i> Сжатие контактов происходит под действием реакции деформированной подложки (резины) на металлическую контактную поверхность.</p> <p>Контактная пружина 3 при упоре на контактный брусок 2 обеспечивает надежный контакт между корпусом экрана 1 и экраном открывающегося устройства</p>



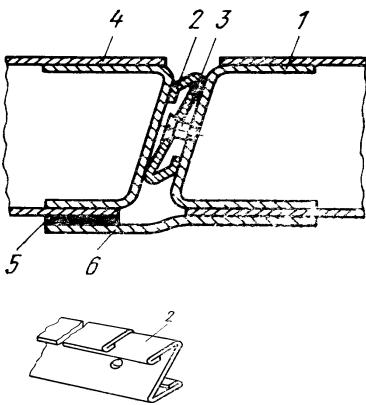
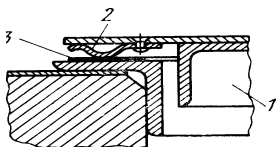
Пружинный контакт. Сжатие контактов происходит из-за деформации контактной пружины 3 при соприкосновении с дверью 5, по периметру которой укреплена контактная полоса 4. По периметру проема, образуемого открываемой частью экрана, с помощью угольника 2 крепится медная лента 1 и контактная пружина 3.

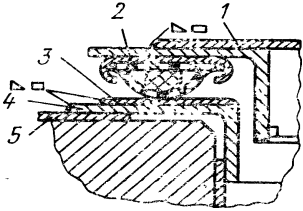
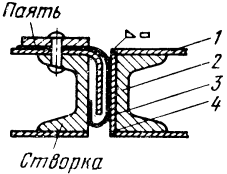
Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Пружинный контакт.</i> Сжатие контактов происходит из-за реакции уплотненной резины 2 и деформации контактной пружины 5. Контактная полоса 4 прикреплена к дверному полотну 5. К проему экрана приварен угольник 1, к которому крепится пружина 5 и уплотненная резина 2.</p> <p>Для сохранения контакта на двери должно быть установлено прижимное устройство</p>
	<p><i>Контактная система, не требующая устройства для прижима двери.</i> К экрану двери по периметру устанавливается контактная пружина 1. Регулировка поджатия пружины осуществляется поджимным устройством 2 и винтом 3. Равномерное поджатие контактной пружины обеспечивает сохранение ЭЭ на уровне 80 дБ</p>

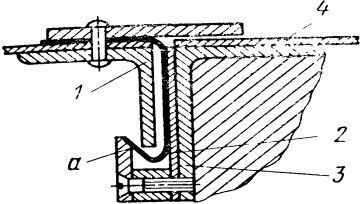
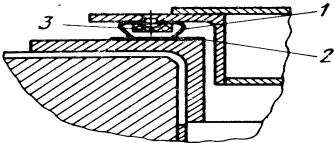
	<p><i>То же.</i> Имеется регулировка поджатия контактной пружины в другой плоскости и требуется устройство для прижима двери. Контактная пружина 1 крепится к дверной коробке 2. Равномерное поджатие пружины обеспечивается при помощи винта 3</p>
	<p><i>То же,</i> но упрощенной конструкции</p>

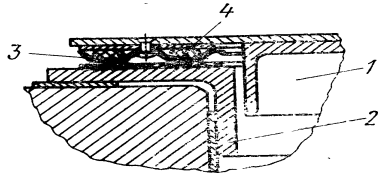
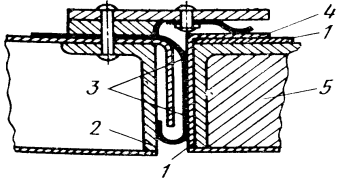
Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Контактное устройство с «плавающей» контактной пружиной:</i></p> <p>1- открывающаяся створка; 2- «плавающая» контактная пружина из бериллиевой бронзы; 3 - специальный крепежный винт; 4 - рама дверного проема; 5 - демпфирующая резиновая прокладка; 6 - ограничивающая опорная планка.</p> <p>Контактная система надежна в эксплуатации, самозачищающаяся, длительное время обеспечивает надежный контакт, эффективность экранирования до 80 дБ</p>
	<p><i>Одноконтактная пружина.</i> Система 2 расположена на полотне дверей 1. Контактная лента 3 прикреплена к каркасу дверной коробки. Требуется наличие запирающего (прижимного) устройства для две-</p>

	рей
	<p><i>То же, с применением уплотнителя:</i></p> <p>1 - экран дверного полотна; 2 - шнур резиновый, обтянутый медной сеткой, припаянной к дверному каркасу; 3 - лента контактная (латунная); 4 - экран; 5 - каркас дверной коробки</p>
	<p><i>Торцевое одноконтактное устройство:</i></p> <p>1 - экран; 2 - каркас; 3 - пружина; 4 - контактная лента</p>

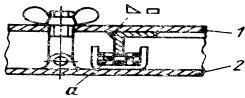
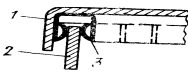
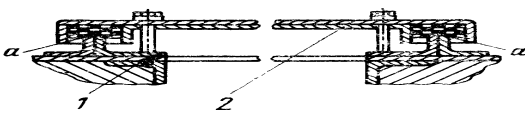
Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Торцевое одноконтактное устройство с дополнительным контактом в точке а:</i></p> <p>1 - каркас двери; 2 - контактная пружина; 3 - каркас коробки. Применяется для экранированных камер</p>
	<p><i>Контактная система, расположенная на полотне дверей.</i> Контакт самозатачивающийся, требует применения замкового (прижимного) устройства для двери. При закрывании двери пружина 1 контактирует с планкой 2 в двух плоскостях. Амортизирующий жгут 3 способствует улучшению контакта</p>

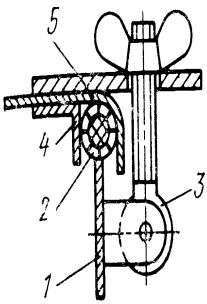
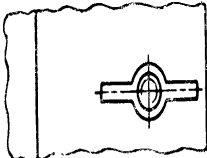
	<p><i>Двойной контакт, расположенный на полотне двери: 1- дверь; 2 - каркас дверной коробки; 3 - контактная пружина; 4 - шнур резиновый. Требуется установки на двери прижимного замка. Обеспечивает легкое открывание дверей</i></p>
	<p><i>Комбинированный, двойной, контакт. Контакты расположены как на торцевой части двери, так и на полотне, что позволяет обходиться без прижимного замка: 1 - экран; 2 - дверное полотно; 3 - контактная пружина; 4 - контактная планка; 5 - дверная коробка</i></p>

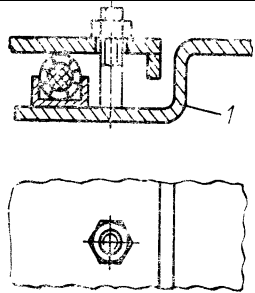
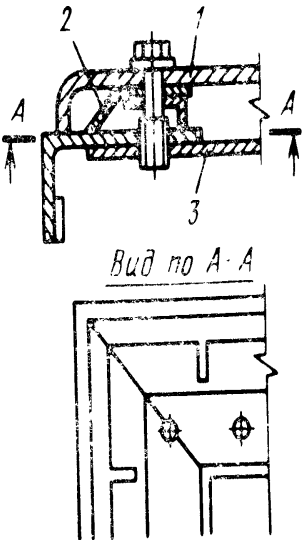
Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Контакт „ножевого” типа. Контактная пружина 3 приваривается к экрану 1. Контактный нож 2 заклепками крепится к экрану</i></p>
	<p><i>Контакт съёмной крышки корпусом экрана обеспечивается в точке а. Контактная поверхность экрана 3 должна быть зачищена. Резиновая прокладка 2 уложена в латунной сетке 1</i></p>
	<p><i>Контакт съёмной крышки с экраном обеспечивается устройством «ножевого» типа с болтом в качестве замка: 1 -</i></p>

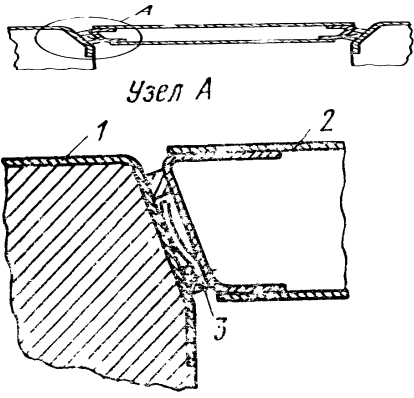
	<p>съемная крышка; 2 - экран; 3 – изоляционная прокладка; 4 - контактная пружина</p>
	<p><i>Контакт съемной крышки 1 с экраном обеспечивается при соприкосновении угольника с латунной сеткой в точке а. Сжатие обеспечивается болтом, прикрепленным к корпусу 2</i></p>
	<p><i>Контакт «ножевого» типа. Пружина 3 из бронзы (ленточная, разрезная) крепится к крышке 1, контактным ножом является корпус 2</i></p>
	<p><i>Сжатие соприкасающихся поверхностей контакта в точке а осуществляется с помощью винтов, стягивающих крышку 2 и экран 1</i></p>

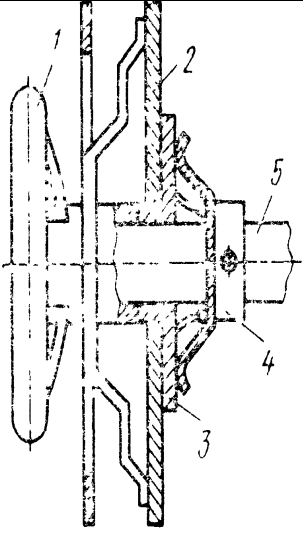
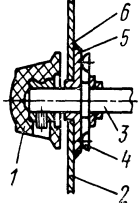
Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
 	<p><i>Контакт, применяемый для часто открывающихся крышек. Плотный контакт между экраном 1 и крышкой 4 создается с помощью стягивающего винта 3. Медная плетенка 5, в которой шнур 2 имеет плотный контакт с крышкой</i></p>
	<p><i>Примерно то же. Амортизирующий шнур 1 находится в медной</i></p>

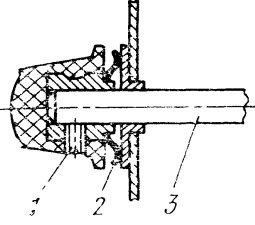
	<p>плетенке, которая имеет надежный электрический контакт с корпусом. Очищенная поверхность крышки имеет непосредственный контакт с медной плетенкой</p>
	<p>Контакт обеспечивается соприкосновением контактной пружины 2, прикрепленной к крышке 1, с контактной планкой каркаса 3</p>

Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p>При необходимости обеспечения доступа к оборудованию, находящемуся под полом экрана, применяют специальные крышки 2, которые собственным весом могут обеспечить необходимый контакт с экраном 1, а 3 – контактная пружина</p>

	<p><i>Вывод металлической оси ручки (настройки) мощного каскада. Контактное устройство выполнено в виде контактных щеток-манжет, надеваемых на металлическую ось с внутренней стороны, которые соприкасаются своими контактными частями с поверхностью экрана:</i> <i>1 - штурвал (ручка); 2 - панель;</i> <i>3 - втулка; 4 - манжета; 5 - вал</i></p>
	<p><i>Вывод металлической оси ручки настройки с обеспечением щеточного контакта с внутренней стороны экрана: 1 – ручка управления; 2 – эк-ран; 3 – металлическая ось; 4 – кон-тактное кольцо; 5 – латунная втулка;</i> <i>6 – сварное соединение</i></p>

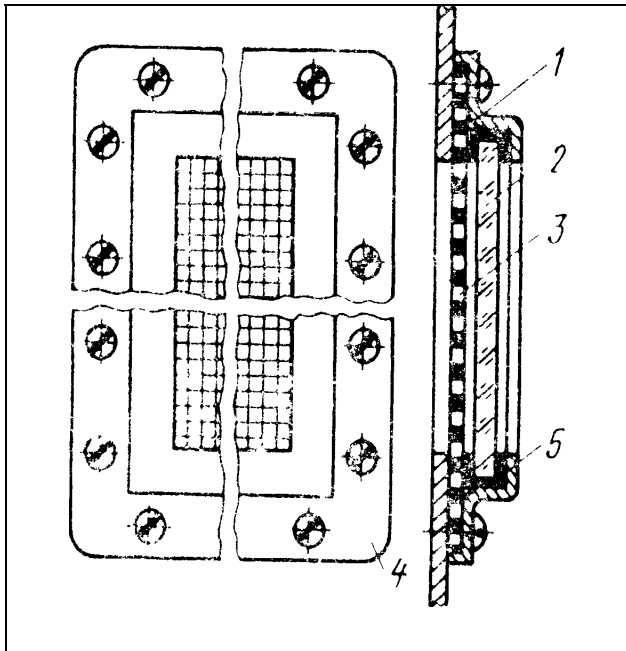
Продолжение табл. 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Вывод металлической оси ручки настройки с обеспечением щеточного контакта с наружной стороны экрана:</i> <i>1 - винт стопорный; 2 - контактная пружина; 3 - ось</i></p>
	<p><i>Вывод неметаллической оси</i></p>

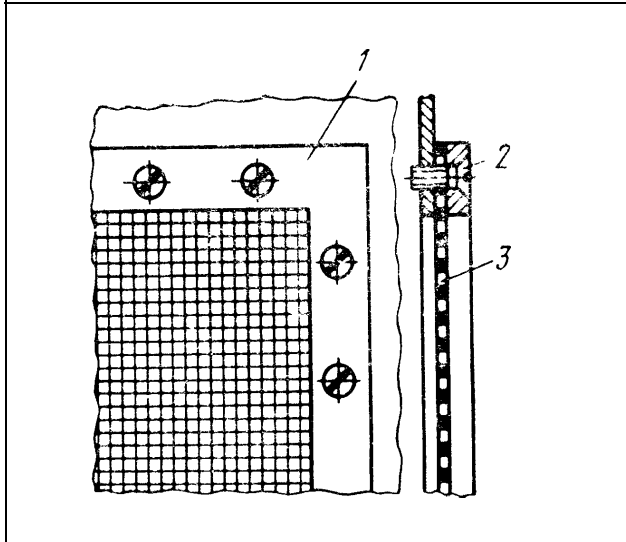
	<p>ручки управления. Последняя проходит через металлический патрубок 2. Размеры патрубка определяются по данным [9] (1 - экран; 3 - ось)</p>
	<p>Экранирование смотровых окон с заделкой сетки 2. Применяется в случае использования сетки с ячейками 5x5 мм и более при диаметре провода 0,5...0,7 мм. Каждая проволока сетки припаивается припоем ПОС-40. Рамка 1 - медная или латунная крепится к экрану винтами. Место контакта рамки с экраном необходимо лудить или цинковать</p>

Продолжение табл. 2

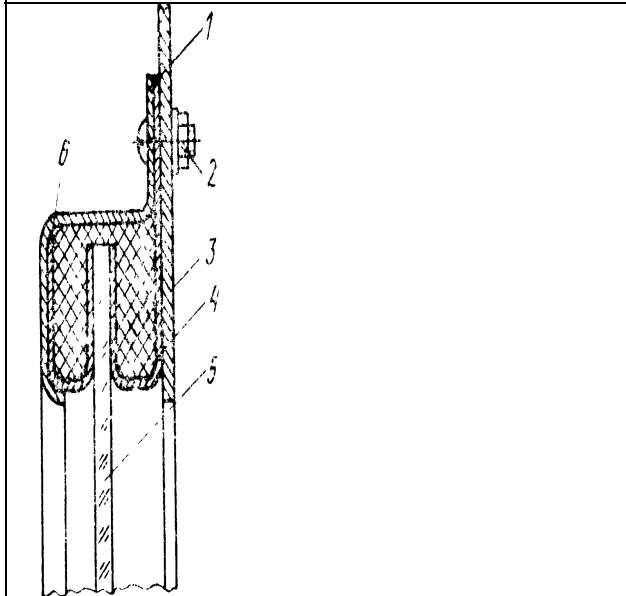
Эскиз	Краткая характеристика
	<p>Экранирование смотровых окон металлических</p>



сеткой 3 при помощи обрамления 1. Между стеклом 2 и обрамлением прокладывается резиновая прокладка 5. Места контактирования сетки с корпусом или панелью 4 необходимо покрывать оловом

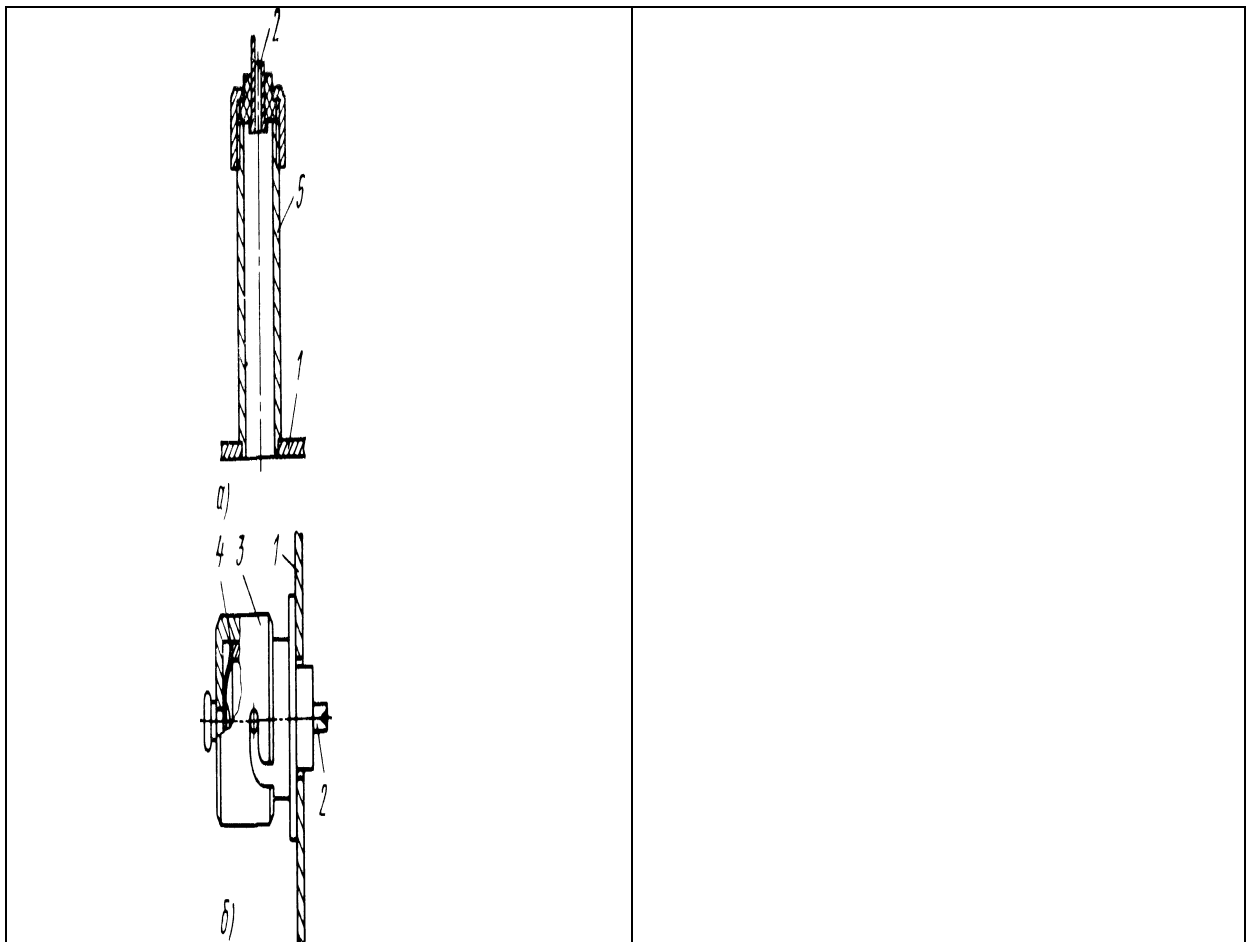


Экранирование смотровых окон применением сеток без защитных стекол. Сетка 3 укладывается на защищенную панель и закрепляется рамкой 1 с помощью винтов 2



Экранирование смотровых окон применением стекол 5 с токопроводящими поверхностями. Для улучшения контакта поверхности стекла с экраном 3 используется уплотненная резина 4, обложенная контактной прокладкой из оловянной фольги 6. Места контакта прижимной скобы 1 с прокладкой 6 и экраном необходимо лудить. Конструкция стягивается винтом 2

Эскиз	Краткая характеристика
	<p><i>Фланцевое волновое соединение.</i> Соединение волноводов 3 осуществляется с помощью стягивающих болтов 1 и контактной прокладки 2 из бериллиевой бронзы. Применение пружинной прокладки с разрезными лепестками, отогнутыми в разные стороны, обеспечивает эффективность экранирования до 80 дБ</p>
	<p><i>Экранирующий одноконтактный разъем.</i> Экранирующее гнездо (а) устанавливается на корпус (экран) прибора и состоит из корпуса разъема 1, изоляционной втулки 2 и контактного гнезда 3. Одноконтактный штырь (б) состоит из штеккера 4, изолятора 5, гайки 6 для сочленения с экранирующим гнездом, втулки 7 для обеспечения контакта с экранирующей оплеткой гибкого провода 9. Экранирующее гнездо выполнено по принципу предельного волновода</p>
	<p><i>Экранирование контрольных измерительных гнезд:</i> а - с использованием предельных волноводов; б - с применением заглушки. Здесь: 1 - экран; 2 - контактное гнездо; 3 - заглушка; 4 - контактная прокладка; 5 - патрубок.</p>



4.6. Виды соединений листов обшивки экранов

Для обеспечения электрической герметичности листы (полотна) экрана должны быть соответствующим образом соединены. Рекомендуется [9] применять следующие виды соединений: внахлест (с перекрытием), встык и с одинарным или двойным фальцем.

На рис. 30 схематично показано несколько вариантов соединений металлических листов сплошным непрерывным швом внахлест на каркасе из уголкового или полосового железа и без каркаса. Перекры-

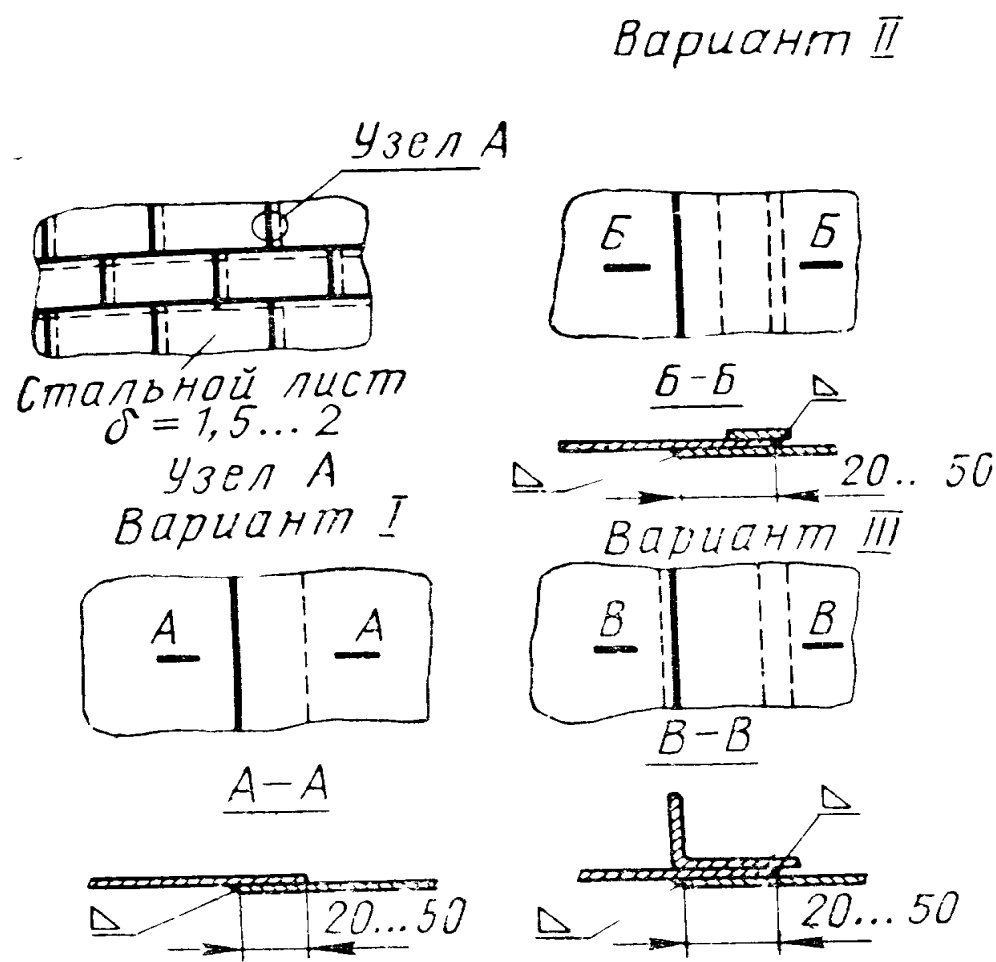


Рис. 30. Соединения листов экрана внахлест

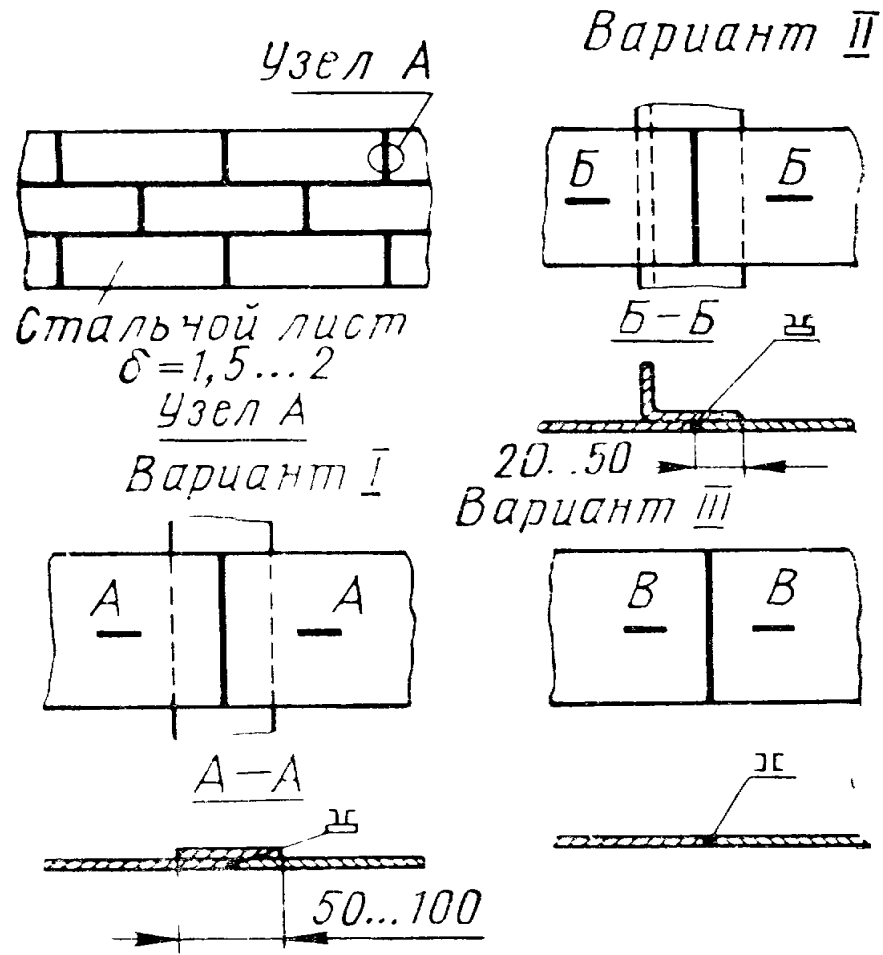


Рис. 31. Соединения листов экрана встык

тие одного листа другим должно быть 20 ... 50 мм. Соединение листов внахлест обеспечивает высокую эффективность экранирования, технологически является наиболее простым и может быть осуществлено как по каркасу экрана, так и без каркаса.

Однако этот вид соединения требует дополнительной отделки поверхностей экрана для придания им необходимого внешнего вида, приводит к определенному увеличению расхода материала и массы экрана.

Такое соединение преимущественно применяется для экранирования помещений и кабин, внутренняя поверхность которых дополнительно облицовывается. При непосредственном экранировании аппаратуры и ее элементов, соединение внахлест используется в тех случаях, когда экран не имеет каркаса. Из вариантов, представленных на рис. 30, наибольшее распространение получил первый.

Если сварка или пайка производится по каркасу, то удобнее соединение листов обшивки экрана осуществлять встык (рис.31), при этом необходимое перекрытие создается полосой или уголком каркаса. Соединение встык по каркасу обеспечивает получение ровных поверхностей. После очистки места сварки или пайки и окраски экрана он получает надлежащий внешний вид. Этот вид соединения обеспечивает высокую эффективность экранирования, но менее технологичен, чем внахлест.

Вариант *I* соединения (рис. 31) применяется для экранированных помещений и кабин, вариант *II* - для аппаратуры.

Конструкция каркаса определяется назначением экрана, расположением внутренних устройств и размером металлических листов. Обычно каркас изготавливается из уголковой или полосовой стали. Деревянные каркасы применяются для крепления сетчатых материалов.

Соединение листов встык без каркаса (вариант *III*, рис. 31) применяется для небольших экранов, малых по габаритам, и

миниатюрных элементов РЭС при достаточной толщине материала экрана.

На рис. 32 показаны возможные способы соединения листов белой жести и оцинкованной стали в фалец. Для получения жесткого и устойчивого контакта соединяемых поверхностей одинарный и двойной фальцы в указанном на рисунке месте припаиваются по всей длине экрана.

Рассмотренные выше контактные устройства в результате

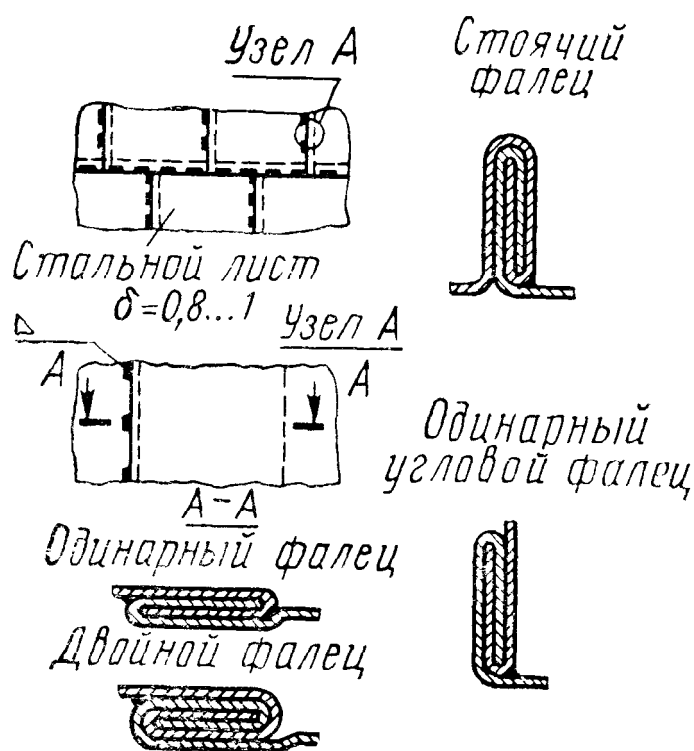


Рис. 32. Соединения листов экрана в фалец

использования сварки или пайки обладают пренебрежимо малым переходным сопротивлением. Однако в тех случаях, когда применение сварки или пайки оказывается невозможным или нецелесообразным, контакт не получается сплошным и пренебречь переходным сопротивлением не представляется возможным. Для выяснения механизма влияния переходных сопротивлений контактной системы на ЭЭ в этих условиях рассмотрим общую эквивалентную схему электрического контакта.

В общем случае без учета поверхностных сопротивлений контактирующих поверхностей эквивалентная схема электрического контакта может быть представлена так, как показано на рис. 33, *a*. Активное сопротивление R_n выражает свойства полного, плотного контакта соединяемых поверхностей. Иногда его называют основным переходным сопротивлением. Индуктивная составляющая электрического контакта оказывается последовательно соединенной с R_n и представляет индуктивность прямого провода произвольной толщины, длина которого равна среднему диаметру кажущейся поверхности контакта.

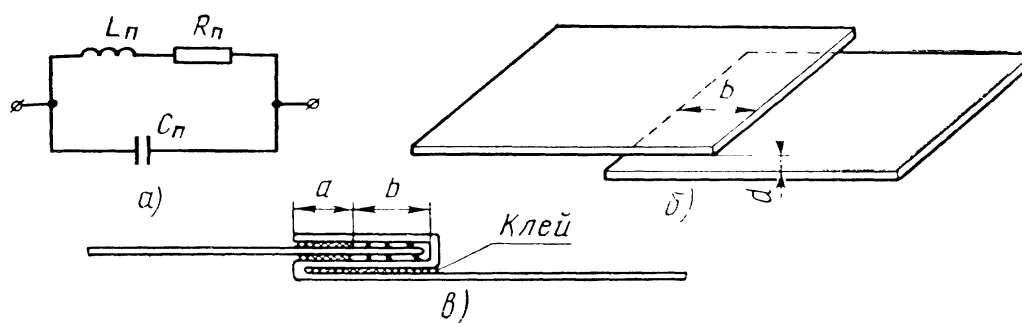


Рис. 33. Соединение электрически тонких материалов экрана:
a – эквивалентная схема электрического контакта; *б* – соединение листов внахлест; *б'* – комбинированное контактное соединение

Применительно к конструкциям экранов РЭС, экранированных помещений и кабин сопротивление этой индуктивности почти всегда пренебрежимо мало в весьма широком диапазоне частот.

Емкость C_n , включенная параллельно ветви с активным сопротивлением R_n , выражает свойства той части контакта, где нет полного касания контактных поверхностей. Как известно, контактные поверхности шероховаты, и полное касание происходит только в отдельных областях этих поверхностей. Между другими областями, где нет полного касания, образуются участки со сравнительно высокими локальными емкостями. Этому способствует образование на металлах, не имеющих достаточно плотного соприкосновения, пленки окислов или солей, обладающей изолирующими свойствами.

Емкость C_n и индуктивность L_n образуют реактивные сопротивления переходной зоны. С реактивными составляющими полного контактного сопротивления можно не считаться в хорошо выполненных контактных системах при сравнительно больших контактных давлениях и чистых контактирующих поверхностях. Однако на высоких частотах, представляющих значительную часть рабочих диапазонов многих экранов, реактивная составляющая переходного сопротивления может оказывать существенное влияние на работу контактных систем. При этом наиболее ощутимым оказывается влияние сопротивления переходной емкости C_n .

Экспериментальные исследования и расчеты, например, показывают, что переходная емкость чистой контактной пары металлов с площадью соприкосновения 5 мм^2 , покрытой диэлектрической пленкой толщиной 20 нм , составляет примерно 200 пФ . Сопротивление такой емкости на частоте 10^8 Гц равно $8...9 \text{ Ом}$. Если основное переходное сопротивление контакта в десятки и сотни раз меньше этой величины, что и имеет место на практике, то с указанной емкостью можно не считаться. Однако возможны условия, при которых емкостная составляющая параллельного переходного сопротивления окажется меньше или соизмеримой с активной составляющей. Чаще всего такие условия возникают на частотах выше $2 \cdot 10^8 \text{ Гц}$.

На рис. 33, б показано соединение листов экрана внахлест, при котором в области длиной b создается поверхностное переходное сопротивление перекрытия, характеризующее электрическую герметичность контакта.

Если рассматривать приложенные одна к другой две поверхности единичной площади, одна из которых является однородной фольгой, а вторая поверхностью контакта, то, очевидно, что их сопротивления оказываются включенными последовательно и, поскольку сопротивление первой поверхности значительно меньше второй, общее сопротивление будет определяться переходным сопротивлением контакта.

Многочисленные измерения в диапазоне частот выше 200 МГц показали, что среднее значение *поверхностного переходного емкостного сопротивления контакта* в результате аппроксимации с погрешностью не более $\pm 15\%$ может быть представлено зависимостью [9]

$$X_{nc} = 5 \frac{\sqrt[4]{\lambda d_1}}{l \varepsilon_r},$$

где l - длина перекрытия, см; ε_r - относительная диэлектрическая постоянная клея; λ - длина волны, см; d_1 - зазор между листами (толщина диэлектрика), см.

Например, пусть требуется определить эффективность экранирования на волне $\lambda=150$ см алюминиевым листом из однородной фольги толщиной 0,08 мм в двух случаях:

- при отсутствии контактного соединения;
- с контактным соединением, характеризуемым $l = 5$ см, $\varepsilon_r = 5$ и $d_1=0,03$ см.

Поверхностное сопротивление однородной фольги

$$R_{nA} = \frac{\rho}{d} = \frac{2,6 \cdot 10^{-8}}{0,08 \cdot 10^{-3}} \cong 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}.$$

Поверхностное переходное сопротивление контакта

$$X_{nc} = 5 \frac{\sqrt[4]{\lambda d_1}}{l \varepsilon_r} = 5 \frac{\sqrt[4]{150 \cdot 0,03}}{5 \cdot 5} \approx 0,2 \text{ Ом}.$$

Эффективность экранирования будет в первом случае

$$\mathcal{E} = \frac{60\pi}{R_{nA}} = \frac{60 \cdot 3,14}{0,32 \cdot 10^{-3}} \cong 6 \cdot 10^5 \text{ или } 116 \text{ дБ},$$

во втором

$$\mathcal{E}_k = \frac{60\pi}{X_{nc}} = \frac{60 \cdot 3,14}{0,2} \cong 942,5 \text{ или } 60 \text{ дБ}.$$

Очевидным направлением уменьшения переходного сопротивления является увеличение длины перекрытия b , которая, однако, ограничена расходом материала. Практически ограничиваются величиной перекрытия в 5...7 см. В необходимых случаях применяют клей с большим ϵ_r . Целесообразным является использование электропроводного клея.

Для экранов, работающих в широком диапазоне частот, начиная от 100...150 кГц, применяют комбинированное контактное соединение тонких листов, которое схематически показано на рис. 33, в. При таком соединении склеиваются только участки перекрытия длиной a . Из-за плотного прилегания листов на участке перекрытия длиной b также создается жесткий электрический контакт. При определенном увеличении общей длины перекрытия $a+b$ и уменьшения его склеенной части a переходная емкость указанного контакта сохраняет свою величину из-за увеличения числа пластин образованного эквивалентного конденсатора. Следовательно, на низких частотах контакт обеспечивается преимущественно его активным сопротивлением, а на высоких - переходной емкостью.

Обшивка корпусов РЭС в основном производится указанными способами, однако во многих случаях сварка непрерывным швом может быть заменена точечной сваркой или креплением листов винтами (болтами).

Во всех случаях соединения листов требуется высокая чистота обработки поверхностей контактирующих частей, рихтовка сварного каркаса, листов обшивки, их плотное затягивание при болтовом крепении. В последнем случае рекомендуется оловянирование мест соединений.

Точечная сварка и винтовые соединения упрощают монтаж экрана, но требуют соблюдения определенного расстояния между точками крепления, в противном случае в экране могут образоваться щели значительных размеров, что приведет к снижению его эффективности. Требуемый шаг крепления зависит от диапазона

частот экрана, от мощности излучения экранируемого источника электромагнитных колебаний или от требуемой эффективности экранирования внешних полей.

Экспериментально установлено, что среднее число n контактных точек на 1 м длины контакта для обеспечения эффективности экранирования \mathcal{E}_0 определяется формулой

$$\lg n = 1,2 - 0,2 \lg \lambda + 0,25 \lg (\mathcal{E}_0/5), \quad (52)$$

где λ - длина волны, м; \mathcal{E}_0 - требуемая относительная эффективность экранирования. Погрешность определения n по этой формуле не превышает 30 %, а среднеквадратичное отклонение от среднего значения - не более 3...5 точек.

Для выполнения норм биологической защиты величина n должна удовлетворять условию

$$\lg n \geq \lg n_{\min} = 1,2 + 0,25 \lg P - 0,2 \lg \lambda, \quad (53)$$

где n_{\min} определяется с той же погрешностью, длина волны λ выражена в метрах, а мощность излучения P в киловаттах.

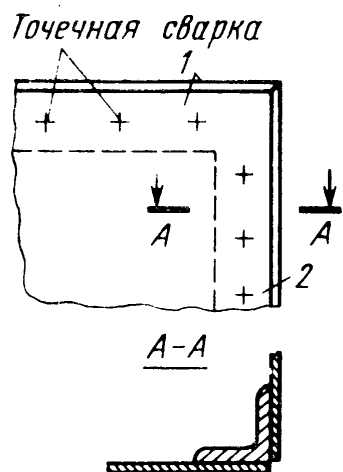
Следует отметить, что для достижения эффективности экранирования более 40 дБ при длине волны менее 5 м следует отказаться от точечных контактов и прибегнуть к использованию сплошных соединений (сплошных швов) элементов конструкций экрана.

В табл.3 приводятся некоторые распространенные варианты точечного крепления листов обшивки каркасов и других несущих конструкций РЭС.

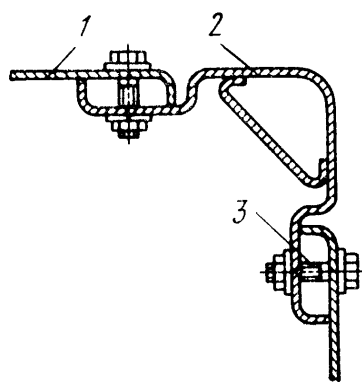
Варианты точечного крепления листов обшивки каркасов РЭС

Эскиз

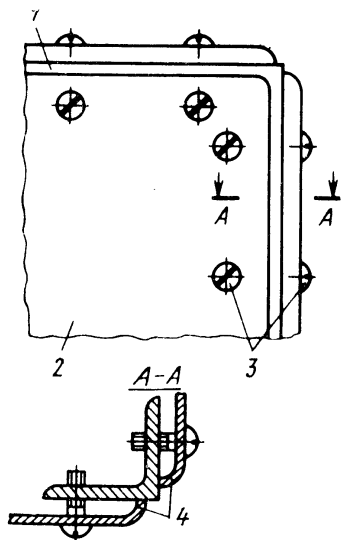
Краткое описание



Крепление обшивки 1 к каркасу точечной сваркой. Перед сваркой соприкасающиеся поверхности каркаса 2 и обшивки 1 должны быть зачищены, листы обшивки отрихтованы и плотно прижаты к каркасу. Толщина материала не должна превышать 2 мм



Крепление обшивки 1 к каркасу 2 из фасонной листовой стали крепежными болтами или винтами 3. Рекомендуется делать небольшую отбортовку по краям панелей обшивки, которая превышает жесткость панелей и позволяет исключить щели в промежутках между винтами 3. Применяется для экранов с габаритными размерами до 1...2 м и эффективностью до 60 дБ



Крепление обшивки 2 к каркасу 1 с помощью крепежных винтов 3. Обшивку и каркас следует цинковать в местах соединения 4. Места контактирования не окрашивать. Применяется для экранов с габаритными размерами до 1...2 м и эффективностью до 60 дБ

4.7. Экранирование отверстий

Для нормального функционирования экрана и элементов РЭС, расположенных в экранах, и, в частности, для достижения требуемого теплового режима конструкций экранов необходимо предусматривать соответствующие отверстия. Размеры и расположение отверстий определяется назначением и конструкцией экрана, его эксплуатационными характеристиками. Иногда отверстия в экране требуются для согласования его с конструкцией РЭС или радиотехнического объекта, куда входят экранируемые узлы и приборы, потенциальные источники помех или чувствительные к ним элементы.

Отверстия в экране вместе с внутренними и внешними элементами РЭС, внутренним и внешним пространством экрана образуют вентиляционные, коммуникационные (для управления, связи, сигнализации) пути и каналы для передачи разного рода усилий, жидкостей, газа. Эти каналы не должны нарушать электрическую герметичность экрана и снижать его эффективность.

Для обеспечения требуемой эффективности экранирования отверстия должны быть выполнены по *принципу предельных волноводов*. Как известно, указанный принцип заключается в следующем: при определенных соотношениях между размерами волновода и длиной волны поступающих на его вход электромагнитных колебаний практически исключается возможность распространения по волноводу этих колебаний. Таким образом, по

отношению к колебаниям на входе волноводная система ведет себя как фильтр с полосой задерживания, совпадающей с полосой, где сосредоточена основная часть энергии их спектра. Часть электромагнитной энергии, прошедшая на выход волновода, определяет эффективность его действия как фильтра, т. е. затухание этого фильтра в полосе задерживания.

В современной технике применяются различные типы волноводных фильтров. Однако в технике электромагнитного экранирования применение находят в основном простейшие: предельные волноводы, ослабляющие колебания с длиной волны, превышающей критические значения $\lambda \geq \lambda_{кр}$, т. е. фильтры верхних частот. Такие волноводы не усложняют конструкции экранов и согласуемых с ними элементов РЭС.

Волноводный фильтр верхних частот обеспечивает затухание в полосе задерживания, так как на частотах ниже критической фронт волны, распространяющейся в волноводе, имеет постоянную фазу, а амплитуда напряженности поля убывает по экспоненциальному закону по мере удаления от источника возбуждения. Затухание, вносимое волноводом с воздушным заполнением на единицу длины (погонное затухание), в дБ/м, равно [9]

$$B = \frac{54,6}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda} \right)^2}, \quad (54)$$

где $\lambda > \lambda_{кр}$ и $\lambda_{кр}$ выражается в метрах. Формула (54) справедлива для всех типов волн и разных форм волноводов. Затухание волны в волноводе зависит от отношения $\lambda_{кр} / \lambda$. Предельная волна с длиной больше критической в волноводе распространяется с затуханием, так как фронт плоской волны при $\lambda \geq \lambda_{кр}$ становится под углом к оси волновода, а при очень большой длине волны - практически параллельно ей. Плоская волна при этом совершает колебания между боковыми стенками волновода и вдоль оси волновода, а энергия волны распространяется вдоль волновода, уменьшаясь тем сильнее, чем более параллелен фронт волны его оси. Поскольку длительность распространения волн в волноводе всегда больше, чем в открытом пространстве, путь, который совершает волна

внутри волновода, больше его длины. Следовательно, остается предполагать [9], что волна внутри волновода распространяется, многократно отражаясь от его стенок, а длина ее пути поэтому зависит от расстояния между ними, т. е. от размеров волновода. Очевидно, что если на некоторой частоте волна будет практически только отражаться от стенок волновода, не перемещаясь вдоль него, то эта частота выражает нижний предел частот колебаний, которые не распространяются по данному волноводу. Последнее означает, что часть электромагнитной энергии, прошедшей на выход волновода, не будет превышать допустимых значений.

Таким образом, волновод может работать в качестве фильтра, который эффективно ослабляет колебания на частотах, лежащих ниже известного предела, и в значительно меньшей степени ослабляет колебания на частотах, лежащих выше данного предела. Поэтому минимальное затухание, вносимое волноводом как фильтром, должно рассчитываться по формуле

$$B_{\min} = \frac{54,6}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda_{\min}} \right)^2} \quad (55)$$

Значит, в задачу конструирования волноводного фильтра входит определение оптимальных его размеров исходя из заданного λ_{\min} для обеспечения требуемого затухания на единицу длины волновода. Задаваясь некоторым значением $\lambda_{кр} / \lambda_{\min}$, связывают размеры волновода, определяющие $\lambda_{кр}$, с верхней границей диапазона рабочих частот экрана, т. е. с λ_{\min} . Тогда в этом диапазоне гарантируется затухание не менее B_{\min} , поскольку выбор определенного $\lambda_{кр} / \lambda_{\min} < 1$ обеспечивает сдвиг полосы задерживания, характеризующей волновод как фильтр в пределах спектра его входных колебаний.

В табл.4 приведены формулы для определения затухания на единицу длины для различных типов волн и волноводов при $\lambda_{кр} / \lambda_{\min} \rightarrow 0$ или $\lambda_{кр} / \lambda_{\min} \ll 1$.

Как известно, в волноводе круглого сечения наименьшее затухание имеют волны типа H_{11} , а в волноводе прямоугольного сечения - типа H_{10} . Поэтому расчет волноводных фильтров для экранов ведется исходя из условия обеспечения требуемого затухания

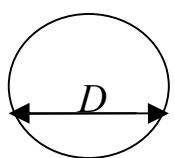
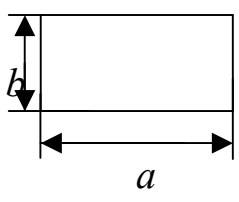
именно для этих типов волн. Тогда для других типов волн, которые могут возбуждаться в волноводе, затухание будет заведомо выше минимально допустимого значения.

В технике экранирования более широкое применение находят волноводные фильтры с прямоугольным сечением как более технологичные в производстве и монтаже. В таких волноводах для волны H_{10} при $\lambda_{кр}=2a$ имеем

$$B_{\min} = \frac{54,6}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{2a}{\lambda_{\min}} \right)^2} \quad (56)$$

Таблица 4

Типы волн и затухание их в различных волноводах

Тип волновода	Волна	$\lambda_{кр}, \text{ м}$	Затухание на единицу длины, дБ/м	Затухание на длине l , дБ
	H_{11}	$1,706D$	$32/D$	$32 l/D$
	E_{01}	$1,307D$	$41/D$	$41 l/D$
	H_{01}	$0,82D$	$67/D$	$67 l/D$
	H_{10}	$2a$	$27,3/a$	$27,3 l/a$
	E_{11}	$\frac{2a}{\sqrt{1+(a/b)^2}}$	$\frac{27,3\sqrt{1+(a/b)^2}}{a}$	$\frac{27,3\sqrt{1+(a/b)^2}}{a} l$

В формуле (56) в качестве единицы длины удобно взять больший размер a , м, поперечного сечения. Тогда можно записать

$$B_{\min} = 27,3 \sqrt{1 - \left(\frac{2a}{\lambda_{\min}} \right)^2} \quad (57)$$

где B_{\min} имеет размерность дБ/(а, м). Это будет затухание волновода на длину, равную его большему размеру поперечного сечения.

График функций $B=B(2a/\lambda_{\min})$ имеет четыре характерных интервала. В интервале $0 < 2a/\lambda_{\min} \leq 0,1$ затухание сохраняется практически на уровне максимально возможного, при этом $a \leq 0,05 \lambda_{\min}$. В интервале $0,1 < 2a/\lambda_{\min} \leq 0,4$ затухание уменьшается по сравнению с максимальной величиной примерно на 1 дБ и при этом $0,05\lambda_{\min} < a \leq 0,2\lambda_{\min}$. При $0,4 < 2a / \lambda_{\min} \leq 0,9$ затухание уменьшается примерно на 15 дБ и $0,2\lambda_{\min} < a \leq 0,45\lambda_{\min}$. И, наконец, в интервале $0,9 < 2a / \lambda_{\min} \leq 0,999$ происходит резкое уменьшение затухания, волновод обеспечивает распространение волны практически без потерь и при этом $0,45\lambda_{\min} < a \leq 0,499\lambda_{\min}$. Следовательно, если исходить из того, что волновод должен обеспечить высокое затухание при сравнительно большом поперечном сечении, то оптимальными можно считать указанные соотношения для границ второго и третьего интервалов. Поэтому принимают, что максимальная величина большего размера поперечного сечения должна быть

$$a_{\max} = 0,2\lambda_{\min} , \quad (58)$$

а волновод может иметь любой другой размер $a \leq a_{\max}$. Уменьшать величину a можно и в любых допустимых пределах. Максимально допустимое значение a_{\max} в длинноволновом диапазоне составляет 200 м. В этом диапазоне обычно не ограничиваются размеры конструкции волновода. Например, вместо экранирования дверного проема в экранированном помещении можно использовать открытый растроб (коридор) с размером a и длиной волновода, необходимыми для обеспечения требуемой эффективности.

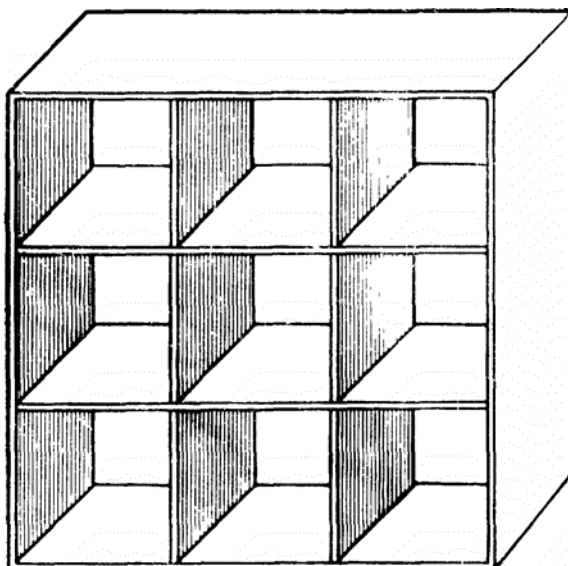


Рис. 34. Волноводный фильтр типа «сотовая решетка»

Строго придерживаться соотношения (58) по различным причинам не всегда представляется возможным. Если это соотношение не выполняется, то потери затухания могут быть скомпенсированы увеличением длины l волновода или другими мерами.

В [9] приведены данные для определения размеров волноводных фильтров, обеспечивающих необходимую эффективность экранирования. Эти данные являются практически реализуемыми, проверенными при проектировании и эксплуатации экранов различного назначения.

Сложнее всего вопрос о выборе величины a в сантиметровом диапазоне, где из-за малого значения λ_{\min} сечение волновода должно быть также малым. Некоторое увеличение сечения волновода получают, принимая $2a / \lambda_{\min} > 0,4$, а уменьшение затухания в волноводе при этом можно компенсировать увеличением его длины.

В зависимости от величины сечения волноводных фильтров, определенных по формуле (58), возникают два типа задач: 1) сечение удовлетворяет параметрам канала, но для получения заданной эффективности длина фильтра l получается большой, что усложняет

конструкцию экрана; 2) сечение мало и не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к каналу.

Для разрешения этих трудностей применяют волноводный фильтр типа сотовой решетки (рис. 34). В этом фильтре общий волновод с большим размером a сечения разбивают на отдельные ячейковые волноводы с большим размером a_i сечения. Таким образом, если волновод образует канал, проходящий сквозь экран, то каждая отдельная ячейка и частичный волновод образуют некоторый частичный канал (субканал) этого общего канала. Очевидно, что для каждого i -го субканала должно быть $a_i < a_{\max}$.

При одинаковых ячейках число их в фильтре типа «сотовая решетка» будет $n = S/S_{\text{я}}$, где S - общая площадь сечения фильтра; $S_{\text{я}}$ - площадь сечения ячейки (соты).

Если, кроме того, сечения общего волновода и ячеек квадратные, то $n = (a/a_{\text{я}})^2$, где $a_i = a_{\text{я}}$ при всех i .

Для первого случая, когда выбор a производится из (58), общая средняя эффективность фильтра типа сотовой решетки возрастает и может быть определена по экспериментально полученной в [9] формуле

$$\mathcal{E} = 27,3 + 20 \lg \sqrt{n}, \quad (59)$$

где 27,3 - эффективность одной ячейки при $a_{\text{я}} = l$, дБ; n - число ячеек в общем волноводе.

Формула (59) дает оценку среднего сечения эффективности при $n > 8 \dots 10$ с погрешностью не более ± 3 дБ. Среднеквадратичное отклонение от среднего значения не превышает 1 дБ. Общая длина волновода

$$l = \frac{\mathcal{E} - 20 \lg \sqrt{n}}{B_{\min}}, \quad (60)$$

где B_{\min} - затухание на 1 м длины ячейки, дБ. Очевидно, что для обеспечения требуемой эффективности эта длина может быть уменьшена из-за появления добавочного затухания $20 \lg \sqrt{n}$.

Иначе обстоит дело в другой задаче, когда сечение общего волновода больше сечения, определенного по (58). В этом случае при сотовой конструкции появляются как бы параллельные пути для распространения электромагнитных колебаний, и общее затухание волновода уменьшается и может быть найдена как

$$\alpha = 27,3 - 20 \lg n . \quad (61)$$

Формула (61) выражает затухание волновода единичной длины ($\alpha=l$). Для компенсации уменьшения затухания общую длину волновода выбирают больше, формула принимает вид

$$l = \frac{\alpha + 20 \lg n}{B_{\min}} . \quad (62)$$

Устройство и монтаж волноводных фильтров. Волновод представляет собой трубу прямоугольного или круглого сечения с проводящими стенками, отделяющими тракт движения волны от внешнего пространства (рис.35, а). При изогнутой форме волновода за его длину принимается длина средней линии. Волновод к экрану прикрепляют сваркой или пайкой по всему периметру канала. Волновод может быть расположен как внутри экрана, так и вне его. Кроме того, волновод может быть поделен экраном в любом отношении в зависимости от общей конструкции системы.

Одной из стенок волновода может служить соответствующая поверхность экрана (рис. 35, б). При этом торцевые концы канала должны быть закрыты, а длиной его считается расстояние между серединами входного и выходного отверстий. При необходимости в одном из отверстий канала устанавливается сотовая решетка (рис. 35, в), которая приваривается к волноводу по всему периметру входного (выходного) отверстия.

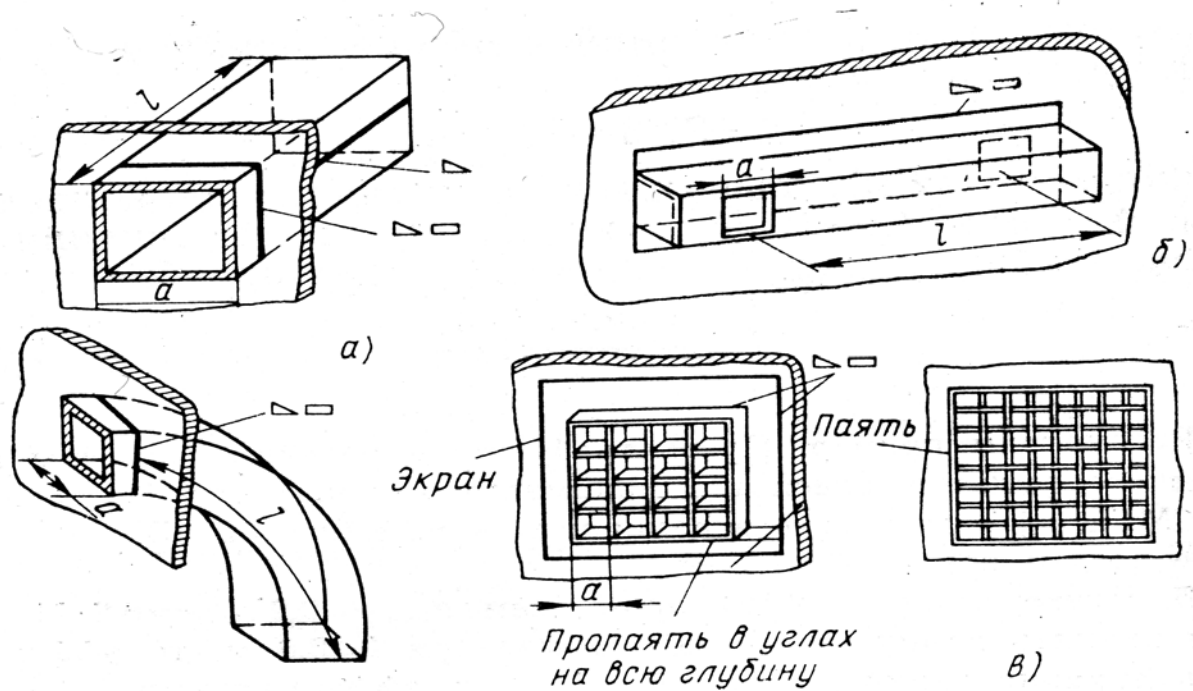


Рис. 35. Установка волноводного фильтра на экране:

а) волновод (прямоугольный или круглый); б) одна из стенок волновода – экран; в) установка сотовой решетки

Варианты конструкции сотовых решеток показаны на рис. 36. Вариант I состоит из стальных листов. В листах, длина которых определяется размерами канала (шириной и длиной волновода), на расстоянии a делают прорезы по толщине материала. Затем собирают решетку, места соединений в каждой ячейке скрепляют сваркой или пайкой.

Вариант II конструкций решетки собирают из отрезков труб длиной l и диаметром $d=a$. Каждая труба приваривается по периметру своего сечения к листу с соответствующим расположением отверстий, вариант III решетки представляет собой конструкцию из уголковой стали.

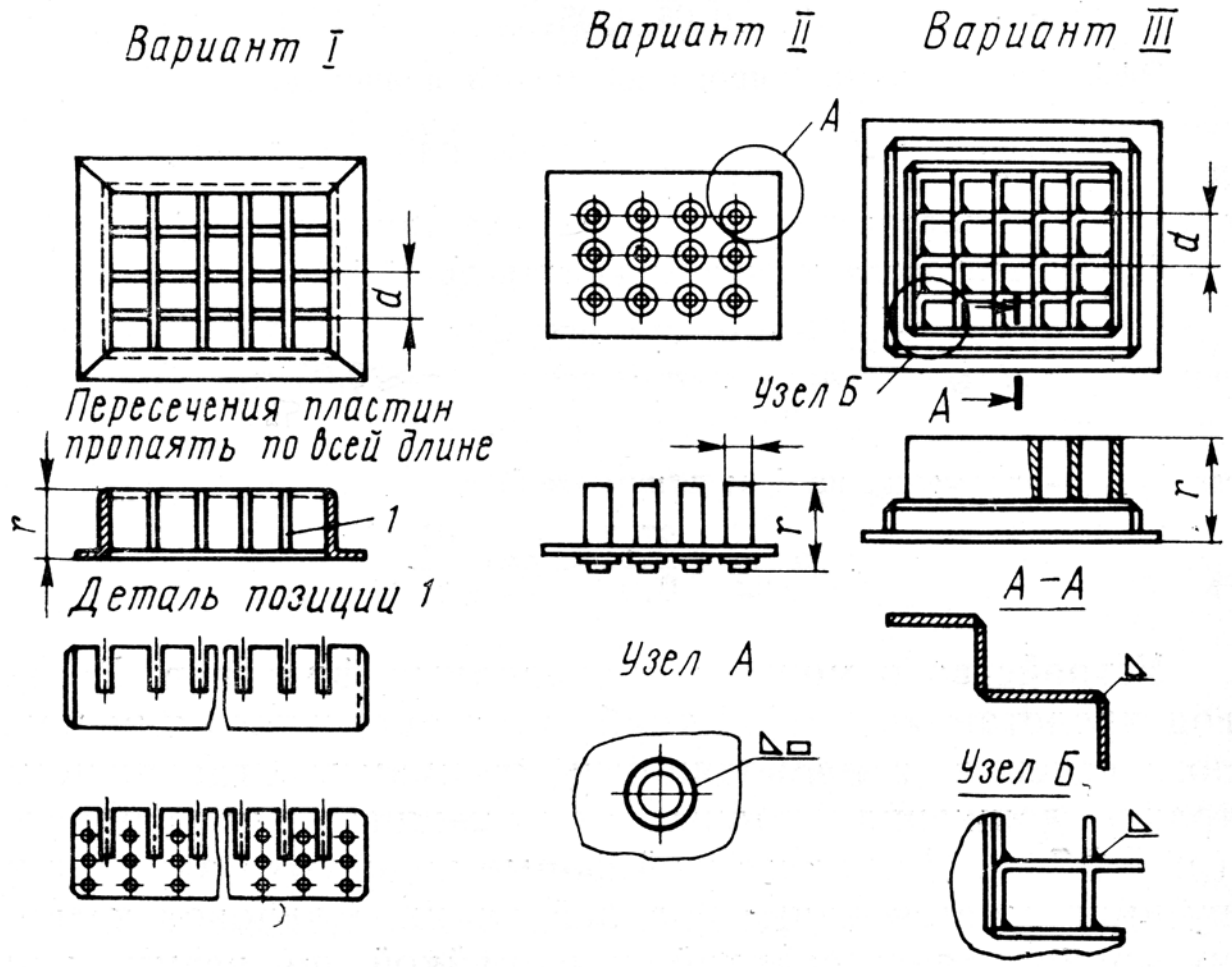


Рис. 36. Варианты установок сотовых решеток

4.8. Экранирование перфорированными материалами

Применяемые в РЭС вентиляционные отверстия типа «жалюзи» представляют собой узкие щели, которые могут пересекать пути токов, наведенных в экране, в результате чего существенно уменьшается эффективность экранирования. Измерения показывают, что обычно жалюзи уменьшают общую эффективность экранирования на 10 дБ и более. Для устранения этого недостатка с внутренней стороны под жалюзи на рамке укрепляют металлическую сетку. Обычно размеры ячейки сетки составляют от 2х2 до 5х5 мм². Однако почти все конструкции подобного типа достаточно сложны и во многих случаях не обеспечивают необходимой мощности вентиляционных потоков. Поэтому эти конструкции, как правило, следует применять лишь в аппаратуре, находящейся на объектах, требующих повышения внутреннего или внешнего экранирования.

В конструкциях РЭС применяют также перфорированные вставки в виде щитков или дисков. Перфорированная вставка изготавливается из более толстого, чем экран, материала и приваривается к экрану с внутренней стороны. Снаружи вставка обрамляется рамкой. Перфорированный щиток совместно с наружной рамкой может укрепляться болтами при условии обеспечения плотного контакта по всему периметру щитка, как это показано на рис. 37. Если требуется мощный обмен воздуха, из перфорированного материала изготавливают крышку и донную часть общего экрана.

Эффективность экранирования перфорированными материалами при условии $\lambda \gg D$ может быть определена по формуле [9]

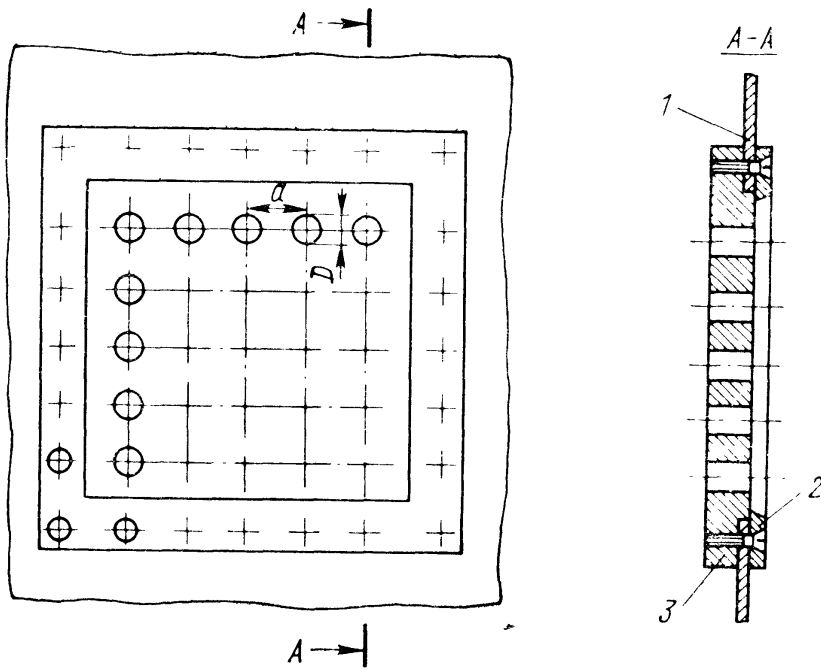


Рис. 37. Эскиз конструкции крепления перфорированной вставки:

1 - экран; 2 - наружная рамка; 3 - перфорированная вставка

$$\mathcal{E}_0 = \left(\frac{3 \lambda_{\min} a^2}{2\pi D^3} \right)^2 \approx \left(0,5 \frac{a^2 \lambda_{\min}}{D^3} \right)^2, \quad (63)$$

где λ_{\min} - минимальная длина волны защищаемого диапазона; a - расстояние между центрами отверстий; D - диаметр отверстия.

Расстояние между центрами отверстий обычно принимают не менее $2D$ и не более $6D$. Максимальное значение диаметра отверстия можно оценить из условия

$$D_{\min} < 4 \sqrt{\lambda_{\min}^2 / \mathcal{E}_0}.$$

Для более длинных волн допустимый размер отверстия перфорации может оказаться значительным, а для экранов малых размеров может существенно снизить общую эффективность экранирования. Поэтому ограничиваются размерами отверстий 2...3 см.

В сантиметровом диапазоне волн из-за малого диаметра отверстий конструкция канала может не удовлетворять техническим требованиям. Поскольку перфорированная вставка представляется как решетка предельных волноводов, то некоторое расширение отверстий можно получить увеличением толщины перфорированного материала.

5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Многообразие и случайный характер факторов, определяющих эффективность экранирования, существенно затрудняет инженерные расчеты экранов. Однако несмотря на сравнительную невысокую точность этих расчетов они, как правило, оказываются необходимыми для проектирования РЭС. Рассмотрим две методики расчета. Первая заключается в следующем.

Исходными данными для расчета являются: конструктивные параметры частоты изделия или его узлов; спектр частот помехи и соответствующие им напряженности электрического и/или магнитного поля; допустимые напряженности электромагнитного поля или его составляющих. Методика, рассмотренная ниже, приведена в [7].

Вначале определяют тип поля помехи. Если излучатель представить в виде электрического диполя, то в ближней зоне существенно преобладает электрическое поле (см. подраздел 4.1), в случае представления излучателя рамкой с током - в ближней зоне преобладает магнитное поле. В первом случае можно говорить об *электростатическом*, а во втором - о *магнитостатическом* полях. Например, высоковольтные элементы и приборы могут быть представлены электрическим диполем, а катушки индуктивности, трансформаторы, печатные проводники – рамкой с током. В дальней зоне излучения мощности электрического и магнитного полей равны. В электронной аппаратуре экранируют как источники, так и приемники помехи.

Во-вторых, выбирают конструктивную форму экрана в зависимости от экранируемого изделия в виде параллелепипеда, цилиндра или сферы. Форма экрана влияет в первую очередь на характеристическое сопротивление среды вблизи него и, как следствие, на ЭЭ. Кроме этого, форма экрана влияет на его резонансные свойства, а именно, на значение резонансной частоты.

Низшая резонансная частота экрана может быть определена по приближенной формуле

$$f_{рез} \cong \frac{138}{R_э} 10^6 .$$

Значение $f_{рез}$ не должно входить в спектр частот помехи.

Чтобы сравнивать экраны различных форм, вводится обобщенный параметр - эквивалентный радиус экрана $R_э$. Для экрана прямоугольной формы с размерами l_1, l_2, l_3

$$R_э = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} l_1 l_2 l_3} ,$$

для цилиндрического экрана диаметром D

$$R_э = \sqrt{\frac{3}{16} D^2 h} ,$$

для сферического экрана $R_э=r_э$.

В третьих, выбираем материал и конструкцию стенок экрана. Материал стенок экрана оказывает наибольшее влияние на эффективность экранирования. величиной, характеризующей экранирующее действие материала экрана, является эквивалентная глубина проникновения δ (см. подраздел 3.4), м

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = 0,52 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} , \quad (64)$$

ρ - удельное сопротивление материала экрана, Ом·м; λ - длина волны в воздухе, м; f - частота, МГц.

Для немагнитных материалов $\mu_r \cong 1$, а для ферромагнитных материалов μ_r зависит от частоты f . Для стали эта зависимость имеет вид $\mu_r \cong 150 - 30f$ при $f < 4$ МГц, где f - частота, МГц.

Если экран работает в магнитном поле ближней зоны, эффективность магнитных материалов значительно выше немагнитных, так как $\mu_r \gg 1$. В электромагнитном поле дальней зоны

немагнитные материалы, обладающие большей проводимостью по сравнению с магнитными, обеспечивают более высокую эффективность. В табл.5 приведены электрические параметры некоторых материалов [7], а в табл.6 - расчетные формулы.

Расчет перфорированных, сеточных экранов и экранов, изготовленных из электрически тонких материалов (в том числе с металлизированными поверхностями) производится аналогично с расчетом, приведенном в [9] и будет рассмотрен ниже.

Расчет помех в линиях связи можно посмотреть в учебниках [6,10] или в другой литературе, например в [7].

Рассмотрим еще один подход к решению задачи расчета ЭЭ [9]. Поскольку основной характеристикой экрана является его эффективность, методика инженерного расчета должна исходить из зависимостей этой характеристики от длины волны λ , модуля волнового сопротивления диэлектрика Z относительно вида волны, материала экрана, от параметров, которые определяют геометрические размеры экрана и качество конструкции. Получить такие зависимости только теоретически весьма сложно. Поэтому обычно прибегают к обработке, обобщению экспериментальных данных и построению на этой основе формул для расчета эффективности экранирования в широком диапазоне частот. Необходимо, чтобы формулы были просты и давали необходимую точность совпадения расчетных и экспериментальных результатов. В формулах должны быть учтены особенности материалов и конструкции экранов, основные физические процессы и особенности экранирования составляющих электромагнитного поля.

Наиболее удобным как для построения самой расчетной формулы, так и для ее использования является выражение эффективности экранирования произведением ряда сомножителей, каждый из которых определяет влияние одного из факторов или одной группы близких факторов.

В результате анализа многих конструкций экранов различного назначения в [9] получено выражение для средней эффективности экранирования

Таблица 5

**Электрические параметры материалов,
применяемых для экранирования**

Материал	Удельная проводимость, $Cм/м \cdot 10^{-7}$	Относительная магнитная проницаемость μr	Материал	Удельная проводимость, $Cм/м \cdot 10^{-7}$	Относительная магнитная проницаемость μr
Алюминий	3,54	1	Железо	1,0	1100...22000
Латунь	1,25	1	Никель	1,38	12...80
Медь	5,8	1	Сталь	0,66	150
Серебро	6,2	1	Пермаллой	0,42	80...8000

Таблица 6

Формулы для расчета ЭЭ (или требуемой толщины) экрана

Вид экрана	Расчетная формула (\mathcal{E} , d)
Магнитостатический экран	
цилиндрический	$\mathcal{E}_H = 20 \lg \left[1 + 0,25(1 - r_1^2 / r_2^2)(\mu_r + 1 / \mu_r - 2) \right] ;$ при $\mu_r > 1$; $d = r_2 \left[1 - \sqrt{1 - 4(10^{\mathcal{E}_H / 20} - 1) / (\mu_r + 1 / \mu_r - 2)} \right]$ для заданных $\mathcal{E}_H, \mu_r, r_2$; r_1, r_2 - внутренний и внешний диаметры экрана
прямоугольный	$\mathcal{E}_H = 20 \lg \left[1 + (1 - a_1^2 / a_2^2)(\mu_r + 1 / \mu_r - 1) \right] ;$ $d = 0,5 a_2 \left[1 - \sqrt{1 - (10^{\mathcal{E}_H / 20} - 1)(\mu_r + 1 / \mu_r - 2)} \right] ;$ a_1, a_2 - внутренний и внешний размеры экрана
сферический	$\mathcal{E}_H = 20 \lg \left[1 + 0,22 \left(1 - \frac{(r_3 - d)^3}{r_3^3} \right) (\mu_r + 1 / \mu_r - 2) \right] ;$ $d = r_3 \left[1 - \sqrt[3]{1 - 4,5(10^{\mathcal{E}_H / 20} - 1) / (\mu_r + 1 / \mu_r + 2)} \right]$
Электростатический экран	
плоский листовой	$\mathcal{E}_E \cong 20 \lg \left[5 R_3^3 / (a^2 a_1 - a a_1^2) \right] ; R_3 \cong \sqrt{S_3 / \pi} ;$ S_3 - площадь поверхности экрана; a - расстояние между источником и приемником помехи; a_1 - расстояние от экрана до приемника помехи;
Вид экрана	Расчетная формула (\mathcal{E} , d)
замкнутой формы	$\mathcal{E}_E = 20 \lg(60 \pi d / \rho) ;$ $d_{\min} = 10^{\mathcal{E}_E / 20} / (60 \pi / \rho)$
Электромагнитный экран в дальней зоне излучения	
сплошной	$\mathcal{E}_E = 20 \lg \operatorname{ch}(kd) + 20 \lg 1 + 0,5(Z_B / Z_3 + Z_3 / Z_B) \operatorname{th}(kd) ;$ Z_B - характеристическое сопротивление окружающего пространства (для плоской волны $Z_B = 120 \pi$ Ом); Z_3 - характеристическое сопротивление металла, из которого сделан экран $Z_3 = \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \rho} e^{j\pi/4}$, k - коэффициент вихревых токов $k = \sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 / \rho} e^{j\pi/4}$

Электромагнитный экран в ближней зоне излучения	
цилиндрический	расчет по <i>предыдущей формуле</i> , но для электрической составляющей поля $Z_B = -j(2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 r_\Omega)^{-1}$, а для магнитной составляющей $Z_B = -j2\pi f \mu_r \mu_0 r_\Omega$, где r_Ω – радиус цилиндрического экрана
сферический	$Z_{BE} = -j18 \cdot 10^9 / (f r_\Omega / \sqrt{2})$; $Z_{BH} = j79 \cdot 10^{-7} f r_\Omega / \sqrt{2}$, где r_Ω – радиус сферы
прямоугольный (экран-коробка)	$Z_{BE} = -j36 \cdot 10^9 / f r_\Omega$; $Z_{BH} = j158 \cdot 10^{-7} f r_\Omega$, где r_Ω – половина расстояния между стенками экрана, обращенными к источнику помехи. Остальные параметры рассчитываются так же, как для экранирования в дальней зоне. В области низких частот (до 10^4 Гц) для экранирования электрического поля $ Z_{BH} / Z_E \gg Z_\Omega / Z_{BE} $, тогда $\mathcal{E}_E = 20 \lg 1 + 0,5 Z_{BE} d / \rho $; а для экранирования магнитного поля из магнитных металлов и сплавов $\mathcal{E}_H = 20 \lg 1 + \mu_r d / (2r_\Omega) $, а из немагнитных материалов $\mathcal{E}_H = 20 \lg 1 + k^2 r_\Omega d / 2 $

$$\mathcal{E}_{0E(H)} = 0,024 \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_\Omega}} e^{\frac{2\pi d}{m}} \times \left(\frac{a-m}{m}\right)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (65)$$

где δ - глубина проникновения, м; ρ - удельное сопротивление материала экрана, Ом·м; $Z_{E(H)}$ - волновое сопротивление электрического (магнитного) поля; R_Ω - эквивалентный радиус экрана, м; a - расстояние между центрами отверстий и щелей в экране, возникших из-за несовершенства его конструкции и технологии изготовления, м; m - наибольший размер отверстия (щели) в экране, м; d - толщина материала экрана, м. Очевидно, что $m > 0$, a и m являются случайными величинами.

Анализ показал, что среднее значение сомножителя $\left(\frac{m}{a-m}\right)^2$ для обычного технологического процесса и высокого качества монтажа близко к 0,024. Поэтому выражение (65) можно представить в виде

$$\mathcal{E}_{0E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_{E(H)}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{\varepsilon}}} e^{\frac{2\pi d}{m}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6. \quad (66)$$

Эта формула является наиболее общей и полностью характеризует процесс электромагнитного экранирования реальных экранов. Следует обратить внимание на то, что в ней отсутствует множитель $e^{d/\delta}$, который обычно входит в формулы для эффективности экранирования абсолютно электрически герметичного экрана. Этот множитель характеризует затухание поля в толще экрана, когда нет других путей распространения электромагнитной энергии и по своей величине намного больше остальных сомножителей. Щели и отверстия в экране образуют дополнительные пути излучения энергии, в результате чего его эффективность уменьшается. Поскольку влияние этих дополнительных путей является преобладающим в выражениях (65) и (66), эффективность экрана характеризуется множителем $\exp(2\pi d / m)$, в котором однозначно выражена роль толщины материала и размера щелей.

Основным фактором экранирования в реальных конструкциях РЭС является отражение электромагнитной волны от поверхности экрана из-за различия его поверхностного сопротивления и волнового сопротивления поля, определяемого множителем $\sqrt{(\delta/\rho)Z_{E(H)}}$.

Формула (66) применима для широкого диапазона длин волн, пока $\lambda > m\pi$. При $\lambda \rightarrow m\pi$ множитель $(1 - \pi m / \lambda)^6$ резко уменьшается и эффективность экранирования становится незначительной. Этот множитель определяет эффективность экрана, обусловленную его герметичностью.

Для перфорированных материалов, когда размер a и диаметр отверстия являются параметрами перфорации, выражение (66) записывается следующим образом

$$\mathcal{E}_{0E(H)} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E(H) \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{\mathcal{E}}}} \left(\frac{a-D}{a}\right)^2 \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 \exp\left(\frac{2\pi d}{m}\right). \quad (67)$$

Формула (67) применима при $a > D$ и существовании щелей в экране с $m < \lambda / \pi$, не связанных с размером отверстия перфорации.

Множитель $\left(\frac{a-D}{a}\right)^2$ в зависимости от соотношения между a и D может изменяться в пределах от 1 до 0, но практически он всегда меньше единицы и больше нуля. Если параметры перфорации таковы, что

диаметр отверстия D больше размера случайной щели, то $e^{\frac{2\pi d}{m}}$ и $(1 - \pi m/\lambda)^6$ вместо m подставляется D , т. е. эти множители записываются как $\exp(2\pi d/m)$ и $(1 - \pi D/\lambda)^6$. В случае $a \gg D$ выражения (66) и (67) идентичны.

Для экранов, изготовленных из сетчатых материалов, за толщину экрана принимают эквивалентную толщину сетки $d_{\mathcal{E}} = \pi r_s^2 / S$. Формула для расчета эффективности таких экранов принимает вид

$$\mathcal{E}_{0c} = \sqrt{\frac{d_{\mathcal{E}}}{\rho}} Z_E \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{\mathcal{E}}}} e^{\frac{\pi d_s}{S - d_s}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (68)$$

где $d_{\mathcal{E}}$ - эквивалентная толщина сетки, м; d_s - диаметр, а r_s - радиус провода сетки мм; S - шаг сетки, мм.

Эффективность экранов, изготовленных из электрически тонких материалов, в том числе с металлизированными поверхностями, определяется выражением

$$\mathcal{E}_0 = 1,25 \pi \sqrt{\frac{d}{\rho}} Z_E \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{\mathcal{E}}}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6. \quad (69)$$

За толщину экрана с металлизированными поверхностями принимают толщину нанесенного слоя металла $d = P_{pm} / \gamma$, где P_{pm} - расход металла, кг/м²; γ - плотность исходного материала, кг/м³.

Наконец, эффективность экранирования токопроводящей краской вычисляется по формуле

$$\mathcal{E}_0 = 1,25 \pi \sqrt{\frac{Z_E}{R_{кв}}} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_\mathcal{E}}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6, \quad (70)$$

где $R_{кв}$ - сопротивление на квадрат площади поверхности экрана, Ом.

Покажем на примерах последовательность расчетов. Пусть требуется оценить эффективность экранирования экранов одинакового размера 2,0x1,5x1,0 м³, изготовленных из различных материалов, в диапазоне длин волн $3 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^{-1}$ м.

Экран 1 - листовая сталь толщиной 1,5 мм. Листы прикреплены к металлическому каркасу болтами с шагом крепления 100 мм. При таком креплении обшивки, как показывает практика, могут быть щели размером не более 10 мм. Удельное сопротивление стали $\rho = 10^{-7}$ Ом·м, $\mu_r = 180$. Определим эффективность экранирования при длине волны $\lambda = 3 \cdot 10^3$ м.

Определим эквивалентный радиус экрана по формуле (29)

$$R_\mathcal{E} = 0,62 \sqrt[3]{b l h} = 0,62 \sqrt[3]{2 \cdot 1,5 \cdot 1} = 0,894 \text{ м}.$$

Волновое сопротивление электрического и магнитного полей вычисляют по формулам (45) или с помощью графика рис. 28. При $2\pi R_\mathcal{E} / \lambda = 2 \cdot \pi \cdot 0,894 / 3 \cdot 10^3 \ll 1$ волновое сопротивление электрического поля

$$Z_E \approx \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_\mathcal{E}} = \frac{377 \cdot 3 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 0,894} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}.$$

Аналогично находим волновое сопротивление магнитного поля:

$$Z_H \approx Z_0 \frac{2\pi R_\mathcal{E}}{\lambda} = \frac{377 \cdot 2\pi \cdot 0,894}{3 \cdot 10^3} \approx 0,7 \text{ Ом}.$$

Глубина проникновения по (8) составляет

$$\delta = 0,03 \sqrt{\frac{\lambda \rho}{\mu_r}} = 0,03 \sqrt{\frac{3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-7}}{180}} = 3,87 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Находим значения множителей выражения (66):

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E = \sqrt{\frac{3,87 \cdot 10^{-5}}{10^{-7}}} \cdot 2 \cdot 10^5 = 0,88 \cdot 10^4; \quad \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_э}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 10^3}{0,894}} = 14,97;$$

$$e^{2\pi d/m} = e^{6,28 \cdot 1,5/10} = 2,57;$$

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_H = \sqrt{\frac{3,87 \cdot 10^{-5}}{10^{-7}}} \cdot 0,7 = 16,46; \quad \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = \left(1 - \frac{\pi \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^3}\right)^6 \approx 1.$$

Эффективность экранирования электрического поля

$$\mathcal{E}_{0E} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_э}} e^{\frac{2\pi d}{m}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = 0,88 \cdot 10^4 \cdot 14,97 \cdot 2,57 = 3,39 \cdot 10^5$$

или $110,6 \approx 111$ дБ.

Соответственно для магнитного поля получим

$$\mathcal{E}_{0H} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_H \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_э}} e^{\frac{2\pi d}{m}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = 16,46 \cdot 14,97 \cdot 2,57 = 633,3$$

или $56,03 \approx 56$ дБ

Аналогично вычисляется эффективность экранирования для других точек рабочего диапазона длин волн. Результаты вычислений и измерений для экрана 1 приведены в табл.5.

Экран 2 - алюминиевые листы толщиной 1,5 мм. Конструкция такая же, как у экрана 1. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Вычислим эффективность экранирования при $\lambda = 3 \cdot 10^2$ м.

Волновое сопротивление электрического поля

$$Z_E = \frac{Z_0 \lambda}{2\pi R_э} = \frac{377 \cdot 3 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 0,894} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ Ом,}$$

магнитного поля

$$Z_H = \frac{2\pi R_9}{\lambda} Z_0 = \frac{2\pi \cdot 0,894}{3 \cdot 10^2} 377 \cong 7 \text{ Ом.}$$

Глубина проникновения

$$\delta = 0,03 \sqrt{\rho \lambda} = 0,03 \sqrt{2,8 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^2} = 8,7 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Значения множителей:

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E = \sqrt{\frac{8,7 \cdot 10^{-5}}{2,8 \cdot 10^{-8}}} 2 \cdot 10^4 = 0,79 \cdot 10^4 ;$$

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_H = \sqrt{\frac{8,7 \cdot 10^{-5}}{2,8 \cdot 10^{-8}}} \cdot 7 = 1,47 \cdot 10^2 ;$$

$$\sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_9}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 10^2}{0,894}} = 6,94 ; \quad e^{\frac{2\pi d}{m}} = e^{2\pi \cdot 1,5/10} \approx 2,6 .$$

**Эффективность экранирования экранов, изготовленных
из различных материалов, дБ**

$\lambda, \text{ м}$	Экран 1			Экран 2			Экран 3		Экран 4		Экран 5	
	\mathcal{E}_H	\mathcal{E}_E	$\mathcal{E}_{\text{ЕиЗМ}}$	\mathcal{E}_H	\mathcal{E}_E	$\mathcal{E}_{\text{ЕиЗМ}}$	\mathcal{E}_E	$\mathcal{E}_{\text{ЕиЗМ}}$	\mathcal{E}_E	$\mathcal{E}_{\text{ЕиЗМ}}$	\mathcal{E}_E	$\mathcal{E}_{\text{ЕиЗМ}}$
$3 \cdot 10^3$	56	111	-	70	125	-	110	-	107	-	120	-
$3 \cdot 10^2$	56	88	89	68	103	100	101	-	91	94	106	106
$3 \cdot 10^1$	54	68	67	65	88	86	84	86	74	73	90	93
$3 \cdot 10^0$	49	48	46	60	60	60	67	65	59	58	76	81
$3 \cdot 10^{-1}$	33	33	31	39	39	39	58	56	50	48	70	72

Эффективность экранирования электрической составляющей поля

$$\mathcal{E}_{0E} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_\varepsilon}} e^{\frac{2\pi d}{m}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = 0,79 \cdot 10^4 \cdot 6,94 \cdot 2,6 = 1,43 \cdot 10^5$$

или 103 дБ.

Эффективность экранирования магнитной составляющей поля

$$\mathcal{E}_{0H} = \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_H \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_\varepsilon}} e^{\frac{2\pi d}{m}} \left(1 - \frac{\pi m}{\lambda}\right)^6 = 1,47 \cdot 10^2 \cdot 6,94 \cdot 2,6 = 2,65 \cdot 10^3$$

или $\cong 68$ дБ.

Эффективность экранирования для других точек рабочего диапазона длин волн, вычисленная аналогично, и данные измерений приведены в табл.5. Из данных таблицы видно, что результаты вычислений и измерений практически совпадают. С уменьшением длины волны, начиная с $\lambda = \pi R_\varepsilon \approx 3$ м, эффективности экранирования составляющих поля становятся равными, что указывает на установление при этих условиях электромагнитного процесса в экране. Сравнительно быстрое падение эффективности по мере уменьшения λ объясняется более интенсивным влиянием щелей.

Экран 3 изготовлен из латунной сетки с шагом $s=0,25$ мм,

$r_s = 0,045$ мм. Сетка натянута на деревянный каркас. Полотна сетки пропаяны по всей длине. Щели длиной не более 6...7 мм могут иметь место в контактной системе дверного проема и в местах соединения полотен. Определим эффективность при $\lambda = 30$ м, $\rho = 7,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Эквивалентная толщина материала экрана будет

$$d_{\text{э}} = \frac{\pi r_s^2}{s} = \frac{\pi (0,045 \cdot 10^{-3})^2}{0,25 \cdot 10^{-3}} \approx 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Волновое сопротивление электрической составляющей находим по графику рис. 28. Для $2\pi R_{\text{э}}/\lambda = 2\pi \cdot 0,9/30 = 0,19$, получим $Z_E / Z_0 = 5$, откуда $Z_E = 377 \cdot 5 = 1885$ Ом.

Значения множителей выражения (69) таковы:

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_E} = \sqrt{\frac{25 \cdot 10^{-6}}{7,5 \cdot 10^{-8}} 1,89 \cdot 10^3} = 0,79 \cdot 10^2;$$

$$\sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{\text{э}}}} = \sqrt[3]{\frac{30}{0,894}} = 3,2 \quad ;$$

$$\exp(\pi d_s / (s - d_s)) = \exp(\pi \cdot 0,09 / (0,25 - 0,09)) \approx 5,8.$$

Эффективность экранирования составит $\mathcal{E}_{0E} = 0,79 \cdot 10^2 \cdot 3,2 \cdot 5,8 \approx 1,5 \cdot 10^4$ или 84 дБ.

Результаты вычислений и измерений для других точек рабочего диапазона волн приведены в табл.5.

Экран 4 идентичен экрану 3. Параметры сетки: сталь, шаг $s = 1$ мм, радиус проволок $r_s = 0,125$ мм (см. табл.5).

Экран 5. Несущей основой является деревянная фанерная камера, внутренняя поверхность которой покрыта алюминиевой фольгой толщиной 0,08 мм. Листы фольги склеены силикатным клеем с перекрытием 50 мм. Клей нанесен только на полосу шириной 15 мм перекрытия. Предполагаем, что на оставшихся 35 мм ширины перекрытия создается надежный электрический контакт. Реально на многих участках электрический контакт будет отсутствовать, однако сквозных щелей не будет.

Данные расчета по формуле (69) и результаты измерений приведены в табл.5.

Экран 6. Несущая основа - фанерная камера, внутренняя поверхность которой покрыта токопроводящей краской с поверхностным сопротивлением $R_{кв}=6$ Ом.

Расчет эффективности экранирования ведется по формуле (70). Вычисления показывают, что на частоте $f=0,15$ МГц эффективность равна 77 дБ, а на частоте $f=1000$ МГц $\mathcal{E}_E=32$ дБ, что практически совпадает с данными измерений.

Экран 7 выполнен из листового алюминия толщиной 1,5 мм. Задняя верхняя и нижняя стенки перфорированы, $a=15$ мм, $D=10$ мм. Крепление листов обшивки выполнено так же, как в экране 1. Большой размер щели равен диаметру перфорации.

Определим эффективность экранирования на волне $\lambda=3,0$ м. Волновые сопротивления составляющих поля определим по графику рис. 28. Для $2\pi R_{э}/\lambda=1,9$ имеем $Z_E=300$ Ом и $Z_H=350$ Ом.

Значения множителей выражения (67):

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_E} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-6}}{2,8 \cdot 10^{-8}} 3 \cdot 10^2} = 3 \cdot 10^2;$$

$$\sqrt{\frac{\delta}{\rho} Z_H} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-6}}{2,8 \cdot 10^{-8}} 350} = 3,3 \cdot 10^2;$$

$$\exp\left(\frac{2\pi d}{D}\right) = \exp\left(\frac{2\pi \cdot 1,5}{10}\right) = 2,6; \quad \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_{э}}} = \sqrt[3]{\frac{3}{0,894}} = 1,5;$$

$$\left(\frac{a-D}{a}\right)^2 = \left(\frac{15-10}{15}\right)^2 = \frac{1}{9};$$

$$\left(1 - \frac{\pi D}{\lambda}\right)^6 = \left(1 - \frac{\pi \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{3}\right)^6 \approx 0,86.$$

Эффективность экранирования соответственно будет

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{0E} &= \sqrt{\frac{\delta}{\rho}} Z_E \sqrt[3]{\frac{\lambda}{R_\varepsilon}} e^{2\pi d/D} \left(\frac{a-D}{a}\right)^2 \left(1 - \frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 = \\ &= 3 \cdot 10^2 \cdot 1,5 \cdot \frac{1}{9} \cdot 2,6 \cdot 0,86 = 1,1 \cdot 10^2 \end{aligned}$$

или 41 дБ;

$$\mathcal{E}_{0H} = 3,3 \cdot 10^2 \cdot 1,5 \cdot 1/9 \cdot 2,6 \cdot 0,86 \approx 1,2 \cdot 10^2 \text{ или } 41 \text{ дБ.}$$

Сопоставление результатов расчетов с данными измерений и анализ множителей, входящих в выражения (65)...(70), позволяют сделать следующие выводы.

1. Полученные в результате экспериментов формулы обеспечивают достаточную для практики точность расчета эффективности экранов различных конструкций.

2. Из-за невозможности при современной технологии монтажа обеспечить высокую электрическую герметичность экранов эффективность их остается сравнительно низкой на высоких частотах. Нецелесообразно использовать в экранах дорогостоящие высокоэффективные материалы, так как их экранирующие свойства используются лишь частично.

3. По мере возрастания нарушений герметичности эффективность экранов, изготовленных из материалов с высокими и низкими экранирующими свойствами, становятся одинаковыми. Это явление особенно характерно для области высоких частот.

4. При нарушениях электрической герметичности существенную роль играет толщина материала, с увеличением которой можно частично компенсировать уменьшение эффективности экранирования.

Таблица 8

Эффективность экранирования устройств замкнутых

экранов, дБ

Материал, экранируемое устройство и конструкция экрана	Диапазон частот, МГц				
	0,15...3	3...30	30...300	300...3000	300...10000
Сталь листовая:					
сварка непрерывным швом	100	100	100	100	100
сварка точечная, шаг 50 мм	70	50	—	—	—
листы, скрепленные болтами, шаг 50 мм	75	60	—	—	—
Жесть (фальцем):					
непрерывная пайка	100	100	100	100	100
точечная пайка, шаг 50 мм	100	80	60	50	40
без пайки	100	100	60	50	40
Сетка металлическая:					
пайка, ячейка 1...1,5 мм	80	60	50	40	25
Фольга:					
склейка внахлест (шов перекрыт)	100	80	80	70	60
Токопроводящая краска ($R_{кв}=6$ Ом)	70	40	30	40	40
Металлизация:					
расход металла 0,3 кг/м ²	100	80	60	50	40
Экранирование смотровых и оконных проемов:					
штора или створка из металлической сетки с ячейкой 1...1,5 мм	70	60	60	40	40

Окончание
табл. 8

Материал, экранируемое устройство и конструкция экрана	Диапазон частот, МГц				
	0,15...3	3...30	30...300	300...3000	300...10000
приваренный стальной или припаянный жестяной лист	100	100	80	80	70
сотовая решетка	100	100	100	—	—
металлическая сетка с ячейкой до 2 мм	70	60	40	20	—
стекло с токопроводящей поверхностью	70	30	—	30	30
Экранирование каналов:					
открытый предельный волновод	100	100	100	100	100
сотовая решетка	100	100	100	100	100
металлическая сетка с ячейкой 5 мм	70	60	30	—	—
перфорированная вставка	70	60	40	—	—
Экранирование вводов коммуникаций:					
металлические трубы, приваренные к экрану по всему периметру	100	100	100	100	100
металлические трубы, проложенные в волноводных патрубках	100	100	100	100	100
фильтры с соответствующей эффективностью	100	100	100	100	100

Примечание. Приведенные числовые данные относятся к верхней границе поддиапазона и к моменту изготовления экранов.

Опыт проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации устройств и систем экранирования показывает, что в среднем эффективность экранирования аппаратуры может быть достигнута на уровне данных, приведенных в табл. 6. Эти данные относятся к верхнему пределу частоты поддиапазона. Общая эффективность определяется самым низким значением эффективности одного из узлов экрана. Отсутствие в табл. 6 цифровых значений для отдельных устройств означает, что рассматриваемый вариант не рекомендуется или является нереализуемым.

Данные табл. 6 упрощают выбор основных узлов экрана и конструирование его в целом, так как сокращают объем вычислений.

6. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами: Пер. с англ./Дж.Барнс. – М.: Мир, 1990.
2. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре /М.Л.Волин. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Радио и связь,1981.
3. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости/ А.Д.Князев, Л.Н.Кечиев, Б.В.Петров. – М.: Радио и связь, 1989.
4. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств/А.Д.Князев. – М.: Радио и связь, 1984.
5. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: Учебник для вузов/ А.М.Чернушенко, Б.В.Петров, Л.Г.Малорацкий и др.; Под ред. А.М.Чернушенко. – М.: Радио и связь,1990.
6. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учебник для радиотехн. спец. вузов/ А.П.Ненашев. - М.: Высш. школа, 1990.
7. Парфенов Е.М. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е.М.Парфенов, Э.Н.Камышная, В.П.Усачев. - М.: Радио и связь, 1989.
8. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник/ Е.В.Пирогова. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005.
9. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры/Н.Б.Полонский. – М.: Сов. радио, 1979.
10. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980.
11. Ястребов А.П. Проектирование и производство РЭС: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Проектирование и технология РЭС» и « Проектирование и

технология электронно-вычислительных средств»/А.П.Ястребов. –
СПб.: СПб ГУАП, 1998.

7. ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

7. ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Ближняя зона -	70	Материалы для экранов: -	87
		магнитные -	88
Ведущий рабочий документ проектирования экранов -	86	металлизация поверхностей -	94
Волновая поверхность -	88	металлические -	89
		немагнитные -	88
		проводящие пластмассы -	103
		радиопоглощающие материалы	
Дальняя зона -	71	(РПМ) -	99
Диффузное поле -	60	сеточные -	91
		специальные ткани -	99
Задача управления ресурсом радиоканалом -	97	стекла с токопроводящим покрытием -	99
		токопроводящие краски -	93
Контактные устройства		фольговые -	92
электромагнитных экранов:103		электропроводный клей	
с электрическим контактом -	104	(ЭПК) -	102
неразъемные -	105		
разъемные -	106	Низшая резонансная частота	
скользящие -	107	экрана -	142
открывающихся частей			
экрана -	107	Паразитная наводка -	25
Коэффициент:		Паразитная связь -	25
экранирования -	81	Помехозащищенность -	18
ослабления мешающего		Помехоустойчивость -	18
действия помехи -	23	Поверхностное переходное	
реакции экрана -	81	емкостное сопротивление	
Критерий ЭМС -	23	контакта -	126

		Принцип предельных волнопроводов -	131
Радиочастотный ресурс (РЧР) -	11	Экранирование: электрического поля -	27
Сетки:		электромагнитное (вытеснение магнитного поля экраном) -	91
густые -	34	электростатическое -	91
редкие -	142	Электрически тонкие материалы -	92
Тракт переноса помех -	69	Электромагнитная обстановка (ЭМО): -	
Физический смысл			
13,19		внешняя -	19
экранирующего эффекта -	29	внутренняя -	19
Эквивалентная высота устройства -	81	Электромагнитная совместимость радиоэлектронного средства -	6
Эквивалентная глубина проникновения -		Эффективность экранирования -	27
Эквивалентный радиус -	57,143	Явление поверхностного эффекта («скин-эффект») -	34
Экран -	26		
Экранирование: -	25		
блочное -	82		
внешнего электромагнитного поля -	80		
магнитостатическое (шунтирование магнитного поля экраном) -	33, 142		
общее -	82		
отверстий -	131		
поэлементное -	82		
с внутренним возбуждением -	80		

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА.....	6
2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА	19
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ.....	25
3.1. Основные определения и физические представления.....	25
3.2. Принципы экранирования электрического поля.....	27
3.3. Принципы экранирования постоянного и медленно изменяющегося магнитного поля	33
3.4. Принципы экранирования высокочастотного магнитного поля.....	34
3.5. Одновременное экранирование электрического и магнитного полей.....	39
3.6. Конструкция крышек экранов.....	43
3.7. Экранирование электромагнитного поля излучения.....	45
3.8. Экранирование проводов. Кабели.....	51
3.9. Экран как объемный резонатор.....	56
4. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ.....	69
4.1. Тракт переноса помех.....	69
4.2. Назначение и основные характеристики экранов.....	79
4.3. Особенности конструирования электромагнитных экранов.....	82
4.4. Материалы для экранов.....	87
4.4.1. Металлические материалы.....	88
4.4.2. Сеточные материалы.....	91
4.4.3. Фольговые материалы.....	92
4.4.4. Токопроводящие краски.....	93
4.4.5. Металлизация поверхностей.....	94
4.4.6. Стекла с токопроводящим покрытием.....	97
4.4.7. Специальные ткани.....	99
4.4.8. Радиопоглощающие материалы (РПМ).....	99

4.4.9. Электропроводный клей (ЭПК).....	102
4.4.10. Проводящие пластмассы.....	103
4.5. Контактные устройства электромагнитных экранов. Контактные соединения и эффективность экранирования.....	103
4.6. Виды соединений листов обшивки экранов.....	122
4.7. Экранирование отверстий.....	131
4.8. Экранирование перфорированными материалами.....	139
5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ.....	142
6. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	159
7. ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	160

ВИННИКОВ ВЛАДИМИР ВИТАЛЬЕВИЧ

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭКРАНОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы: М.Ю. Комарова, И.И. Садчикова

Сводный темплан 2006 г.

ЛР № 020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение

№ 78.01.07.953.П.005641.11.03 от 21.11.2003 г.

Подписано в печать 2006. Формат 60×84 1/1
Б.кн. – журн. П.л. 10,25 Бл. 5,25 РТП Изд-во СЗТУ

Тираж

Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
Издательство СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации
университетов России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д.5