

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

*На правах рукописи*

**Демский Дмитрий Викторович**

**Метод расчёта эффективности экранирования для  
неоднородных электромагнитных экранов**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Кечиев Леонид Николаевич

Москва, 2014

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Экранирование, как средство обеспечения электромагнитной совместимости .....	10
1.1. Проблемы электромагнитной совместимости .....	10
1.2. Аналитические методы расчёта электромагнитных экранов .....	16
1.3. Численные методы расчёта экранов .....	23
1.4. Постановка задачи .....	29
Глава 2. Метод расчёта неоднородного электромагнитного экрана ..	34
2.1. Анализ аналитических методов расчёта.....	34
2.2. Неоднородности в экране.....	36
2.3. Коэффициентный метод расчёта экрана .....	38
2.4. Алгоритмы расчёта неоднородного электромагнитного экрана .....	47
2.5. Выводы.....	55
Глава 3. Разработка алгоритма расчёта экрана и его визуализация ..	56
3.1. Конструкторское проектирование экранов.....	56
3.2. Программный комплекс оценки эффективности экранирования при конструкторском проектировании экранов.....	59
3.3. Резонансная зона электромагнитного экрана с апертурами .....	63
3.4. Выбор и обоснование языка программирования.....	66
3.5. Выводы.....	68
Глава 4. Методика применения разработанного программного обеспечения по расчёту неоднородных электромагнитных экранов .....	70

4.1. Руководство пользователя .....	70
4.2. Проверка адекватности расчёта эффективности экранирования .....	73
4.3. Развитие метода расчёта экрана с использованием «облачных технологий».....	87
4.4. Выводы.....	100
Заключение .....	101
Список литературы .....	103

## Введение

При повышении быстродействия РЭС, возникают проблемы, обусловленные искажением сигналов в линиях связи. Основными причинами искажения сигналов в линиях связи являются электромагнитные излучения. При взаимодействии переменного электромагнитного поля с цепями электронного средства, имеющими вполне конкретную физическую реализацию, в этих цепях наводятся токи и напряжения соответствующих интенсивностей. При превышении наведёнными токами и напряжениями определённых пороговых уровней в рецепторе (в непреднамеренно созданных антеннах – самые разнообразные проводники и детали) происходят события, приводящие к нарушениям функционирования. Вероятность превышения наведёнными токами и напряжениями пороговых уровней зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- Уровни электромагнитного возмущения источника помех;
- Уровень восприимчивости рецептора помех;
- Ослабление электромагнитного возмущения при его распространении от источника до чувствительных цепей рецептора;
- Степень совпадения частотного диапазона источника и рецептора помех;
- Степень совпадений поляризаций электромагнитного возмущения источника и переменных цепей рецептора [1]

Основные источники электромагнитного излучения, вызывающего искажение сигналов в электронных устройствах делятся на внешние и внутренние источники.

Внешними источниками являются:

- системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии
- транспорт на электроприводе (железнодорожный и его инфраструктура, городской – метро, троллейбус, трамвай)
- функциональные передатчики (радиостанции, телевизионные передатчики, системы сотовой связи, системы мобильной радиосвязи, спутниковая связь, радиорелейная связь, радиолокационные станции и т.п.)
- технологическое оборудование различного назначения, использующее сверхвысокочастотное излучение, переменные и импульсные магнитные поля
- медицинские терапевтические и диагностические установки
- средства визуального отображения информации на электроннолучевых трубках (мониторы, телевизоры)
- промышленное оборудование на электропитании, электробытовые приборы
- природные излучения (солнечные бури, молнии, радиоактивные излучения)

Внутренними источниками излучения в электронных устройствах являются колебательные контуры, прерыватели, индукционные ёмкости, усилители, микропроцессоры, системы потребления электроэнергии и т.д.

Если от внутренних помех можно в какой-то мере избавиться путём рациональной конструкции, установки дополнительных фильтров и т.д., то от внешних источников основным средством защиты являются экраны.[20]

В настоящее время производители современных САПР (система автоматизированного проектирования) стараются учитывать при проектировании РЭС обеспечение целостности сигнала, уменьшение перекрестных помех меж соединениями и т.д. Это такие производители,

как Mentor Graphics Technologies, Cadence и Zuken. С этой целью они используют математическое моделирование физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

Традиционное построение САПР опирается на применение локальных рабочих станций и рабочих станций, объединённых в локально вычислительные сети. Естественно, важным в этом аспекте является расчёт эффективности экранирования от ЭМИ.

Для крупных промышленных предприятий целесообразно создание собственных вычислительных центров и приобретение специализированных дорогостоящих программных продуктов.

Для фирм, специализирующихся в узкой области с относительно малыми объёмами проектных работ, экономически целесообразно использование интерактивной системы интернета по технологии клиент-сервер. При этом подходе на серверной стороне распределённой информационной среды может быть реализован вычислительный центр, обслуживающий всех желающих, в том числе и малые фирмы. Однако развитие подобного подхода страдает от отсутствия методического и программного обеспечения проектных процедур, ориентированных на применение в среде интернет. [21] Нет таких программ и при расчёте эффективности экранирования неоднородных электромагнитных экранов, для встраивания в автоматизированные программы расчёта.

Существующие пакеты, например пакет «Mathematica» фирмы Wolfram Research Inc. для решения задач в области ЭМС, система схемотехнического моделирования NetSpice не могут быть включены в автономную программу расчёта эффективности электромагнитных экранов в силу своей громоздкости.

В настоящем диссертационном исследовании разработаны методы расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов, с помощью компьютерных технологий, как на

локальной машине, в локальных сетях, так и с использованием технологии клиент-сервер.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, заключения и списка использованной литературы. В приложении приведены акты внедрения и свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

В первой главе рассматриваются элементы электромагнитной совместимости, источники и рецепторы помех. Выделяются новые мощные источники помех, такие как электромагнитное оружие, импульс высотного ядерного взрыва, средства электромагнитного терроризма. Даются их параметры, механизм воздействия на аппаратуру. Рассматриваются методы защиты аппаратуры от мощных электромагнитных воздействий.

Приводится аналитический метод расчёта эффективности экранирования, приводится обзор численных методов.

Формулируется цель и задачи работы. Целью работы является повышение эффективности проектных работ при создании электромагнитных экранов радиоэлектронной аппаратуры за счёт совершенствования метода расчёта и визуализации конструкторского этапа проектирования экрана и внедрения «облачных» технологий .

Во второй главе представлен анализ статей, посвящённый аналитическим методам расчёта эффективности экранирования электродинамических экранов, описываются неоднородности экрана. Так как в современном мире расчёт эффективности экранирования аналитическим методом рассматривает только бесконечно протяжённый экран, то предлагается на рассмотрение коэффициентный метод расчёта эффективности экранирования.

Представлены алгоритмы расчёта неоднородного электромагнитного экрана, которые в дальнейшем лягут в основу программных комплексов по расчёту эффективности экранирования.

Третья глава включает разработку алгоритма расчёта экрана, разработку визуализации экрана для программного комплекса оценки эффективности экранирования при конструкторском проектировании электродинамических экранов. Рассмотрен выбор и обоснование языка программирования, с помощью которого можно реализовать представленные в работе алгоритмы.

В четвёртой главе приводится методика применения разработанного программного обеспечения по расчёту неоднородных электромагнитных экранов. Представлен программный продукт «SE Calculator», дано руководство пользования. Описана проверка адекватности расчётов (сопоставление результатов расчёта по разработанной методике с достоверными известными результатами).

Разработана методика автоматизированного расчета с использованием «облачных» технологий.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе в целом.

**Апробация результатов работы.** Результаты представлялись и докладывались на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ (г. Москва) в 2011, 2012 и в 2013 годах. На 9-ом международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (г. Санкт-Петербург 2011 г). На II всероссийской научно-технической конференции посвящённой системам управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами (г. Москва 2012 г).

По теме диссертации опубликовано 12 публикаций, в том числе 3 в журналах, включённых в перечень ведущих рецензируемых научных



журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Радиоэлектроника и Телекоммуникации» МИЭМ НИУ ВШЭ.

# **Глава 1. Экранирование, как средство обеспечения электромагнитной совместимости**

## **1.1. Проблемы электромагнитной совместимости**

Электромагнитная совместимость (ЭМС) определяет способность технических средств функционировать «в предусмотренном режиме, в заданной электромагнитной обстановке и при этом не создавать электромагнитных помех другим техническим средствам» [8]. Электромагнитные помехи (ЭМП) могут вызывать нарушения функционирования электротехнических и электронных систем, затруднять использование радиочастотного спектрального ресурса, вызывать возгорание легковоспламеняющихся газообразных средств, воздействовать на ткани тела человека. Одним из эффективных средств обеспечения ЭМС радиоэлектронных средств и защиты их от ЭМП является экранирование. Наряду с такими методами как зонирование, фильтрация, заземление и ограничение перенапряжения, экранирование остаётся в ряде случаев единственным возможным решением задачи снижения уровня воздействующих полей на радиоэлектронные средства или устранение помехоэмиссии от технических средств. С повышением быстродействия электронных средств, применение схемотехнических методов (фильтрация, установка ограничителей) не всегда представляется возможным из-за их влияния на быстродействие систем. Поскольку быстродействие является приоритетным показателем при создании самого широкого класса перспективных электронных средств, значение экранирования резко возрастает [23].

Эффекты ЭМП в технических средствах вызывают постоянно растущее беспокойство разработчиков и конструкторов из-за повышения чувствительности компонентов систем к электромагнитным воздействиям,

расширения частотного диапазона и уровня мощностей этих воздействий, а также лавинообразного роста источников помех самой разнообразной природы. Для радиоэлектронных средств специального применения следует учитывать определённую вероятность наличия преднамеренных мощных сверхширокополосных электромагнитных воздействий. Это ставит перед разработчиками аппаратуры еще более сложные задачи по ее защите.

В концепции ЭМС выделяются источники и рецепторы помех, а также среда распространения помех от источника к рецептору. Электромагнитной помехой может являться практически любое электромагнитное явление в рамках широкого диапазона частот. Источник помеховых электромагнитных возмущений может располагаться вне рассматриваемой электронной системы, но он также может располагаться и внутри этой системы. В данном случае одна часть системы является источником, а другая - рецептором [24].

Источники помех бывают природного и искусственного происхождения. Наиболее мощными природными источниками помех являются разряды молний, генерирующие значительные токи в системе молниезащиты, и электрические поля высокой напряженности. Источниками искусственного происхождения могут быть самые разнообразные устройства и системы, начиная от мощных радиопередающих устройств и заканчивая микропроцессором. Наиболее мощными искусственными источниками электромагнитного излучения являются ядерные взрывы. С возрастанием высоты взрыва, увеличивается пробег всех излучений, выходящих из зоны взрыва. Возрастает область ионизации. [2] При взрывах на высотах 80 – 100 км пробег рентгеновского излучения (электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между гамма- и ультра-фиолетовым излучением в пределах длин волн от  $10^{-8}$  до 0,1 мкм) в горизонтальном направлении составляет

несколько километров, а на больших высотах десятки и сотни километров. 80% энергии космического взрыва идёт на образование рентгеновского излучения. Существуют лазеры с ядерной накачкой, которые фокусируют рентгеновское излучение в узкий пучок энергии и направляют на объект, например на головную часть баллистической ракеты [25]. При этом происходит механическое повреждение ракеты. Поражающее действие высотных ядерных взрывов рассматривают, как правило, на воздушные и космические цели, а на наземные объект (личный состав, радиоэлектронную и электротехническую аппаратуру) - только воздействие ЭМИ. Характер поражающего действия электромагнитного импульса высотных ядерных взрывов сходен с характером поражающего действия ЭМИ наземных и воздушных взрывов. Отличие высотного ядерного взрыва состоит в том, что большие токи напряжения наводятся на кабельных, воздушных линиях и других элементах. Они расположены не только вблизи эпицентра взрыва, но и на расстоянии сотен километров от него. [3] Вследствие этого, личный состав, радиоэлектронная и электротехническая аппаратура могут быть выведены из строя от воздействия ЭМИ высотного ядерного взрыва, находясь на безопасных удалениях от поражения другими поражающими факторами.

В любом случае источник возбуждает электромагнитное поле с определенной частотой или, что наиболее типично, в широком диапазоне частот. При взаимодействии переменного электромагнитного поля с цепями электронного средства, имеющими вполне конкретную физическую реализацию, в этих цепях возникают токи и напряжения соответствующих интенсивностей. При превышении наведенными токами и напряжениями определенных пороговых уровней в рецепторе происходят события, приводящие к нарушениям функционирования.

Вероятность превышения наведенными токами и напряжениями пороговых уровней зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- уровни электромагнитного возмущения источника помех;
- уровень восприимчивости рецептора помех;
- ослабление электромагнитного возмущения при его распространении от источника до чувствительных цепей рецептора;
- степень совпадения частотного диапазона источника и рецептора помех;
- степень совпадений поляризаций электромагнитного возмущения источника и приемных цепей рецептора.

На рис. 1 **Ошибка! Источник ссылки не найден.** дано обобщенное представление взаимодействия источника и рецептора помех. [8]

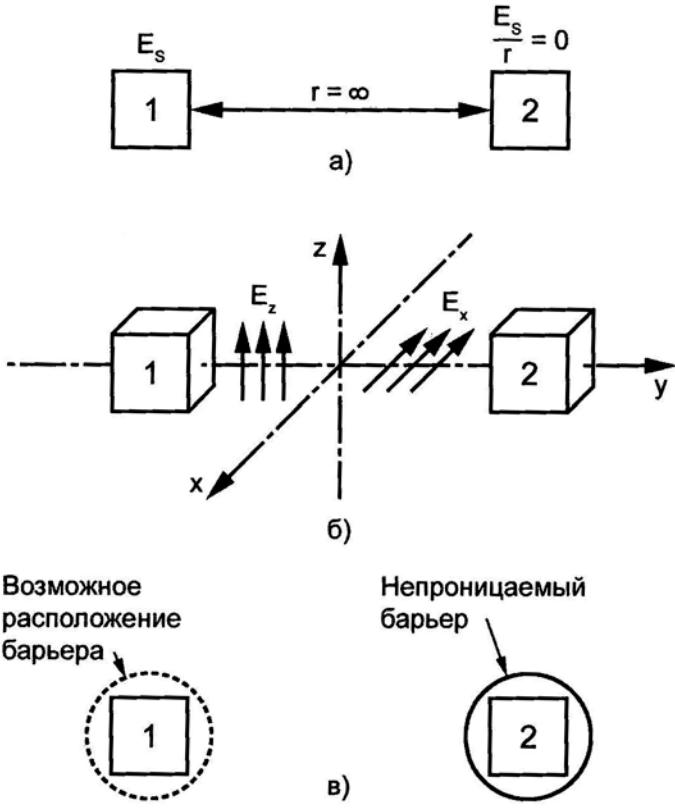


рис. 1

**Обобщённое представление взаимодействия источника и рецептора помех: а) разнесение источника и рецептора; б) изменение поляризации; в) создание защитных барьеров (1 – источник помех, 2 – рецептор помех)**

Для снижения степени взаимодействия возможны следующие основные подходы:

- увеличение расстояния между источником и рецептором помех в случае, когда место их расположения известно и координаты установки могут быть изменены в нужном направлении (рис. 1,а). Это возможно, если источник, рецептор и среда распространения сигнала контролируются авторами проекта;
- выбор поляризации сигналов источника, ортогональной к принимаемым сигналам рецептора (рис. 1,б), что, например, имеет место при ориентации магнитных полей источника и рецептора с целью уменьшения их взаимодействия. В общем случае поляризация источника помех неизвестна, что затрудняет или вообще делает невозможным применение данного подхода;
- установка около рецептора или источника помех искусственного барьера в виде экрана (рис. 1,в), который предотвращает воздействие источника на рецептор в необходимом частотном диапазоне. Этот вариант не требует доступа ко всей системе «источник - среда - рецептор» и может быть реализован независимо при проектировании источника или рецептора, опираясь на показатели восприимчивости и параметры внешних воздействий.

Как видно, система экранирования рецептора может быть спроектирована без детальных знаний параметров источника помех, но повышение эффективности экранирования более экономными средствами достигается только при знании этих параметров. В ряде случаев следует экранировать заведомо мощный источник, что улучшит электромагнитную обстановку и снизит затраты на разработку системы [28].

**Зоны действия источников электромагнитных помех**

Существуют 3 зоны действия источников электромагнитных помех (рис. 2): ближняя, переходная и дальняя. Граница между ближней и дальней зонами определяется следующим образом :

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

- Ближняя зона – зона, в которой расстояние до источника меньше  $r$
- Дальняя зона – зона, в которой расстояние до источника больше  $r$
- Переходная зона – это зона, в которой формируется плоская волна

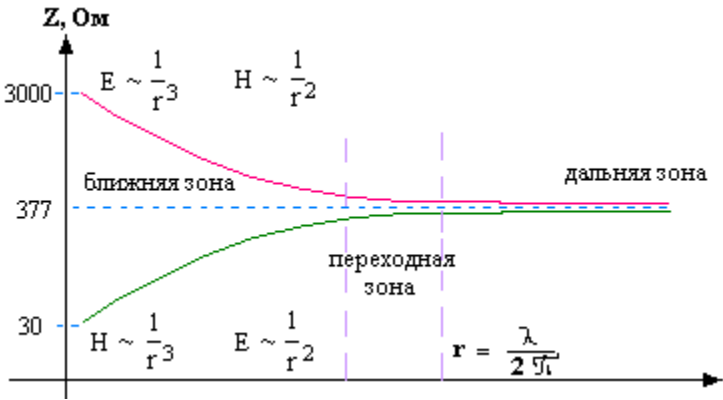


рис. 2

**Зоны действия источников помех**

На рисунке (рис. 2) относительные значения  $Z$  являются верными для области, располагающейся в непосредственной близости от излучателя электромагнитных помех. Если взять большие расстояния, то основной составляющей поля будет являться составляющая, которая имеет большее значение и которая быстрее убывает, чем дополнительная составляющая. И в результате волновое сопротивление  $Z$  принимает значение 377 Ом, а именно волновому сопротивлению свободного пространства.

Следует особенно отметить, что в данной работе рассматривается электродинамическое экранирование, поэтому расчёты, которые

представлены ниже, справедливы только для дальней зоны действия источников электромагнитных помех.

## 1.2. Аналитические методы расчёта электромагнитных экранов

Давайте рассмотрим эффективность экранирования бесконечно протяжённого экрана, толщиной  $t$ , причём учтём нормальное падение на этот экран плоской электромагнитной волны. Рассматривается бесконечно протяжённый экран для того, чтобы исключить влияние краевого эффекта. Также учтём, что экран является линейной системой.

Я хотел бы учесть, что случай нормального падения на экран плоской волны является одним из самых неблагоприятных. Просто, если взять падение плоской электромагнитной волны под наклоном, то она частично отражается от стенки экрана, частично попадает в область экрана, продолжая распространяться в перпендикулярном направлении (рис. 3) [10].

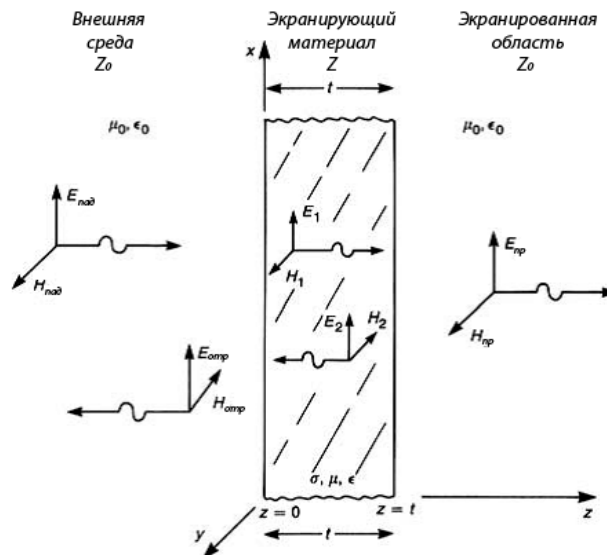


рис. 3

Схема распространения волны через экран



Аналитический метод расчета эффективности электромагнитного экранирования основывается на решении уравнений Максвелла для гармонических колебаний [18, 19, 15]:

$$\operatorname{rot} H = (\sigma + j\omega\epsilon)E \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} E = -j\omega\mu H \quad (3)$$

Аналитическое вычисление сводится к определению составляющих электромагнитного поля, таких как

- проникшего в экранированную область, пространства ( $y \gg t$ )
- известных параметров воздействующего поля ( $E, H$ ),
- электрофизических и геометрических параметров экрана ( $\mu, \sigma, t$ )
- электрофизических параметров среды ( $\mu_0, \epsilon_0$ ).

Уравнения для расчета электромагнитного поля для различных зон имеют следующий вид:

а) для зоны падения электромагнитной волны во внешней среде ( $Z \leq 0$ )

$$E_{\text{пад}} = \hat{x} E_{\text{пад}} e^{-j\beta_0 z}, E_{\text{отр}} = \hat{x} E_{\text{отр}} e^{+j\beta_0 z} \quad (4)$$

$$H^i = \hat{y} \frac{E_{\text{пад}}}{Z_0} e^{-j\beta_0 z}, H^r = \hat{y} \frac{E_{\text{отр}}}{Z_0} e^{-j\beta_0 z} \quad (5)$$

б) для экранированной зоны поглощения проводящим материалом ( $0 \leq Z \leq t$ )

$$E_1 = \hat{x} E_1 e^{-\gamma z}, E_2 = \hat{x} E_2 e^{-\gamma z} \quad (6)$$

$$H_1 = \hat{y} \frac{E_1}{Z} e^{-\gamma z}, H_2 = -\hat{y} \frac{E_2}{Z} e^{-\gamma z} \quad (7)$$

в) Для проникшей электромагнитной волны во внутрь корпуса ( $Z \geq t$ )

$$E_{\text{пр}} = \hat{x} E_{\text{пр}} e^{-j\beta_0 z} \quad (8)$$

$$H_{\text{пр}} = \hat{y} \frac{E_{\text{пр}}}{Z_0} e^{-j\beta_0 z} \quad (9)$$

где

$$\beta_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}, Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}, \omega = 2\pi f, \gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)},$$

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}$$

Чтобы найти аналитическое выражение расчёта эффективности экранирования электромагнитного экрана нужно знать напряженность электромагнитной волны, которая проходит через экранирующий материал. Чтобы найти аналитическое выражение также нужно определить граничные условия  $z=0$  и  $z=t$  к уравнениям - .

Исходя из этого, можно получить уравнения с неизвестными:

$$E_{\text{пад}} + E_{\text{отр}} = E_1 + E_2 \quad (10)$$

$$E_1 e^{-\gamma t} + E_2 e^{-\gamma t} = E_{\text{пр}} e^{-j\beta_0 t} \quad (11)$$

$$\frac{E_{\text{пад}}}{Z_0} - \frac{E_{\text{отр}}}{Z_0} = \frac{E_1}{Z} - \frac{E_2}{Z} \quad (12)$$

$$\frac{E_1}{Z} e^{-\gamma t} - \frac{E_2}{Z} e^{-\gamma t} = \frac{E_{\text{пр}}}{Z_0} e^{-j\beta_0 t} \quad (13)$$

Из - можно определить следующее выражение:

$$\frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{пр}}} = \frac{(Z_0 + Z)^2}{4Z_0 Z} \left[ 1 - \left( \frac{Z_0 - Z}{Z_0 + Z} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right] e^{\gamma t} e^{-j\beta_0 t} \quad (14)$$

Комплексная постоянная распространения заменяется следующим образом:

$$\gamma = \gamma + j\beta \cong \frac{1+j}{\delta} \quad (15)$$

Используя и учитывая, что  $Z_0 \gg Z$  получаем:

$$\frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{пр}}} \cong \left| \frac{Z_0}{4Z} \right| e^{\frac{t}{\delta}} \left| 1 - e^{-\frac{t}{\delta}} e^{-\frac{j2t}{\delta}} \right|$$

Исходя из этого можно получить выражение для расчета эффективности экранирования сплошного экрана:

$$S = \underbrace{20 \log_{10} \left| \frac{Z_0}{4Z} \right|}_R + \underbrace{20 \log_{10} (e^{t/\delta})}_A + \underbrace{20 \log_{10} |1 - e^{-t/\delta} e^{-j2t/\delta}|}_B \quad (16)$$

Если провести анализ полученного уравнения, то видно, что эффективность экранирования зависит от трех составляющих:

$$S = R + A + B, \text{ дБ}, \quad (17)$$

где

$A$  – показывает эффективность экранирования за счет поглощения энергии электромагнитной волны в толще экрана, дБ;

$R$  – составляющая, определяющая отражение энергии от границы раздела при входе волны в экран, дБ;

$B$  – характеризует потери за счет многократных отражений в толще экрана, дБ.

Теперь можно рассмотреть эти переменные более подробным образом.

**Потери на отражение энергии от границы раздела при входе волны в экран**

Потери на отражение энергии от границы раздела при входе волны в экран зависят от зоны действия источника электромагнитных помех. Также, рассчитывая потери необходимо рассмотреть формулы для дальней зоны и ближней зоны магнитного и электрического поля.

### Дальняя зона

Предположим волновое сопротивление среды  $Z_0$  равно 377 Ом, то из уравнения следует выражение потерь на отражение в дальней зоне:

$$R = 20 \log \frac{94,25}{|Z|}, \text{ дБ} \quad (18)$$

Можно сделать вывод, чем меньше сопротивление материала экрана, тем выше потери на отражение.

$$R = 168 + 10 \log \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right), \text{ дБ} \quad (19)$$

### Ближняя зона электрического поля

Волновое сопротивление от точечного источника электрического поля может быть заменено уравнением, когда  $r < \lambda/2\pi$ :

$$|Z|_e = \frac{1}{2\pi f \epsilon r} \quad (20)$$

где

$r$  - дистанция до источника, м;

$\epsilon$  – диэлектрическая постоянная.

Исходя из уравнения , можно получить:

$$R_e = 20 \log \frac{1}{8\pi f \epsilon r |Z|}, \text{ дБ} \quad (21)$$

Подставим значение диэлектрической постоянной в уравнение :

$$R_e = 20 \log \frac{4,5 \times 10^9}{f r |Z|}, \text{ дБ} \quad (22)$$

Тогда, исходя из уравнения для  $Z$ , получаем выражение потерь на отражение в ближней зоне электрического поля:

$$R_e = 322 + 10 \log \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2}, \text{ дБ} \quad (23)$$

### Ближняя зона магнитного поля

Волновое сопротивление от точечного источника магнитного поля может быть заменено уравнением, когда  $r < \lambda/2\pi$  [8]:

$$|Z_m| = 2\pi f \mu r \quad (24)$$

Где

$r$ - дистанция до источника, м;

$\mu$  – магнитная проницаемость

Подставив уравнение в получаем:

$$R_m = 20 \log \frac{2\pi f \mu r}{4|Z|} \quad (25)$$

Подставив значение магнитной постоянной, получаем выражение:

$$R_m = 20 \log \frac{1,97 \times 10^{-6} f r}{|Z|} \quad (26)$$

Выражение потерь на отражение в ближней зоне магнитного поля можно получить следующим образом:

$$R_m = 14,6 + 10 \log \left( \frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) \quad (27)$$

### Обобщенное выражение для определения потерь на отражение

Выражение потерь на отражении может быть представлено в общем виде, как:

$$R = C + 10 \log \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left( \frac{1}{f^n r^m} \right) \quad (28)$$

где значения констант  $C$ ,  $n$ ,  $m$  берутся из таблицы (Таблица 1.2-1)

Таблица 1.2-1

Тип воздействия	$C$	$n$	$m$
Плоская волна	168	1	0

Электрическое поле	322	3	2
Магнитное поле	14,6	-1	-2

**Потери на поглощение**

Потери за счет поглощения электромагнитной волны в самой стенке экрана зависят от снижения амплитуды поля в  $e$  (2,71828) раз на расстоянии, равном толщине  $\delta$  скин-слоя (рис. 4) [10].

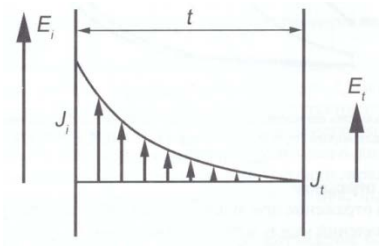


рис. 4

Ослабление поля в толще экрана

Уменьшение амплитуды в 2,7 раз на каждом скин слое соответствует ослаблению в  $20\lg e \approx 8,686$  дБ. При толщине  $t$  экрана в нем «укладывается»  $t/\delta$  скин слоев. Отсюда следует, что суммарное ослабление за счет поглощения энергии электромагнитной волны, прошедшей через стенку экрана, будет определяться, как:

$$A = 8,686 \frac{t}{\delta} = 8,686 t \sqrt{\pi f \mu \sigma}, \text{ дБ} \quad (29)$$

В инженерной практике удобно использовать формулу с относительными (относительно меди) величинами. Тогда выражение преобразуется к виду:

$$A = 131,4 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r}, \text{ дБ}, \quad (30)$$

где

$t$  –толщина стенки экрана, мм;

$\mu_r$  и  $\sigma_r$  - соответственно магнитная проницаемость и удельная проводимость относительно меди;

$f$  – частота, МГц.

### **Потери при переотражении**

Часть энергии электромагнитной волны распространяется в стенке экрана, многократно отражаясь от границ раздела сред (рис. 3). Потери на переотражении определяются показателем  $B$ .

При учете фактора  $B$  значение эффективности экранирования определяется более точно, но его вклад в общую эффективность экранирования незначителен. Поэтому в большинстве случаев фактором  $B$  пренебрегают, и учет потерь только на отражения и поглощение даст минимальное значение эффективности экранирования, соответствующее худшему случаю.

При учете фактора  $B$  выражение для его определения выражается, как:

$$B = 20 \lg \left( 1 - e^{-2t\sqrt{\pi f \mu \sigma}} e^{-j2t\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \right), \quad (31)$$

где

$t$  - толщина экрана, м;

$f$  – частота, Гц;

$\mu$  - абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

$\sigma$  – проводимость материала экрана, См/м.

### **1.3. Численные методы расчёта экранов**

Рассматривая только аналитические формулы, мы можем говорить только о приблизительных значениях эффективности экранирования. Это пригодно только на начальных стадиях проектирования электродинамического экрана. Но если речь заходит о более точных значениях, то приходится прибегать к другим методам расчёта

эффективности экранирования, а именно к численным методам. Разница заключается в том, что численный метод расчёта, куда более громоздок и сложен, по сравнению с аналитическим методом, но и результаты гораздо лучше.

Самый распространённый метод из всех численных методов, это метод конечных элементов. С помощью метода конечных элементов можно получить достаточно точные значения эффективности экранирования в решении задач в квазистатическом приближении и для статических полей. Так как этот метод универсален, то его можно использовать, как для экранов сплошных, так и для экранов с отверстиями, как круглыми, так и щелевыми.

Метод конечных элементов это численный метод решения дифференциальных уравнений, который можно встретить как в физике так и в технике. Основная идея метода конечных элементов заключается в том, что любую непрерывную величину (ей может быть индукция или напряженность магнитного поля) можно аппроксимировать моделью, состоящий из отдельных элементов (участков). На каждом из этих участков исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой величины в некоторых точках области («узлы»). Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области [67].

### **Методология решения задачи МКЭ**

Решение задачи с помощью метода конечных элементов можно представить в виде последовательности этапов, представленных в виде схемы (рис. 5):



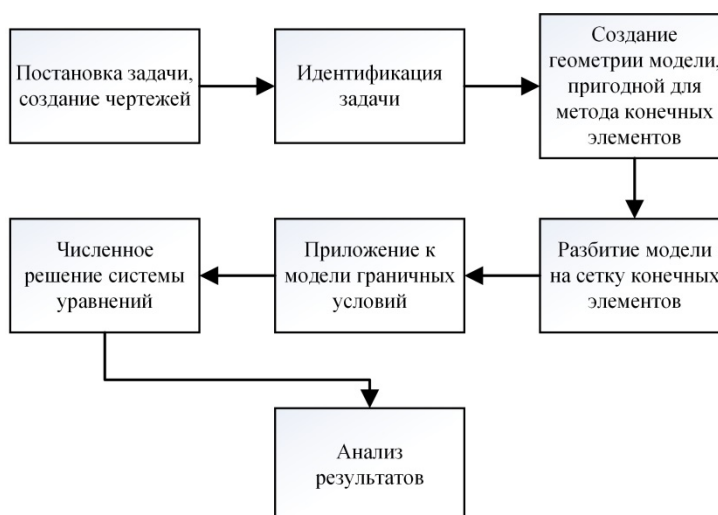


рис. 5

#### Схема решения задач МКЭ

Готовая модель делится на конечные элементы простой формы. Существуют несколько типовых форм конечных элементов, в которых поле смещений определяется по смещениям узлов с помощью некоторых интерполяционных функций. Поля напряжений и деформаций определяются по вычисленным таким образом смещениям.

Самый трудный этап решения задач с помощью метода конечных элементов — это создание конечно-элементной модели на стадии препроцессорной подготовки. Это связано с тем, что автоматическое построение сетки элементов приводит к появлению ошибок.

Этап - численное решение системы уравнений - выполняется автоматически.

Этап - анализ результатов - значительно облегчается существующими мощными инструментальными средствами визуализации результатов.

Численный анализ, к которому относится метод конечных элементов, требует своего рода идеализации реальной конструкции. Тогда, несмотря на значительное развитие ресурсов вычислительной техники, результаты вычислений по методу конечных элементов могут быть ошибочны. Использование компьютерной техники для получения

результатов эффективности методом конечных элементов, должно производиться с пониманием основных процессов и этапов вычислений, иначе можно получить ошибочные результаты. Но и могут быть ошибки операторов: при постановке задачи, построении модели численном решении. Причём ошибки, связанные с численным решением систем уравнений, имеют небольшую погрешность.

Приступая к конечно-элементному анализу, специалист должен понять:

область анализа, к которой относится поставленная задача,

Выбрать часть конструкции, которую следует изучить как можно более тщательно

Попробовать каким-нибудь образом упростить поставленную задачу.

Всё это ведёт к тому, что требуется высокая квалификация пользователя.

Метод конечных элементов не возможен без программных комплексов, которых на сегодняшний день реализовано огромное количество. Рассмотрим наиболее основные.

### **Программные комплексы**

#### *EMPro*

Решаемые задачи:

Для разработчиков МИС, РЧИС

- Моделирование ИС, корпусов, кристаллов
- Анализ переходов и разъемов
- Учет экранов, проверка качества экранирования на этапе моделирования

Для разработчиков антенн и антенных систем

- Анализ антенн, антенных систем, волноводов, переходов
- Моделирование антенн совместно с объектами, на которые они устанавливаются (машины, корабли, самолеты и т.п.)

- Оптимизация качества работы конечного изделия путём анализа ММО и пространственного разнесения антенн с помощью введения реального взаимодействия близости тела человека к антенне
- Возможность изучения влияния электромагнитного поля на организм (BIO EM)
- EMPro позволяет создавать параметризованные компоненты, такие как металлические экраны, элементы корпусирования, многослойные подложки, диэлектрические блоки и переходные разъемы для последующего экспорта в САПР ADS. Выявление взаимодействия между отдельными компонентами схемы.

### *HFSS*

Решаемые задачи

СВЧ и радиочастоты

- Пассивные компоненты (ответвители, мультиплексоры, фильтры, ферритовые фазовращатели)
- Антенны (рупорная, щелевая, patch-, Vivaldi-, рефлектор)
- Многополосные антенны
- Фазированные антенные решетки
- Антенно-фидерные сети
- Частотно-избирательные поверхности (FSS)
- Электромагнитные band-gap-структуры (EBG)
- Радиочастотные катушки
- Экранирование
- Уменьшенный профиль (Reduced Cross Section, RDS)

Целостность сигналов

- Пассивные компоненты на пластине (например, спиральные индуктивности) и соединения
- Современные корпуса, включая BGA, MCM, LTCC и SiP

- Критические участки печатных плат, например, сквозные отверстия, контактные площадки, линии передачи, решетчатые мощные и заземляющие панели
- Разъемы
- Соединительные панели

### *CST Microwave Studio*

#### Решаемые задачи

Программа, предназначена для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения.

Типичные устройства, моделируемые в данной программе:

- волноводные и микрополосковые направленные ответвители мощности;
- делители и сумматоры мощности;
- волноводные, микрополосковые и диэлектрические фильтры;
- одно- и многослойные микрополосковые структуры;
- различные линии передачи;
- коаксиальные и многовыводные соединители;
- коаксиально-волноводные и коаксиально-полосковые переходы;
- оптические волноводы и коммутаторы;
- различные типы антенн - рупорные, спиральные, планарные.
- расчет параметров рассеяния в полосе частот для трехмерных электромагнитных систем;
- расчет параметров излучения для открытых систем;

- расчет собственных частот и полей собственных мод трехмерных резонаторов

*ELCUT*

Решаемые задачи:

Высоковольтные системы, громкоговорители датчики, изоляция, исполнительные механизмы, кабели, конденсаторы, линии электропередач, магнитопроводы, механические системы, сверхпроводники, тепловые системы, трансформаторы, установки индукционного нагрева, электрические машины, электромагнитная совместимость, электронная оптика.

Анализ численных методов показал, что при расчёте эффективности экранирования электромагнитных экранов они имеют основные преимущества:

- Высокая точность расчёта
- Возможность учёта неоднородных сред
- Возможность учёта определённого типа апертур

Также можно выделить и недостатки:

- Необходимость иметь в своём вооружении дорогих программных продуктов (или серьёзных дорогостоящих коммерческих предложений)
- Необходимость в высокой квалификации пользователей этими программными продуктами
- Длительность процессов задания исходных данных и длительность самого расчёта

#### **1.4. Постановка задачи**

Проведённый анализ проблем электромагнитной совместимости, создания и расчёта электромагнитных экранов, как одного из основных

средств обеспечения электромагнитной совместимости, позволяет сформулировать цели и задачи работы.

**Целью данной работы** является повышение эффективности проектных работ при создании электромагнитных экранов радиоэлектронной аппаратуры за счёт совершенствования метода расчёта и визуализации конструкторского этапа проектирования экрана и внедрения «облачных» технологий.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Провести анализ проблемы ЭМС и экранирования, как средства обеспечения ЭМС.
2. Выполнить анализ методов расчёта эффективности экранирования электромагнитных экранов.
3. Разработать алгоритм расчёта эффективности экранирования для перфорированных электромагнитных экранов, пригодный для оперативной оценки эффективности экранирования на стадии конструкторского проектирования.
4. Разработать программное обеспечение по расчёту эффективности экранирования для перфорированных электромагнитных экранов, встроенное в процедуру конструирования аппаратуры.
5. Внедрение программного обеспечения в технологии «облачных» вычислений для создания процедуры корпоративного проектирования.

#### **Научная новизна работы**

1. Развита аналитический метод расчёта эффективности экранирования неоднородного электромагнитного экрана применительно к оперативной оценке эффективности экранирования на стадии конструкторского проектирования.

2. Разработан алгоритм расчёта эффективности экранирования неоднородного электромагнитного экрана как процедуры интегрированного проектирования экрана.
3. Разработан алгоритм визуализации как процедуры интегрированного этапа проектирования.
4. Предложен метод нахождения резонансной зоны эффективности экранирования неоднородных экранов на основе экспериментальных данных.
5. Разработан алгоритм корпоративного проектирования на базе «облачных» вычислений.

### **Теоретическая значимость**

В настоящей работе имеет место развитие оперативных методов расчета неоднородных экранов, встроенных в процедуру конструкторского проектирования аппаратуры, что позволяет сократить время проектирования и обеспечить более полное выполнение требований по эффективности экранирования.

Разработан алгоритм интегрированного проектирования электромагнитных экранов, встроенный в стадию конструкторского проектирования, позволяющий получать данные по эффективности экранирования непосредственно при визуальном проектировании экрана.

Разработаны подходы к созданию корпоративной вычислительной среды на основе «облачных» вычислений, что позволяет объединять усилия проектировщиков и специалистов различных направлений.

Полученные в работе результаты вносят существенный вклад в повышение эффективности конструкторских работ при создании помехозащищённой аппаратуры.

Данное диссертационное исследование способствует дальнейшему развитию исследований по совершенствованию проектных и конструкторских работ при разработке электромагнитных экранов.

### **Практическая значимость**

Полученные результаты способствуют повышению эффективности конструкторских работ при конструировании помехозащищённой аппаратуры, работающей в сложной электромагнитной обстановке.

Программный продукт защищен свидетельством №2010617918

Разработанный программный продукт, по расчёту эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана, был внедрен в «Московский научно-исследовательский радиотехнический институт» для оценки эффективности экранирования узлов аппаратуры перспективных систем связи.

А также разработанный программный продукт был внедрён в учебный процесс МИЭМ НИУ ВШЭ, в качестве материала для проведения практических занятий для студентов по дисциплине «Основы проектирования электронных средств». (дата по акту)

### **Обоснованность научных положений**

Достоверность научных положений, выводов, рекомендаций подтверждается сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, сравнением полученных результатов с результатами, опубликованными ранее в авторитетных научных публикациях, результатами внедрения разработанных рекомендаций в процессы проектирования и конструирования электромагнитных экранов.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и вузовских научных конференциях:

- на научных семинарах кафедры «Радиоэлектроники и телекоммуникаций» МИЭМ НИУ ВШЭ;
- в 2011, 2012 и 2013 г. на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ;



- на 9-ом международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии (2011 г.);
- на II всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (2012 г.)

#### **Полнота изложения материалов диссертации в публикациях**

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 11 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 1 авторское свидетельство на программу для ЭВМ. Общий объем опубликованных работ составляет 4,125 авт л., из которых личный вклад автора – 2 авт. л.

Вклад автора отражён в статьях [99]-[109]

## **Глава 2. Метод расчёта неоднородного электромагнитного экрана**

### **2.1. Анализ аналитических методов расчёта**

Проанализировав ряд статей, можно сказать о том, что многие из них описывают аналитический расчет эффективности экранирования экранами прямоугольной формы с отверстиями. Экранирование электромагнитного поля можно рассчитать как функцию частоты, размеров корпуса, размеров отверстия и позиции в корпусе. Теоретические значения эффективности экранирования хорошо согласуются с измеренными значениями.

Для бесконечного проводящего листа эффективности экранирования электрического (SE) и магнитного (ME) поля равны между собой и зависят только от частоты поля и проводимости, проницаемости и толщины листа. Однако, если корпус выполнен из листов конечных размеров, то SE и ME обычно различаются между собой и становятся зависимыми от позиции измерения внутри корпуса. Более того, в частности, обнаружено, что экранирование определяется проницаемостью энергии в основном через отверстия в корпусе по сравнению с проницаемостью через сплошную часть стенки, хотя исключением для этого может быть SM при аудио частотах. Принято допущение, что проводимость стенок корпуса достаточно велика, что позволяет считать значимой проницаемость только через отверстия.

Эффективность экранирования может быть рассчитана методами числовой симуляции или с помощью аналитических формул. Числовые методы позволяют моделировать комплексные структуры, но часто требуют большой компьютерной памяти и длительного времени работы компьютера для получения достаточного приближения. Это затрудняет их использование при исследовании влияния конструкционных параметров на

SE и SM. Используемые числовые методы расчета экранирования включают моделирование линий передач, метод конечных элементов и метод моментов.

Аналитические расчеты эффективности экранирования занимают намного меньше времени, и позволяют исследовать влияние конструкционных параметров на экранирование.

Многие из методов аналитических расчетов основаны на теории, относящейся к дифракции при прохождении через отверстия и применимы только к электрически малым отверстиям. Другие методы, происходят из метода мощностного равновесия и широко применяют формулу :

$$SE = 20 \lg \frac{\lambda}{2l} \quad (32)$$

где

$\lambda$  - длина волны,

$l$  - длина отверстия.

Корпус экрана рассматривается как волновод, и принимается, что волна имеет один путь распространения. Однако, расчет применим как выше, так и ниже критического уровня частоты. Как электрическое, так и магнитное экранирование рассчитываются как функции частоты, размеров отверстий, размеров корпусов, толщины стенок и позиции внутри корпуса. Простые модификации позволяют проводить расчеты при множественных отверстиях и внутренних потерях. В настоящее время, расчеты применимы только к корпусам прямоугольной формы, однако это включает большую часть корпусов, используемых в практическом электронном конструировании. Расчеты применимы к электрически большим и небольшим отверстиям.

Проведённый анализ состояния проблемы показал, что для решения поставленной задачи, наиболее предпочтительным является аналитический

метод расчёта эффективности экранирования электромагнитного экрана.

От численного метода, он отличается:

- высокой производительностью
- возможность встраивать дополнительные процедуры проектирования
- относительная простота реализации
- возможность оперативного развития по мере уточнения моделей

Недостатки метода, а именно не высокая точность результата, для оперативных решений не столь существенны, так как окончательное решение будет применяться по результатам экспериментального исследования готового изделия.

Рассмотренная в первой главе теория электромагнитного экранирования получила развитие в инженерной практике в виде коэффициентного метода, который позволяет учесть влияние апертур за счёт введения дополнительных коэффициентов.

## **2.2. Неоднородности в экране**

Если посмотреть на существующие реалии, то становится ясно, что защитные свойства электромагнитных экранов теряются из-за появления на них прямоугольных щелей, либо круглых отверстий, которые могут использоваться как, например, вентиляционные отверстия. Также появляются резонансные эффекты и т.д. Поэтому становится невероятно сложно учесть все факторы, которые снижают эффективность экранирования. Одним из вариантов решения этой задачи – это ввод поправочных коэффициентов в аналитический метод расчёта эффективности экранирования, которые будут корректировать недостатки метода.

Такое решение задачи довольно распространено, так как строгого решения задачи, которое получает нормальные модели для неоднородностей в экране, тяжело достичь.

Когда конструируется экран, нужно обратить внимание на утечки для одного или более апертур. (Таблица 2.2-1).

Таблица 2.2-1

Соединения	Отверстия и щели для:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Обжимные,</li> <li>• Паяные,</li> <li>• Резьбовые,</li> <li>• Сварные,</li> <li>• Стыковые.</li> </ul> <p>Вводы трубопроводов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Вентиляции,</li> <li>• Кондиционирования,</li> <li>• охлаждения и отопления.</li> </ul> <p>Дверцы, крышки, люки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• открывающиеся часто,</li> <li>• открывающиеся редко.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Выключателей,</li> <li>• индикаторов состояния,</li> <li>• кнопок,</li> <li>• линий питания,</li> <li>• окон,</li> <li>• оптоволоконна,</li> <li>• потенциометров и т.п.,</li> <li>• предохранителей,</li> <li>• сигнальных и управляющих кабелей,</li> <li>• соединителей.</li> </ul> <p>Неоднородные зоны:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• сетки,</li> <li>• оплетки.</li> </ul>

На рисунке (рис. 6) можно увидеть физическую картину того как проникает электрическое и магнитное поле через апертуры в электродинамическом экране. При проникновении силовых линий в экранируемую область вероятность воздействия поля на провода и кабели, которые расположены в этой области, становится очень значительной. По

этому, при проектировании и конструировании электродинамических экранов, обязательно нужно учитывать меры, которые помогут снизить отрицательное влияние апертур.

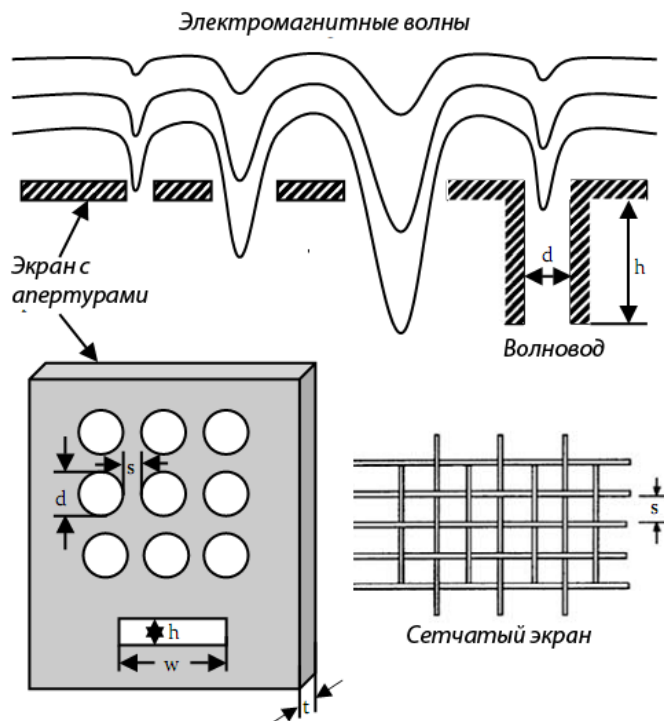


рис. 6

#### Проникновение электрического и магнитного полей через апертуры в экране

Если необходимо предусмотреть в экране вентиляционные отверстия, отверстия для кабелей или кнопок, то необходимо учитывать эти отверстия при расчёте эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана.

Рассмотренная в первой главе теория электромагнитного экранирования получила развитие в инженерной практике в виде коэффициентного метода, который позволяет учесть влияние апертур за счёт введения дополнительных коэффициентов.

### 2.3. Коэффициентный метод расчёта экрана

Ниже представлен коэффициентный метод расчёта экрана на основе подходов, изложенных в [5 – 6 работ + книга]

Наиболее распространённый случай использования экранов, это использование экранов в виде металлического листа с отверстиями.

Эффективность экранирования в данном случае можно рассчитать по следующей формуле :

$$S_{ap} = A_{ap} + R_{ap} + B_{ap} + K_{ap1} + K_{ap2} + K_{ap3}, \text{ дБ} \quad (33)$$

Где

$A_{ap}$  – потери на поглощение одиночной апертуры,

$R_{ap}$  – потери на отражение одиночной апертуры,

$B_{ap}$  – поправочный коэффициент отражения одиночной апертуры,

$K_{ap1}$  – поправочный коэффициент числа апертур,

$K_{ap2}$  – поправочный коэффициент близости апертур на низких частотах,

$K_{ap3}$  – поправочный коэффициент близости апертур на высоких частотах.

Очень часто, при конструировании электродинамических экранов можно встретить на них зоны с апертурами разнообразных форм. Чаще всего это круглые отверстия или прямоугольные щели. Эти отверстия в электродинамическом экране имеют глубину, равной стенке экрана  $t$ , поэтому их можно рассмотреть как волноводы. Отсюда можно определить частоту среза для волновода как  $f_{co}$ . До этой частоты волновод ослабляет в известной мере интенсивность электромагнитных волн. Эту частоту можно рассчитать следующим образом:

Если круглое отверстие :

$$f_{co\_c} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{D}, \text{ МГц} \quad (34)$$

Если прямоугольное отверстие :

$$f_{co\_r} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{W}, \text{ МГц} \quad (35)$$

Где

$D$  - диаметр круглого отверстия,

$W$  - наибольший размер прямоугольного отверстия.

Для расчёта потери на поглощение зоны с апертурой, берётся частота, которая по приближённым соотношениям ниже частоты  $f_{co}$ .

Для круглого отверстия :

$$A_{ap-c} = 32 \frac{t}{D}, \text{дБ} \quad (36)$$

Для прямоугольного отверстия :

$$A_{ap-c} = 27,3 \frac{t}{W}, \text{дБ} \quad (37)$$

Где

$t$  - толщина стенки экрана,

$D$  - диаметр отверстия,

$W$  - максимальный размер отверстия.

Рассмотрев соотношения, можно сделать вывод, что чтобы добиться ослабления поля, нужно увеличить глубину апертуры  $l_w$ , которая будет играть роль волновода (рис. 7).



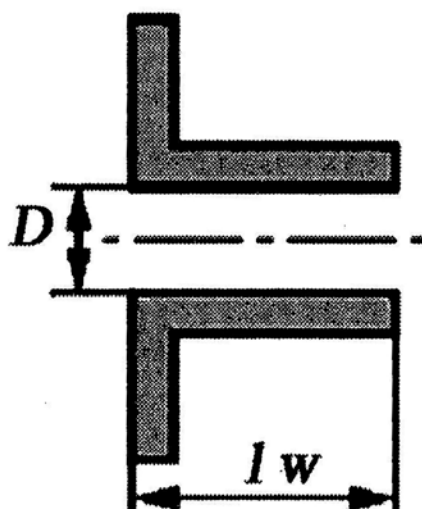


рис. 7

#### Отверстие в экране в виде волновода

Следует уделить внимание тому, чтобы не было дополнительного сопротивления протеканию высокочастотных токов, в местах соединения деталей. По этому, нужно использовать технологию вытяжки. При увеличении длины  $l_w$  эффективность ослабления становится больше, так как в данном случае ослабление служит функцией длины. Ниже (рис. 8), представлен пример уменьшения проникновения поля через апертуры по мере уменьшения диаметра отверстий и роста длины патрубков.

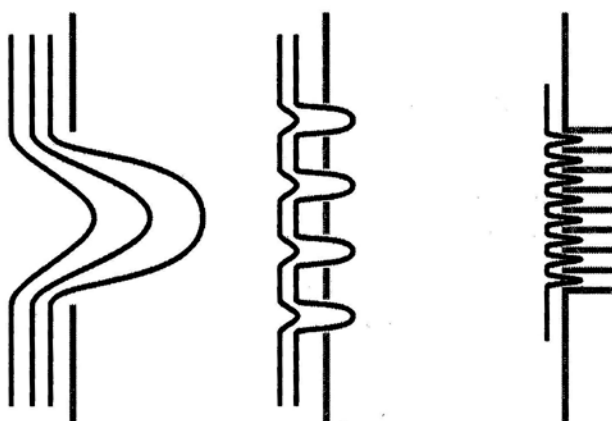


рис. 8

Показан пример уменьшения проникновения поля через отверстия по мере уменьшения диаметра отверстий и роста длины патрубков

Эффективность экранирования, если присутствует патрубок при рабочей частоте, много меньшей частоты среза, определяется следующим приближённым выражением:

Для волновода круглого сечения :

$$A_{aw\_c} = 32 \frac{l_w}{D}, \text{дБ} \quad (38)$$

Где

$D$  – диаметр сечения волновода,

$l_w$  – длина волновода.

Для волновода прямоугольного сечения :

$$A_{aw\_r} = 27,2 \frac{l_w}{W}, \text{дБ} \quad (39)$$

Где

$W$  – наибольший линейный размер поперечного сечения волновода,

$l_w$  – длина волновода.

Как и для сплошного экрана, при отражении ослабление щели зависит от изменения полного сопротивления на границе. Ослабление можно определить исходя из волнового сопротивления падающей волны и волнового сопротивления отверстия.

Чтобы рассчитать потери на отражение для круглого отверстия, можно воспользоваться следующей формулой :

$$R_{ap\_c} = 102 - 20 \lg(Df), \text{дБ} \quad (40)$$

Где

$D$  – диаметр отверстия,

$f$  – частота.

Также здесь учтён теневой эффект.

Потери на отражение для прямоугольного отверстия в общем случае можно рассчитать по следующей формуле :

$$R_{ap_r} = 100 - 20 \lg(Wf) + 20 \lg \left( 1 + \ln \left( \frac{W}{h} \right) \right), \text{ дБ} \quad (41)$$

Где

$W$  - ширина отверстия,

$f$  - частота,

$h$  - высота отверстия.

Это выражение также учитывает теневой эффект. Он возникает при отражении электромагнитной волны, прошедшей в экранируемую область, от внутренних поверхностей электродинамического экрана.

Зависимость поправочного коэффициента  $B_{ap}$  от потерь на поглощение определяется :

$$B_{ap} = 20 \lg(1 - 10^{-A_{ap}/10}) \quad (42)$$

Где

$A_{ap}$  – потери на поглощение одиночной апертуры.

При создании экрана имеет место совокупность апертур. Они могут быть объединены в матрицу отверстий круглой или прямоугольной формы. Эта совокупность характеризуется некоторой регулярной структурой, которая определяется как шаг размещения апертур. Такие решения могут встречаться при создании вентиляционных панелей и т.п. В данном случае группирование апертур вызывает определённые явления, которые влияют на эффективность экранирования. В данном случае необходимо учитывать такие факторы, как число отверстий на единицу площади, увеличение толщины скин-слоя при снижении частоты воздействующего поля, относительную близость отверстий. При расчёте

суммарной эффективности экранирования они учитываются вспомогательными коэффициентами  $K_{ap1}$ ,  $K_{ap2}$ ,  $K_{ap3}$ .

Коэффициентом  $K_{ap1}$  учитывается влияние числа отверстий и рассчитывается по следующей формуле :

$$K_{ap1} = 10 \lg(an), \text{дБ} \quad (43)$$

Где

$a$  – площадь одного отверстия,

$n$  – число отверстий на 1 квадратный сантиметр.

Произведение  $an$  соответствует доле в относительных единицах площади отверстий на единицу площади экрана. Исходя из этого, значение коэффициента  $K_{ap1}$  имеет отрицательный знак и  $an < 1$ . Это отражает его физический смысл, а именно снижение эффективности экранирования при увеличении суммарной площади апертур. Коэффициент можно определить, если выполнено следующее условие: расстояние от источника электромагнитного возмущения существенно больше диаметра отверстия или его максимального размера. Как я уже говорил, мы рассматриваем только дальнюю зону. И это высказывание справедливо только для неё. Если это условие не соблюдается, то  $K_{ap1} = 0$ .

Глубина скин-слоя увеличивается на низких частотах. Коэффициент  $K_{ap2}$  учитывает уменьшение эффективности экранирования при снижении частоты и увеличении толщины скин-слоя относительно зазора между апертурами. Этот коэффициент можно вычислить по следующей формуле :

$$K_{ap2} = -20 \lg(1 + 35p^{-2,3}), \text{дБ} \quad (44)$$

Где  $p$  – коэффициент, учитывающий относительный размер скин-слоя в расстоянии между отверстиями. Этот коэффициент можно рассчитать по формуле :

$$p = \frac{c_w}{\delta} \quad (45)$$

Где

$c_w$  – зазор проводящего материала между отверстиями (рис. 9),

$\delta$  – толщина скин-слоя.

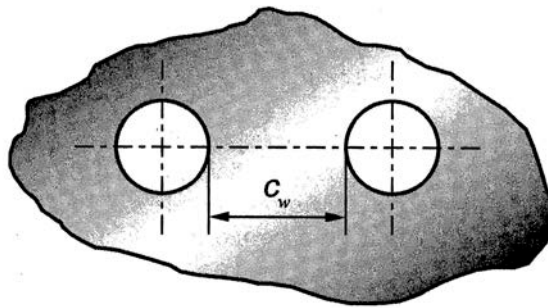


рис. 9

Зазор проводящего материала между отверстиями

Толщина скин-слоя рассчитывается следующим образом:

$$\delta = \frac{0,0066}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}}, \text{ см}$$

Где

$f$  – частота,

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала,

$\sigma_r$  – относительная проводимость материала экрана.

Таким образом, значение коэффициента, учитывающего относительный размер скин-слоя в расстоянии между отверстиями, можно записать следующим образом :

$$p = \frac{\sqrt{c_w^2 \cdot f \cdot \mu_r \sigma_r}}{0,0066} \quad (46)$$

При сближении отверстий, уменьшается зазор проводящего материала между отверстиями  $c_w$ , и, следовательно, уменьшается значение коэффициента  $p$ . Поэтому, фактически, близко расположенные отверстия работают как одно большое отверстие (рис. 10).

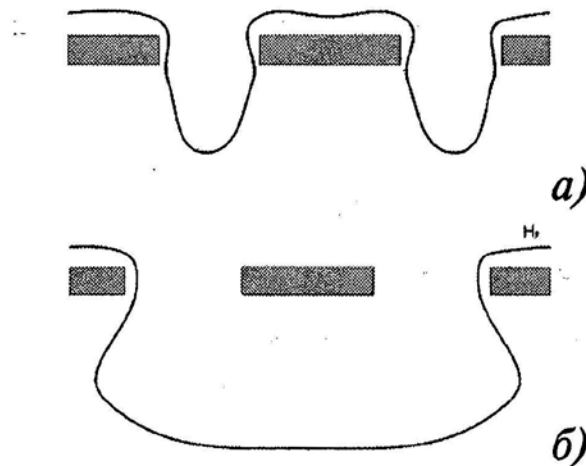


рис. 10

#### Слияние близко расположенных отверстий в одно

Исходя из рассмотренного, окончательный вид формулы для расчёта коэффициента  $K_{ap2}$  выглядит так :

$$K_{ap2} = -20 \lg \left[ 1 + 35 \cdot \left( \frac{\sqrt{c_w^2 \cdot f \cdot \mu_r \sigma_r}}{0,0066} \right)^{-2,3} \right], \text{ дБ} \quad (47)$$

Где

$f$  - частота,

$\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость материала,

$\sigma_r$  - относительная проводимость материала экрана,

$c_w$  - ширина проводящего материала между отверстиями.

Если рассматривать малые потери на поглощение, то диаметр отверстия становится больше толщины стенки экрана или больше длины патрубка. Исходя из этого – эффективность экранирования

электродинамического экрана возрастает за счёт увеличения связи между отверстиями на высоких частотах. Отсюда следует, что при вычислении эффективности экранирования следует учесть сказанные мной выше влияния и ввести поправочный коэффициент объединения близко расположенных отверстий  $K_{ap3}$ :

$$K_{ap3} = 20 \lg \left( \coth \frac{A_{ap}}{8,686} \right), \text{ дБ}$$

Где

$A_{ap}$  – потери на поглощение.

В заключении следует заметить, что рассмотренные выше формулы для расчёта эффективности экранирования электродинамических экранов верны, если расстояние от источника до экрана значительно больше максимального размера отверстия.

## **2.4. Алгоритмы расчёта неоднородного электромагнитного экрана**

Обычно в инженерных расчётах все утечки складываются вместе когерентно. Когерентно складывается сумма всех утечек с вычисленной эффективностью экранирования. Данный случай является не самым лучшим, так как фазы полей утечек могут принимать как одинаковые значения, так и отличаться совершенно случайным образом (в данном случае когерентность на низких частотах и не когерентность на высоких соответственно). В реальности преобладает один или несколько полей утечек, из-за этого правильно использовать наихудший когерентный случай. Расчет суммарной эффективности экранирования, учитывая утечки через отверстия, можно выполнить по представленной ниже формуле [65]

$$S_{\Sigma} = -20 \lg [K + \sum_{i=1}^n K_{apn}] \quad (48)$$

Где

$K$  – коэффициент экранирования сплошного экрана,

$K_{apn}$  – коэффициент экранирования в зоне  $n$  утечки,

$n$  – число зон апертур, вызывающих утечки

Данная формула соответствует самому худшему случаю, когда складываются значения коэффициентов экранирования отдельных путей прохождения электромагнитной волны. Коэффициент экранирования можно рассчитать по следующей формуле, если мы конечно знаем эффективность экранирования :

$$K = \frac{1}{\frac{s}{10^{20}}} \quad (49)$$

Представив выше процедуру решения задач по расчёту эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана, я хотел бы предложить следующий алгоритм методики расчёта неоднородного электромагнитного экрана (рис. 11):



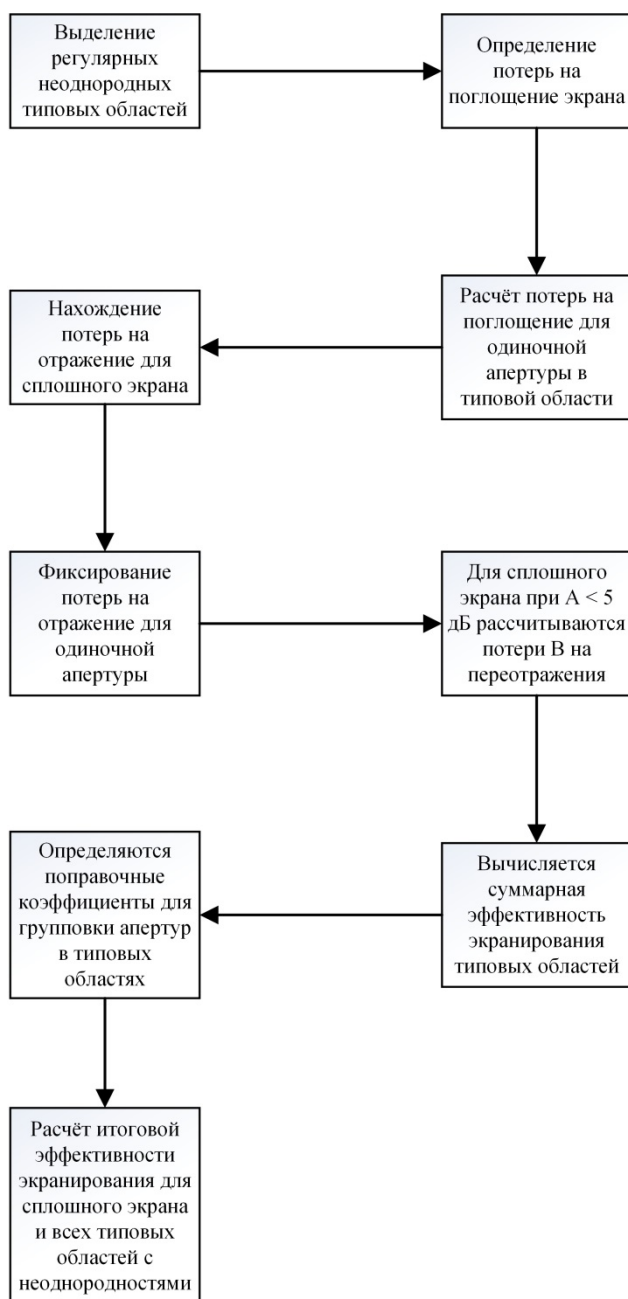


рис. 11

#### Алгоритм методики расчёта неоднородного электромагнитного экрана

Для примера, я хотел бы показать расчёт неоднородного электромагнитного экрана. Экран сконструирован из листового материала и имеет четыре зоны (рис. 12):

- Зона сплошного экрана,
- Зона с прямоугольным волноводом,
- Зона с круглыми отверстиями
- Зона с прямоугольными щелями

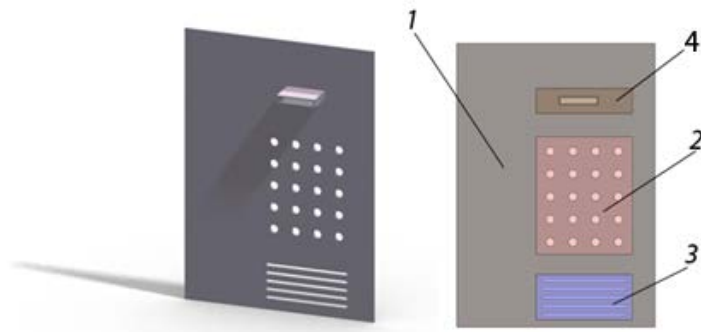


рис. 12

Неоднородный экран: 1 - зона сплошного листа, 2 - зона с круглыми отверстиями, 3 - зона с прямоугольными отверстиями, 4 - зона прямоугольного волновода

Примем следующие исходные данные:

- материал экрана – алюминиевый сплав;
- толщина листового материала 0,1 мм;
- диаметр отверстий 7 мм;
- расстояние между осями отверстий 5 мм;
- число круглых отверстий 30;
- ширина прямоугольного отверстия 10 мм;
- высота прямоугольного отверстия 1 мм;
- число прямоугольных отверстий 4;
- ширина прямоугольного волновода 10 мм;
- высота прямоугольного волновода 1 мм;
- глубина прямоугольного волновода 35 мм.

Результаты расчета сплошного экрана (зона 1) в диапазоне частот 50-1000 МГц приведены ниже (Таблица 2.4-1) (рис. 13). Здесь и далее все результаты округлены до десятых долей.

Таблица 2.4-1

Результаты расчёта сплошного экрана

Параметр	Частота, МГц				
	50	150	250	500	1000

Эффективность экранирования, дБ	S1	162,9	212,1	247,0	312,3	405,9
------------------------------------	----	-------	-------	-------	-------	-------

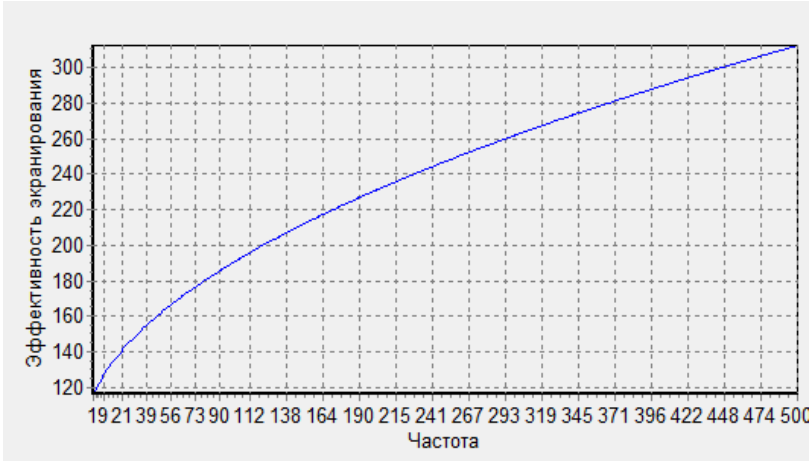


рис. 13

Результаты расчёта сплошного экрана

Для зоны экрана с круглыми отверстиями (область 2) итоги расчета приведены ниже (Таблица 2.4-2) (рис. 14):

Таблица 2.4-2

Результаты расчета области с круглыми отверстиями

Параметр	Частота, МГц				
	50	150	250	500	1000
Эффективность S1 экранирования, дБ	54,5	48,4	40,5	34,5	28,4

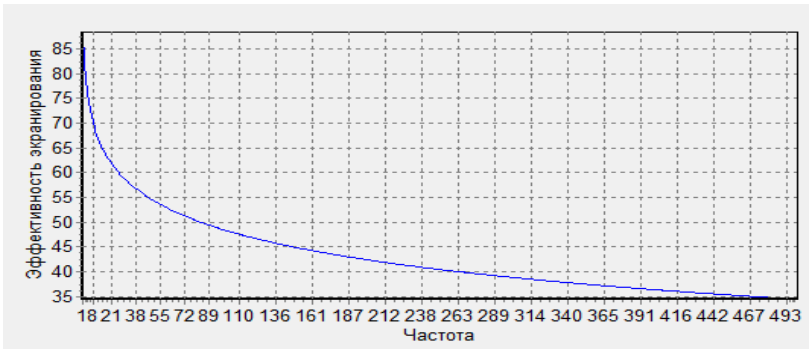


рис. 14

Результаты расчёта области с круглыми отверстиями

Результаты вычислений для области с прямоугольными отверстиями (область 3) представлены следующим образом (Таблица 2.4-3) (рис. 15):

Таблица 2.4-3

Результаты расчета для области с прямоугольными отверстиями

Параметр	Частота, МГц				
	50	150	250	500	1000
Эффективность S1 экранирования, дБ	70,7	61,2	56,7	50,7	44,7

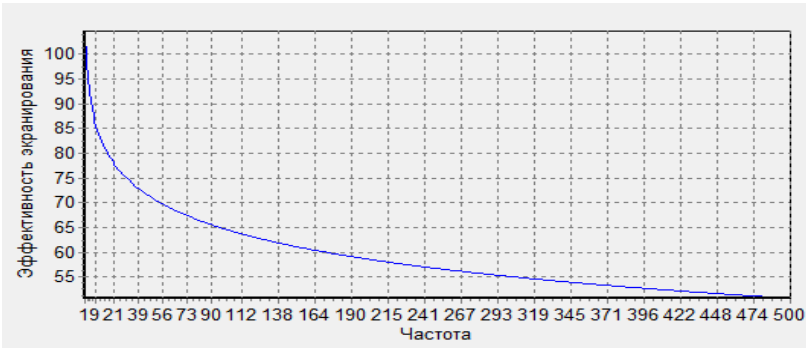


рис. 15

Результат расчёта для области с прямоугольными отверстиями

Результаты вычислений для области прямоугольного волновода (область 4) представлены в таблице (Таблица 2.4-4) и на графике (рис. 16):

Таблица 2.4-4

Результаты расчетов для области прямоугольного волновода

Параметр	Частота, МГц				
	50	150	250	500	1000
Эффективность S1 экранирования, дБ	92,0	82,5	78,0	72,0	66,0

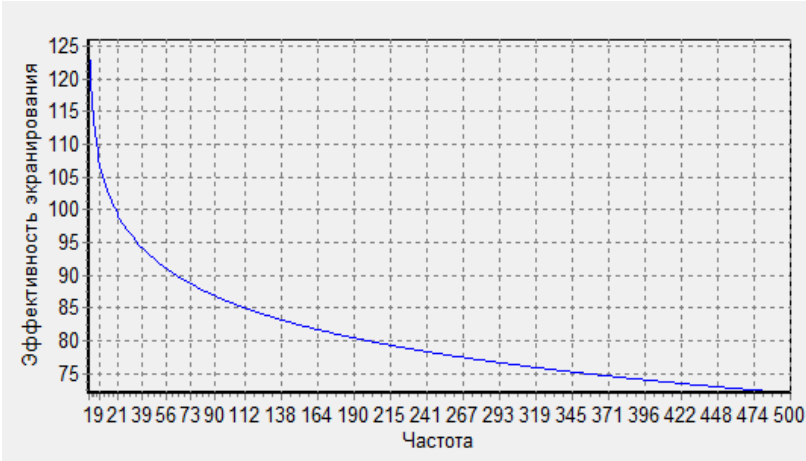


рис. 16

**Результаты расчёта эффективности экранирования для области прямоугольного волновода**

Для расчёта эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана, соответствующие эффективности экранирования переводятся в коэффициенты экранирования по формуле . Затем проводится расчет по .

Результаты проведенных расчетов по измерению эффективности экранирования на частотах в диапазоне 50 МГц до 1000 МГц приведены ниже (Таблица 2.4-5) и представлены на график (рис. 17).

**Таблица 2.4-5**

**Расчет эффективности экранирования неоднородного экрана**

Параметр	Частота, МГц				
	50	150	250	500	1000
Эффективность $S_1$ экранирования зоны 1, дБ	162,9	212,1	247,0	312,3	405,9
Эффективность $S_2$ экранирования зоны 2, дБ	54,5	48,4	40,5	34,5	28,4
Эффективность $S_3$ экранирования зоны 3, дБ	70,7	61,2	56,7	50,7	44,7
Эффективность $S_4$ экранирования зоны 4, дБ	92,0	82,5	78,0	72,0	66,0
Суммарная эффективность $S_{\Sigma}$	43,8	34,2	29,8	23,8	17,8

экранирования зоны 4, дБ					
--------------------------	--	--	--	--	--

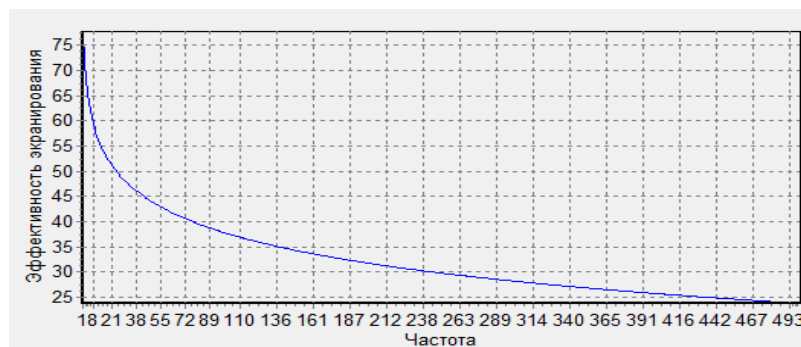


рис. 17

#### Эффективность экранирования неоднородного экрана

Из таблицы (Таблица 2.4-5) и графика (рис. 17) видно, что эффективность экранирования сплошного экрана имеет очень высокие показатели и они намного больше, чем суммарная эффективность экранирования.

Следует особенно уделить внимание тому, что суммарная эффективность всех четырёх зон перфорированного электромагнитного экрана меньше, чем зона с наименьшей эффективностью экранирования.

Представленный расчет эффективности экранирования неоднородного электромагнитного экрана позволяет сделать следующие рекомендации:

- Нужно ответственно отнестись к выбору материала экрана, так как в реальных условиях чаще всего в корпусе экрана присутствуют отверстия для различных целей, который значительно снижают показатели эффективности экранирования.
- Следует учесть, что энергия, которая попадает в область экрана через апертуры, определяет эффективность экранирования электромагнитного экрана на большом диапазоне частот.
- Конструктору нужно тщательно относиться к областям экрана, содержащим апертуры, так как любая, даже малейшая ошибка грозит

значительному снижению показателей эффективности экранирования электромагнитного экрана.

## 2.5. Выводы

1. Выполнил анализ аналитических методов расчёта электромагнитных экранов с апертурами. Показал, что наиболее эффективным методом в инженерной практике с целью проведения оперативных расчётов является коэффициентный метод. Он позволяет для типовых апертур (круглые отверстия и прямоугольные щели) учесть ослабление эффективности экранирования за счёт введения поправочных коэффициентов.

2. Разработал алгоритм расчёта эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана, который основан на представлении конструкции экрана в виде трёх типовых зон:

- Зоны с круглыми отверстиями
- Зоны с прямоугольными отверстиями
- Зоны сплошного экрана

Показал, что суммарная эффективность экранирования подобного электромагнитного экрана будет ниже эффективности экранирования худшей зоны. Разработанный алгоритм позволяет перейти к разработке персонального обеспечения по расчёту эффективности экранирования.

3. С целью верификации алгоритма выполнил тестовые расчёты электромагнитного экрана с различными параметрами неоднородности. Результаты получены для различных частот и не противоречат физики экранирования. Подтверждена гипотеза о превалирующем влиянии на эффективность экранирования зоны с худшем показателем.

## Глава 3. Разработка алгоритма расчёта экрана и его визуализация

### 3.1. Конструкторское проектирование экранов

На сегодняшний день процесс конструирования электромагнитных экранов выглядит следующим образом (рис. 18):

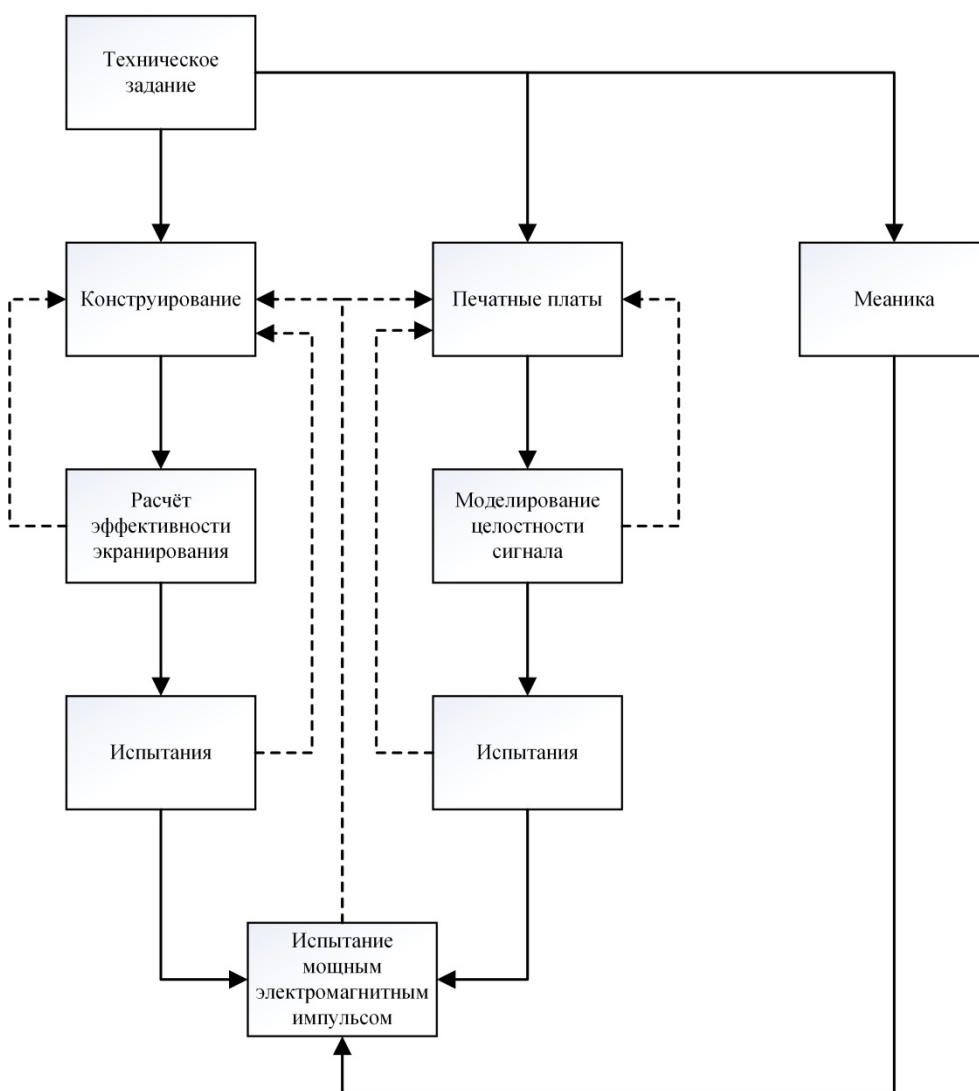


рис. 18

#### Процесс проектирования

Процесс проектирования перфорированного электромагнитного экрана начинается с технического задания. Получив техническое задание, на сегодняшний день, конструктора начинает сразу строить реальную



физическую модель экрана, выполняя пункты технического задания, зачастую, исходя из своего собственного опыта. Как можно догадаться, у конструктора далеко не всегда удаётся построить с первого раза электродинамический экран, полностью удовлетворяющий требованиям технического задания. И определять эффективность экранирования не входит в задачи конструктора. Так что, после этапа построения реальной физической модели экрана, конструктор передаёт его следующим людям, которые будут рассчитывать эффективность экранирования. Если эффективность экранирования не удовлетворяется требованиям технического задания, то этот экран возвращается обратно конструктору на доработку. Этот цикл может быть достаточно долгим, исходя из специфики технического задания. После того, как конструктору удалось построить электродинамический экран, который полностью удовлетворяет требованиям технического задания, экран отправляется дальше на различные испытания, включая испытания на мощный электромагнитный импульс. И даже здесь, если по каким-то причинам, экран проваливает испытания, то он обратно отправляется конструктору.

Как можно видеть процесс от подачи технического задания, до выхода готового продукта занимает огромное количество времени и спрогнозировать точное время на производство экрана практически не возможно.

Для решения сложившейся проблемы я предлагаю следующее решение, которое можно представить в виде схемы (рис. 19):



рис. 19

#### Проектирование электродинамического экрана

В данном предложении я хотел бы избавиться от длительных и ресурсоёмких этапов по созданию электродинамического экрана. А именно, предположим, если создать методику расчёта эффективности экранирования на первых этапах конструирования электродинамических экранов и более того, сделать компьютерное моделирование экрана, который полностью бы удовлетворял требованиям технического задания. Понятно, что это всё нужно реализовать в виде программного комплекса, который отдаётся конструктору.

Реализовать эту идею можно следующим образом. На первом этапе, после получения технического задания, конструктору уже не нужно сразу строить реальную физическую модель электродинамического экрана. А ему нужно её смоделировать в программе. Далее, если раньше конструктор отдавал физическую модель другим людям для расчёта эффективности экранирования то сейчас, с помощью этой программы он сразу, автоматически получает эффективность экранирования построенной им

модели. Это очень выгодно с точки зрения экономии большого количества времени, так как если раньше, после расчёта эффективности экранирования и если модель экрана не удовлетворяла требованиям технического задания, экран отправлялся обратно конструктору и этот процесс занимал большое количество времени. И этот цикл мог продолжаться большое количество раз.

В своей работе я использую аналитические методы расчёта эффективности экранирования, так как расчёт по ним очень прост и быстр. Да, пусть он не очень точен, но этим методом можно смело пользоваться на первом этапе проектирования конструктору. Он позволит избежать больших ошибок, которые он допускал раньше.

В итоге я пытаюсь объединить несколько этапов в один, который будет проходить только один человек.

Более детально эту методику я опишу в своей работе далее.

### **3.2. Программный комплекс оценки эффективности экранирования при конструкторском проектировании экранов.**

Метод расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов можно представить в виде следующего алгоритма (рис. 20):

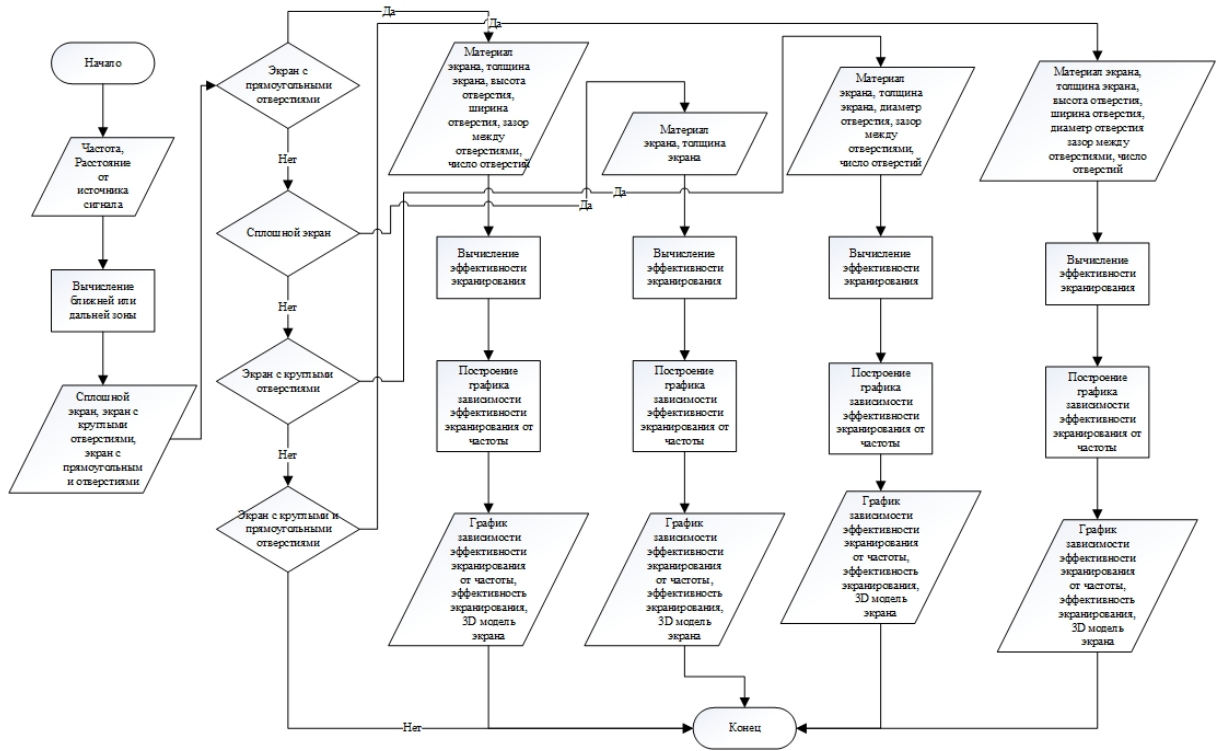


рис. 20

Алгоритм для расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов

В дополнение к этому алгоритму (рис. 20) предлагается алгоритм 3D моделирования электромагнитного экрана (рис. 21):

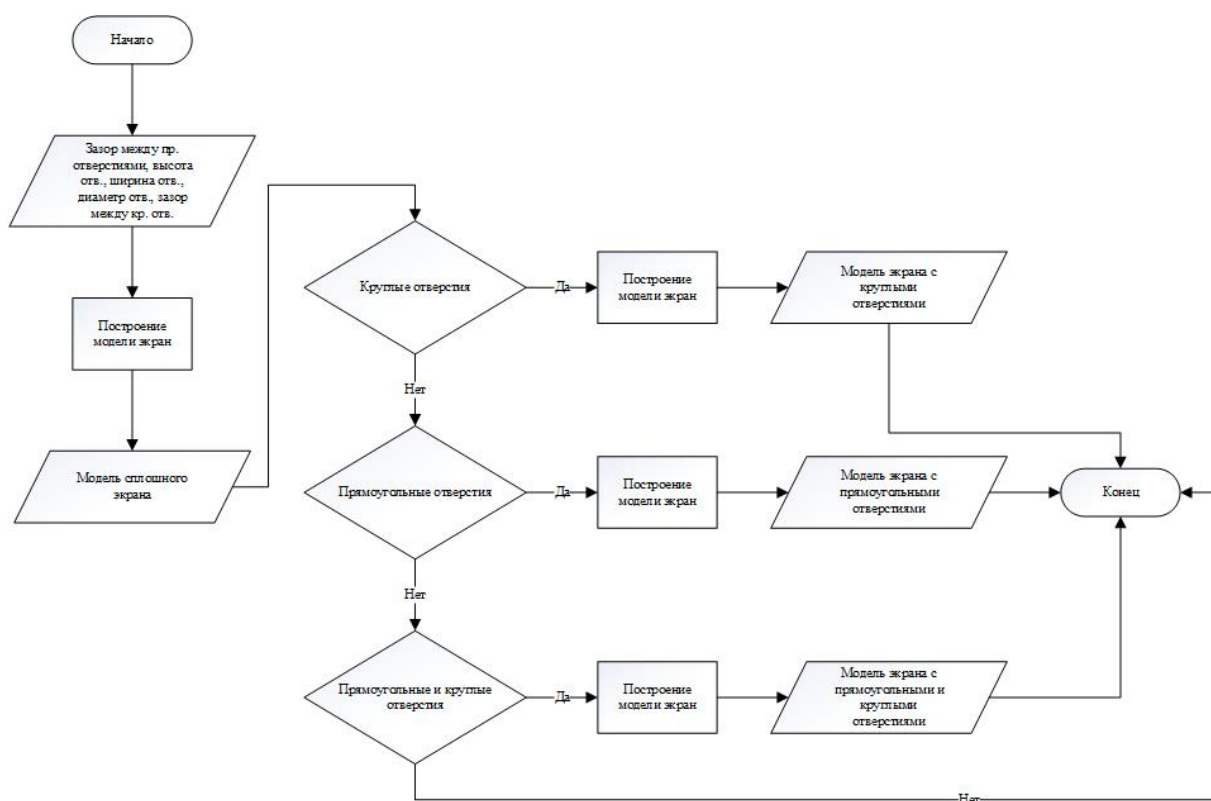


рис. 21

#### Алгоритм 3D моделирования электромагнитного экрана

В основе программного комплекса оценки эффективности экранирования при конструировании электромагнитного экрана лежит аналитический метод расчёта эффективности экранирования, рассмотренный выше.

На первом этапе вводится расстояние от источника до электромагнитного экрана для того, чтобы определить зону, в которой находится экран. Так как мы рассматриваем только дальнюю зону, то если получается так, что экран расположен в ближней зоне, то программный комплекс предупреждает об этом.

Если пользователь проходит проверку, то ему предлагается ввести тип экрана, как я уже рассматривал выше в данной работе, это может быть сплошной экран, экран с круглыми отверстиями, с прямоугольными щелями или экран, состоящий из всех трёх или двух зон.

Далее вводятся исходные данные, и происходит нужный расчёт (в зависимости от того, что было до этого выбрано).

В результате пользователь видит эффективность экранирования заданного им электромагнитного экрана. Также отображается график зависимости эффективности экранирования от частоты, для более наглядного представления защитных свойств экрана в зависимости от воздействующей на него частоты.

Алгоритм визуализации 3D модели экрана в реализации программного комплекса выглядит в виде отдельного модуля (своего рода подпрограммы). Здесь представлена графическая модель экрана, с изображением на ней апертур, которые были заданы в исходных данных. Хотя, не смотря на то что этап задания исходных данных был несколько раньше и более того он был в отдельном модуле, здесь пользователь может поправить исходные данные, а именно геометрические параметры самого экрана, т.е. его длину, ширину и высоту. А также пользователь может изменить геометрические параметры отверстий (диаметр для круглого отверстия, и длину и ширину для прямоугольной щели). Также можно и вовсе удалить не нужные отверстия или наоборот добавить. Помимо всего прочего пользователь может расположить отверстия в том месте экрана, в котором ему это нравится.

Следует заметить на то, что эти два модуля взаимозаменяемы. Т.е. изменения в одном, сразу же обновляются в другом и наоборот. Таким образом, организована своего рода синхронизация между этими двумя модулями, что создаёт особенное удобство в использовании данной программы.

В заключение этого раздела хочу опять заметить, что данный программный комплекс построен на основе аналитического метода расчёта эффективности экранирования, и он годится только на начальной стадии проектирования электродинамических экранов, что, как я уже говорил в данной работе, существенно сокращает процесс конструкторских работ, как по временным параметрам, так и по экономическим.

И одним из недостатков аналитического метода расчёта эффективности экранирования – это невозможность определения резонансной зоны. Поэтому я предлагаю способ определения частот, при которых будет появляться явление резонанса.

### 3.3. Резонансная зона электромагнитного экрана с апертурами

При аналитическом расчёте мы не учитываем явление резонанса. Но можно приблизительно вычислить частоту, при которой происходит резонанс.

Для достижения поставленной цели, нужно рассмотреть некоторые достоверные источники, в которых был произведён расчёт эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана и этот расчёт был подтверждён экспериментальными измерениями.

Рассмотрим экран с геометрическими размерами 30x12x30 см, толщиной экрана 4 мм и центральным отверстием размером 18x5 см. Вычисления [111, 116, 118] и измерения производились в частотном диапазоне от 500 МГц до 1200 МГц. Полученные значения эффективности экранирования видно на графике (рис. 22):

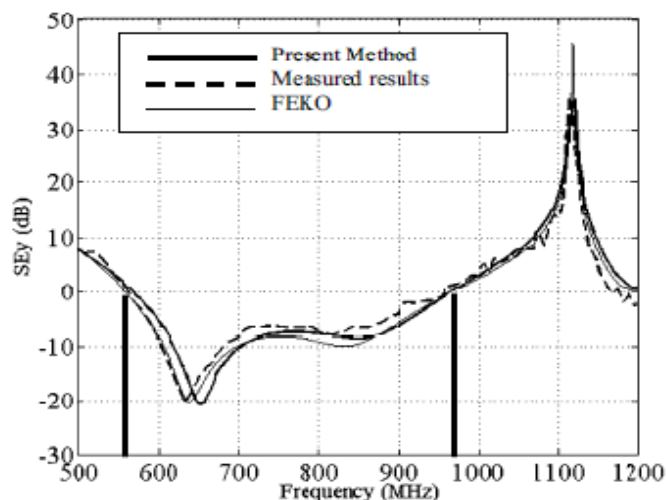


рис. 22

### Эффективность экранирования заданного экрана

На рисунке (рис. 22), при частотах от 560 МГц до 960 МГц, виден резонанс.

Аналогично произведём исследования для другого электромагнитного экрана (рис. 23).

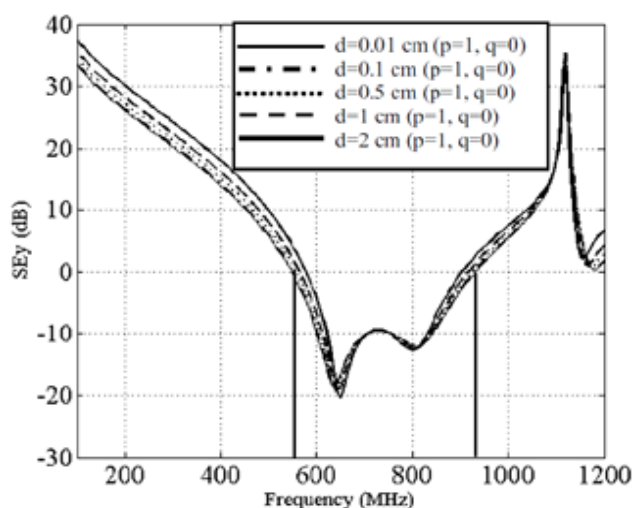


рис. 23

### Эффективность экранирования заданного экрана

Здесь (рис. 23) также видно, что эффективность экранирования перфорированного электромагнитного экрана мала в диапазоне частот от 570 МГц до 930 МГц.

Также можно рассмотреть экран со следующими геометрическими параметрами: 30x12x30 см, толщиной экрана 4 мм и центральным отверстием размером 10x0,5 см. Вычисления и измерения производились в частотном диапазоне от 100 МГц до 1200 МГц. Полученные значения эффективности экранирования видно на графике:

Рассмотрим экран с геометрическими размерами 30x12x30 см, толщиной экрана 4 мм и центральным отверстием размером 20x3 см. Вычисления и измерения производились в частотном диапазоне от 100 МГц до 1200 МГц. Полученные значения эффективности экранирования видно на графике (рис. 24):



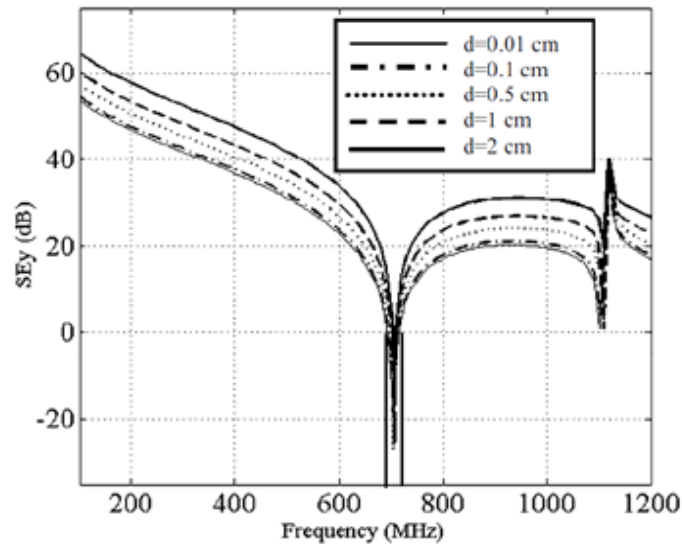


рис. 24

#### Эффективность экранирования заданного экрана

Здесь (рис. 24) видно, что эффективность экранирования перфорированного электромагнитного экрана мала в диапазоне частот от 670 МГц до 710 МГц.

Тем самым можно сделать следующий вывод:

Начало резонанса можно определить по формуле :

$$F = \frac{c}{n l} \quad (50)$$

Где

c - скорость света,

l - ширина отверстия,

n - число (1 или 2 или 4)

Продолжительность резонанса можно вычислить следующим образом :

$$F = 100 \frac{\text{МГц}}{\text{см}} \times h \text{ см} \quad (51)$$

Где

h – высота отверстия.

Подставив исходные данные в выведенные эмпирическим путём формулы, мы видим, что вычисленные значения приблизительно сходятся с измеренными значениями. В этих областях эффективность экранирования незначительна.

Таким способом можно рассчитывать частоты, при которых происходит резонанс. Следует отметить, что ширина резонанса не меняется на всём диапазоне частот.

### **3.4. Выбор и обоснование языка программирования**

В качестве языка программирования был выбран C++ Builder. Основанием для этого выбора послужили достоинства языка, позволяющие использовать его для:

1. работы со статистическими типами данных.
2. поддержания множества стилей программирования, таких как процедурное, объектно-ориентированное и обобщённое.
3. совмещения с языком Си
4. работы на разных платформах.

Язык позволяет, за счёт кроссплатформенной библиотеки компонентов CLX разрабатывать приложения для Windows, переносимые на платформу Linux с минимальными изменениями. Инструменты языка для платформы Linux обеспечивают совместимость приложений, использующих CLX компоненты на уровне кода. Интернет компонента NetCLX позволяет создавать кроссплатформенные приложения с использованием расширения API и CGI-сценариев для web- серверов Apache, Microsoft IIS и NetScape Web Server. Язык позволяет эффективно работать с корпоративными базами данных. Драйверы баз данных dbGo for ADO, dbExpress и BDE входящие в состав C++ Builder, обеспечивают эффективную работу приложений с такими СУБД как DB2, Informix, Oracle, Sybase, Microsoft SQL Server, MySQL, Access, Paradox и InterBase.

Широкий выбор элементов интерфейса даёт возможность быстро создавать прототипы приложений. [59] SQL Monitor и другие отладочные инструменты позволяют повысить производительность, масштабируемость и уменьшение времени отклика приложений баз данных. C++ Builder содержит обширный набор средств, для повышения производительности труда программистов. Многофункциональная интегрируемая среда разработки C++ Builder содержит компилятор, удовлетворяющий стандарту ANSI/ISO, встроенный дизайнер форм, богатый набор средств, для работы с компонентами, инструмент Object Inspector, менеджер проектов и отладчик.

Средства диагностического инструмента CodeGuard дают возможность:

1. автоматически устранять различные причины «утечек» памяти, включая неверные указатели и арифметические ошибки
2. обнаруживать и диагностировать ошибки распределения памяти
3. оперативной отладки нескольких процессов одновременно, что позволяет немедленно устранить ошибки исполнения

Новый многоцелевой менеджер проектов с открытой архитектурой обеспечивает полный контроль над исходными текстами и процессами сборки, что позволяет исследовать зависимость друг от друга модулей исходного кода и настраивать параметры компиляции, сборки и отладки для каждого из входящих в проект модулей. Эффективная поддержка автономных проектов на Си++ значительно расширяет возможности управления процессами разработки [60].

C++ Builder – это единственный компилятор C++, органично объединяющий среду разработки и приложения COM и CORBA для создания сложных систем на базе распределённых объектов. Компилятор предоставляет удобное средство разработки и отладки серверных COM- и CORBA- компонентов на языке Си++, которые могут взаимодействовать с

различными объектами и клиентскими приложениями Windows, Unix и Java. В комплект поставки C++ Builder входит лицензия разработчика для VisiBroker 4.5, позволяющая использовать лучший брокер объектных запросов для развёртывания корпоративных приложений на основе серверных объектов.

В языке C++ Builder объединяются высокоэффективная среда разработки на C++ с одной стороны и с другой стороны Borland InterBase – мощная кроссплатформенная реляционная база данных класса предприятия, удовлетворяющая стандарту SQL, отличающаяся простотой использования и низкой стоимостью обслуживания.

### **3.5. Выводы**

1. Рассмотрел современный подход к конструированию электромагнитных экранов, где было выявлено, что этот процесс занимает большое количество времени и ресурсов.
2. Разработан метод оценки эффективности экранирования при конструировании электродинамических экранов в виде программного комплекса, который заключается в том, чтобы на первом этапе конструирования электродинамического экрана, отказаться от создания реальной физической модели экрана, а смоделировать её в виртуальной среде. Более того, программный комплекс способен показать приблизительную эффективность экранирования, что существенно снижает количество конструкторских ошибок при проектировании экрана.
3. Разработан метод нахождения резонансной зоны эффективности экранирования неоднородных экранов на основе экспериментальных данных. Аналитический метод расчёта эффективности экранирования, который лежит в основе программного комплекса, не идеален, так как он не учитывает резонансную область экрана с

апертурами. Поэтому был предложен способ нахождения частот, при котором возникает резонанс.

4. Предложен язык программирования для написания программного комплекса по представленным в этой главе алгоритмам. Проанализировав существующие на сегодняшний день языки программирования, был выбран язык C++ .

## **Глава 4. Методика применения разработанного программного обеспечения по расчёту неоднородных электромагнитных экранов**

Для расчёта эффективности экранирования был создан программный комплекс SE Calculator.

### **4.1. Руководство пользователя**

Руководство пользователя программы SE Calculator

Назначение программы: программный комплекс SE Calculator предназначен для вычисления эффективности экранирования перфорированных электромагнитных экранов и построения 3-D модели экрана.

Условия выполнения программы: для корректной работы программы должны выполняться следующие минимальные системные требования:

- 32-разрядный (x86) или 64-разрядный (x64) процессор с тактовой частотой 1 гигагерц (ГГц) или выше;
- 512 мегабайт (Мб) оперативной памяти (ОЗУ);
- 10 мегабайт (Мб) пространства на жестком диске;
- графическое устройство DirectX 9 с драйвером WDDM версии 1.0 или выше.
- Операционная система: Windows XP/Vista/7/8
- Мышь, клавиатура

#### **Выполнение программы:**

Установка программы: запускаем установочный файл «setup.msi». Во всплывающем окне, вам нужно указать путь установки программы. Далее происходит установка. После того, как установка завершится, на рабочем столе вашего компьютера появится ярлык «SE Calculator». Далее вам

нужно нажать двойным щелчком мыши по ярлыку и войти в программу. Если по каким причинам ярлык не отобразился на рабочем столе, то для начала попробуйте нажать правой кнопкой мыши по свободному месту рабочего стола и из всплывающего меню выбрать пункт «Обновить». Если после этого действия, опять же, ничего не произошло, и ярлык не появился на рабочем столе, то вам нужно открыть папку, в которую вы установили программу и запустить файл «SECalculator.exe».

После входа в программу, перед вами появился основной экран программы (рис. 25)

рис. 25

#### Интерфейс программы SE Calculator

Программа была создана таким образом, чтобы все вводимые исходные данные были видны на одном экране, что позволяет посмотреть на весь результат в целом. Увидеть эффективность экранирования, посмотреть график зависимости эффективности экранирования от частоты, посмотреть исходные данные.

Далее нам нужно ввести исходные данные расчёта. Указать частоту и расстояние от источника до экрана и нужно указать тип отверстий на экране. После подтверждения введённых данных, путём нажатия на

кнопку «Ок», нам предлагается ввести дополнительные исходные данные для расчёта эффективности экранирования. Вне зависимости от того какие были выбраны отверстия нам предлагается выбрать материал экрана и его толщину. Если были выбраны круглые отверстия, то предлагается указать их геометрические параметры, такие как диаметр отверстий и зазор между круглыми отверстиями. Если выбраны прямоугольные отверстия, то нужно указать их высоту и ширину и также нужно указать расстояние между ними. После того, как введены все исходные данные, мы можем нажать на кнопку «Модель экрана» и откроется окошко с изображением заданного экрана. На этом этапе программы мы можем поменять геометрические параметры, как экрана, так и отверстий на нём. Также мы можем с помощью своеобразных джойстиков изменить расположение отверстий на нём. Таким образом, данная программа состоит из двух блоков. Первый с исходными данными, а второй с визуализацией экрана. Эти блоки взаимозаменяемы. То есть, при изменении данных в одном блоке, эти изменения отображаются в другом и соответственно наоборот. После того, как на первом блоке мы нажимаем на кнопку «Расчёт» мы видим эффективность экранирования заданного нами экрана. Если мы, после того, как посчитали эффективность экранирования, будем изменять какие-либо данные, то автоматически эффективность экранирования измениться, что является незаменимым атрибутом для того, чтобы понять какие параметры и как влияют на эффективность экранирования. Также строится график зависимости эффективности экранирования от частоты.

Чтобы выйти из программы нужно нажать на кнопку «Выход».

Программа создана таким образом, что если введены не правильные исходные данные, например, несоответствие типа переменной (в поле, где нужно ввести число, вводится текст), то выводится сообщение с подробным описанием ошибки и что нужно сделать, чтобы её исправить (рис. 26).[11]



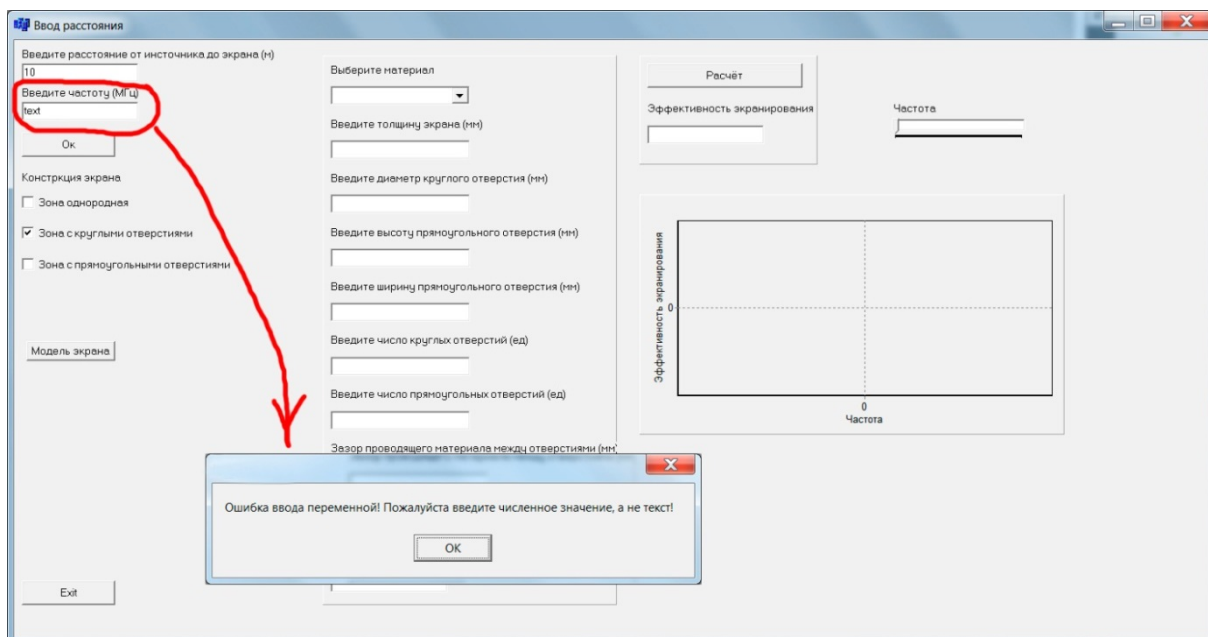


рис. 26

Интерфейс программы SE Calculator

## 4.2. Проверка адекватности расчёта эффективности экранирования

Из-за сложности проведения эксперимента, пришлось сравнивать полученные результаты с достоверными источниками.

Была написана статья [119], в которой были произведены расчёты эффективности экранирования перфорированного экрана численными методами, а также был произведён экспериментальный замер эффективности экранирования.

### Численные методы определения эффективности экранирования

В контексте использования методов FDTD рассмотрены два способа определения эффективности экранирования электрического поля проводящими экранами с апертурами.

Первый метод основан на возбуждении плоской волны и последующей процедуре:

1) создаем в камере возбуждение с помощью падающей пульсирующей плоской волны и регистрируем электрическое поле в интересующей нас позиции.

2) возбуждаем пустое пространство в вычисляемой области с помощью такой же падающей пульсирующей плоской волны и регистрируем электрическое поле в интересующей позиции.

3) преобразуем по Фурье данные, полученные во временной области.

4) вычисляем SE в децибелах по следующей формуле

$$S = 20 \log \left( \frac{\text{част.отв.пуст.про.}}{\text{част.отв.пробл.про.}} \right) \quad (52)$$

где частотный ответ определяется как величина интересующего компонента электрического поля.

При втором способе определения эффективности экранирования принимается, что возбуждение в камере создается датчиком, и далее расчеты проводятся, как при первом способе:

1. создаем в камере возбуждение с помощью датчика и находим поле временной области в дальней зоне под интересующим углом наблюдения, используя преобразование поля от ближней до дальней зоны временной области.
2. примем, что крышка и стенки камеры удалены, и только дно граничит с возбуждающим датчиком (формируя по существу геометрию монополя на экране). Находим его поле временной области в дальней зоне под интересующим углом наблюдения, используя преобразование поля от ближней до дальней зоны временной области.
3. преобразуем по Фурье данные временной области.
4. вычисляем эффективность экранирования.

Далее в статье представлены случаи, когда используется камера с крышкой и остальными стенками, будут называться случаи с камерой, а случаи, когда используется камера без крышки, будут называться случаи без камеры.

Полагая, что датчик значимо не влияет на распределение поля в камере, и распределение поля в центре камеры от крышки до дна является однородным, данные две формулы расчета эффективности экранирования можно считать приблизительно аналогичными. Основанием для расчета SE по второй процедуре является то, что он подходит для оборудования электромагнитной безэховой камеры Аризонского Государственного Университета. Таким образом, ожидается более высокое соответствие данных, полученных путем симуляции с помощью FDTD, с реальными данными.

### **Исходные данные эксперимента**

Была исследована эффективность экранирования экранов трех различных геометрических форм. Проводящий экран представляет собой ящик размерами 30 см (ширина)  $\times$  30 см (глубина)  $\times$  12 см (высота). Рассмотрены три конфигурации апертур. Единичная апертура размерами 20 см  $\times$  3 см, единичная апертура размерами 10 см  $\times$  0.5 см и обе эти апертуры, расположенные на противоположных стенках (рис. 27).

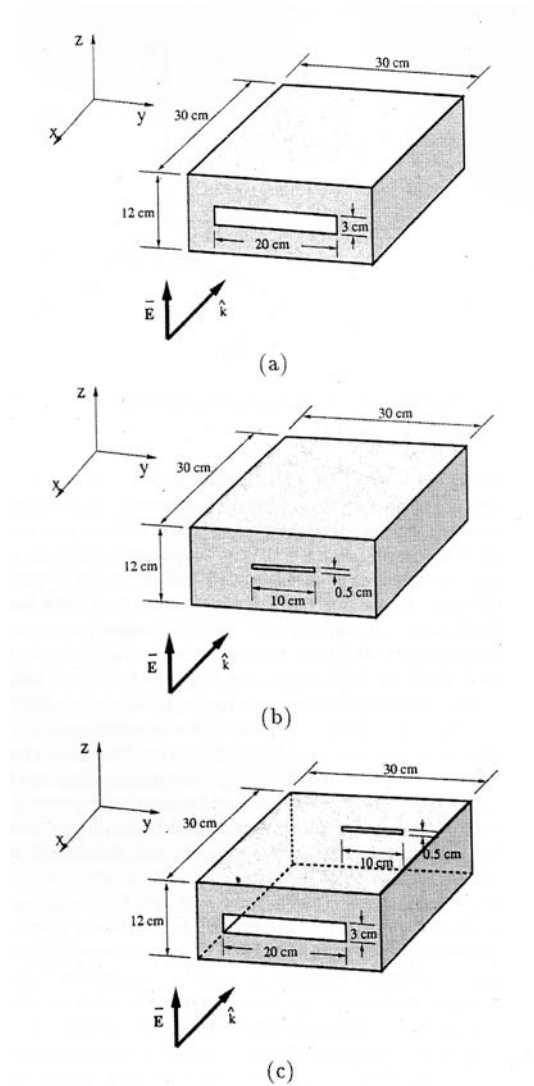


рис. 27

#### Исходные данные эксперимента

Представлен анализ вычислений эффективности экранирования с помощью FDTD метода в центре каждого из трех проводящих экранов. Когда использовалось возбуждение плоской волной, датчика в камере не было. В этом случае эффективность экранирования вычислялась в центре камеры для вертикально поляризованной волны, падающей на апертуру под углами  $\varphi_i$  и  $\theta_i$  (рис. 28 а). Соответственно, при использовании возбуждения с помощью датчика, присутствовал монополь, смонтированный на дне камеры. Датчик всегда находился в центре камеры, и имел длину 3 см, что соответствует измеряемой конфигурации. В этом случае датчик создает возбуждение в камере, и в отдаленной зоне

рассчитывается вертикальный компонент электрического поля при углах наблюдения  $\varphi_0$  и  $\theta_0$  (рис. 28 b).

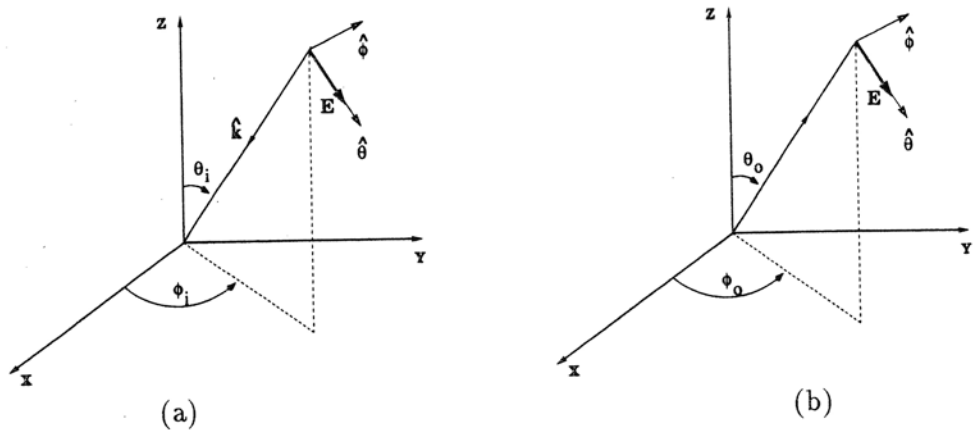


рис. 28

Также заметим, что в симуляциях с помощью FDTD, присутствующих в этой статье, использовалась ячейка размером 2.5 мм (или  $\lambda/80$  при 1.5 ГГц), за исключением исследований с применением скользящего окна. [9].

### **Процесс измерения эффективности экранирования в эксперименте**

Проводящий экран, описанный выше, сделан из латунных пластин. В местах соединения пластины были спаяны и снаружи покрыты медной лентой. Поскольку планировалось использовать более, чем одну конфигурацию с апертурами, фронтальная и задняя стенки были сконструированы как заменяемые панели с апертурами. Панели были сделаны с подгоняемыми выступами и монтировались так, чтобы в местах стыков устанавливались внахлест на переднюю и заднюю стенки. Схематически это показано ниже (рис. 29).

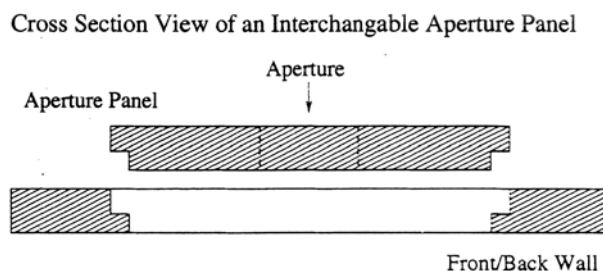


рис. 29

## Экран

Пленка из не отверждённой, содержащей серебро эпоксидной смолы использовалась на поверхности контактов между стенками и панелью с апертурой как гибкий RF-уплотнитель. Панель помещалась на место и опечатывалась медной лентой по наружным швам.

Были сконструированы 4 апертурных панели. Одна из сплошных панелей использовалась как задняя стенка в случаях, когда требовалась только одна апертура. Вторая сплошная панель использовалась вместе с первой для проверки точности экрана. Если улавливался значимый сигнал, когда были установлены обе сплошные панели, это указывало на неполное опечатывание экрана. В исследованном диапазоне частот электрическое поле, обнаруживаемое внутри экрана со сплошными пластинами, было едва ощутимо выше минимального уровня шума, и экран оценивался как лишённый значимых протечек. Одна из апертурных панелей имеет апертуру размерами 20 см шириной и 3 см высотой (рис. 27 а и с). Другая панель - апертуру размерами 10 см шириной и 0.5 см высотой (рис. 27 b и с).

Проволочный датчик (монополь) диаметром 0.021 дюйма (0.5334 мм) был смонтирован на дне для измерения электрического поля внутри ящика. Длина датчика первоначально составляла чуть больше половины высоты ящика (приблизительно 7 см). Однако измеренная первая резонансная частота в камере оказалась отличной от теоретической приблизительно на 30 МГц. Измеренная первая резонансная частота

возрастала по мере уменьшения высоты датчика до половины высоты камеры (3 см). При изменении высоты датчика около этой границы измеренная первая резонансная частота менялась очень мало и хорошо соответствовала первой теоретической резонансной частоте.

Процедура измерения эффективности экранирования производилась следующим образом. Дно экрана с датчиком электрического поля монтировалось на расширенную подставку из полистирола внутри безэховой камеры. Дополнительная антенна монтировалась на другую полистироловую подставку на расстоянии приблизительно 2.5 м от экрана. Дополнительная антенна выравнивалась по высоте, азимуту и поляризации. Поле, получаемое датчиком, измерялось как функция от частоты. Это измерение характеризует поле в месте предполагаемого расположения ящика (падающее поле). Любые эффекты горизонтального отражающего элемента, создающиеся дном ящика, игнорировались. Оставшиеся части ящика (конструкция, состоящая из крышки и стенок) пристраивались к дну. Затем измерялось поле, проникающее в ящик. Отношение падающих полей к проникающим полям и есть эффективность экранирования. Дно экрана с датчиком показано на рисунке (рис. 30), где на переднем плане видна дополнительная антенна.

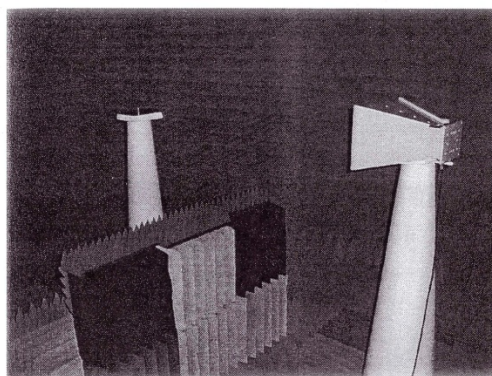


рис. 30

Дно экрана с датчиком

Произведены замеры в 801 точке в диапазоне частот от 250 МГц до 1.5 ГГц. Были рассмотрены три апертурные конфигурации, показанные на рис. 1. SE была измерена для каждой из трех апертурных конфигураций для ряда углов падения. Результаты, полученные при измерениях апертурных конфигураций, в двух случаях оказались идентичными полученным Robinson et al. , [4]. К ним относятся случаи с одиночными апертурами размерами 10 см  $\times$  0.5 см и 20 см  $\times$  3 см. В связи с ограничениями их оборудования эти измерения демонстрируют нулевое поле и колебания в 5 дБ. Измерения в Аризонском Государственном Университете демонстрируют значимое увеличение качества, о чем свидетельствуют заметное снижение разброса и более низкая нулевая зона[9].

### **Результаты измерений эксперимента**

В этом разделе исследована эффективность экранирования трех камер, представленная на рис. 27.

Для камер #1 (рис. 27 а) и #2 (рис. 27 б) использована нормально падающая на апертуру плоская волна в целях возбуждения камеры ( $\varphi_0 = 0^\circ$  и  $\theta_0 = 90^\circ$ ) или эквивалентно использована точка наблюдения в отдаленном вдоль нормали наружу к апертуре поле( $\varphi_0 = 0^\circ$  и  $\theta_0 = 0^\circ$ ).

Предсказания сравнивались с измерениями для камеры №1 на рис. 31.



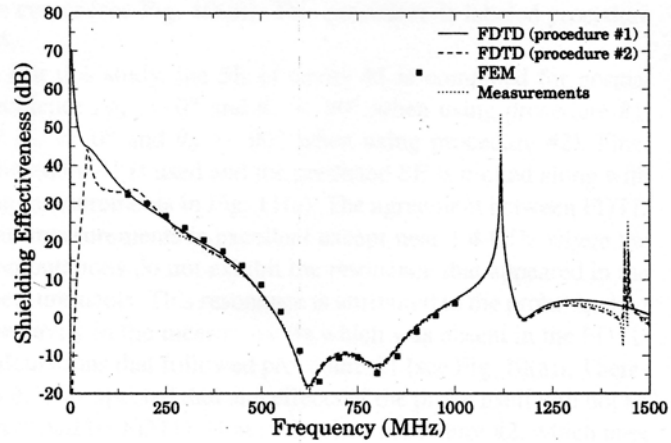


рис. 31

Эффективность экранирования для камеры №1

Сходные сравнения для камеры №2 показаны на рис. 32.

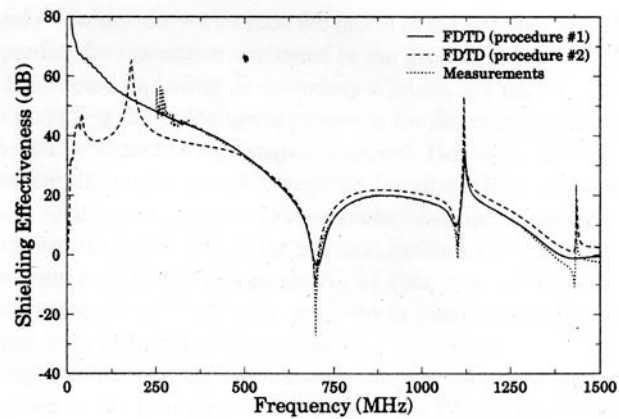


рис. 32

Эффективность экранирования для камеры №2

Наконец, для камеры №3, эффективность экранирования рассчитывалась для углов падения,  $\varphi_i$ , определяемым по различным азимутам и для угла подъема  $\theta_i = 90^\circ$  (описывающего плоскость  $x$   $y$ -координат). На рис. 33 показаны расчеты с помощью FDTD в сравнении с измерениями для различных углов  $\varphi_i$ .

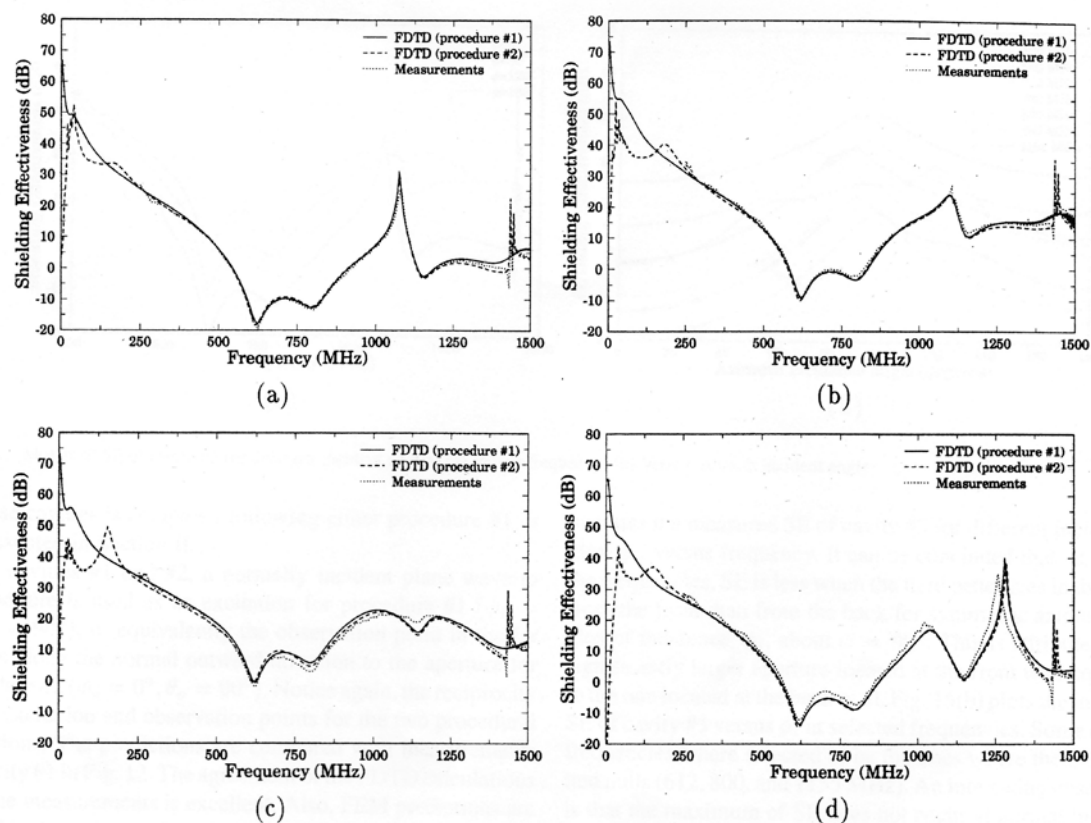


рис. 33

### Эффективность экранирования для камеры №3

Теперь, после того, как я рассмотрел, как проходил эксперимент в представленной статье, сравним значения, полученные в данном эксперименте, с полученными значениями в программе SE Calculator.

**Исходными данными для камеры №1** были следующие:

- Материал экрана – алюминиевый сплав,
- 1 отверстие,
- Ширина отверстия 200 мм,
- Высота отверстия 30 мм
- Измерения проходили в дальней зоне

**Исходными данными для камеры №2** были следующие:

- Материал экрана – алюминиевый сплав,
- 1 отверстие,
- Ширина отверстия 100 мм,

- Высота отверстия 5 мм
- Измерения проходили в дальней зоне

**Исходными данными для камеры №3** были следующие:

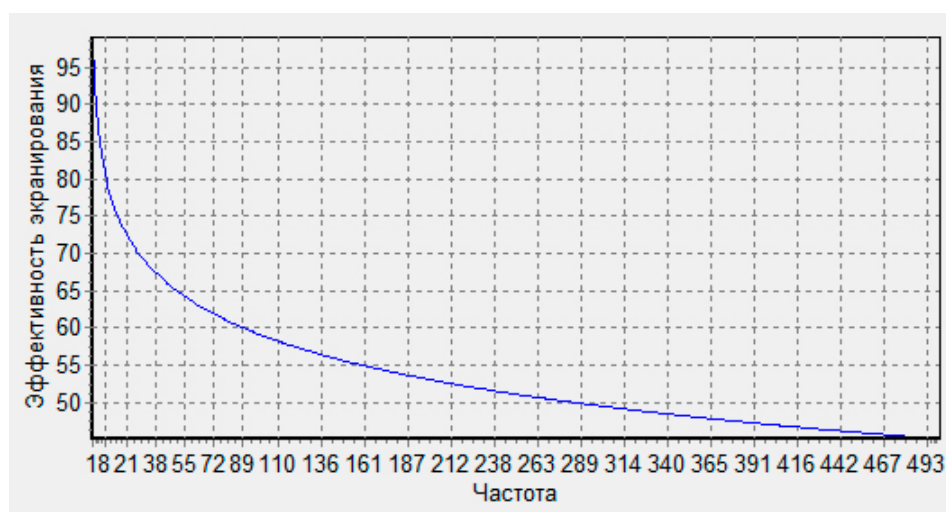
- Материал экрана – алюминиевый сплав,
- 2 отверстия,
- Ширина отверстия 100 мм,
- Высота отверстия 5 мм
- Измерения проходили в дальней зоне

Для камеры №1 (Таблица 4.2-1):

**Таблица 4.2-1**

Частота	125 МГц	250 МГц	375 МГц	500 МГц	1000 МГц
Эксперимент	40	35	25	15	10
SE Calculator	57	51	47	45	39

Полученный график зависимости эффективности экранирования от частоты в программном комплексе SE Calculator выглядит следующим образом (рис. 34)



**рис. 34**

**Зависимость эффективности экранирования от частоты**

Для камеры №2 (Таблица 4.2-2):

Таблица 4.2-2

Частота	125 МГц	250 МГц	375 МГц	500 МГц	1000 МГц
Эксперимент	60	53	48	44	30
SE Calculator	62	56	53	50	44

Полученный график зависимости эффективности экранирования от частоты в программном комплексе SE Calculator выглядит следующим образом (рис. 35):

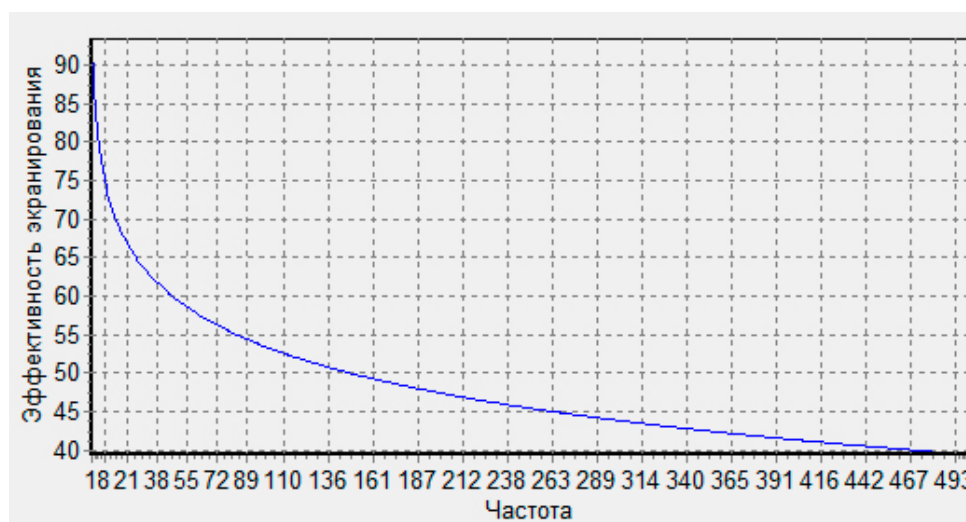


рис. 35

Зависимость эффективности экранирования от частоты

Для камеры №3 (Таблица 4.2-3):

Таблица 4.2-3

Частота	125 МГц	250 МГц	375 МГц	500 МГц	1000 МГц
Эксперимент	49	43	40	35	30
SE Calculator	63	57	53	51	45

Полученный график зависимости эффективности экранирования от частоты в программном комплексе SE Calculator выглядит следующим образом (рис. 36):

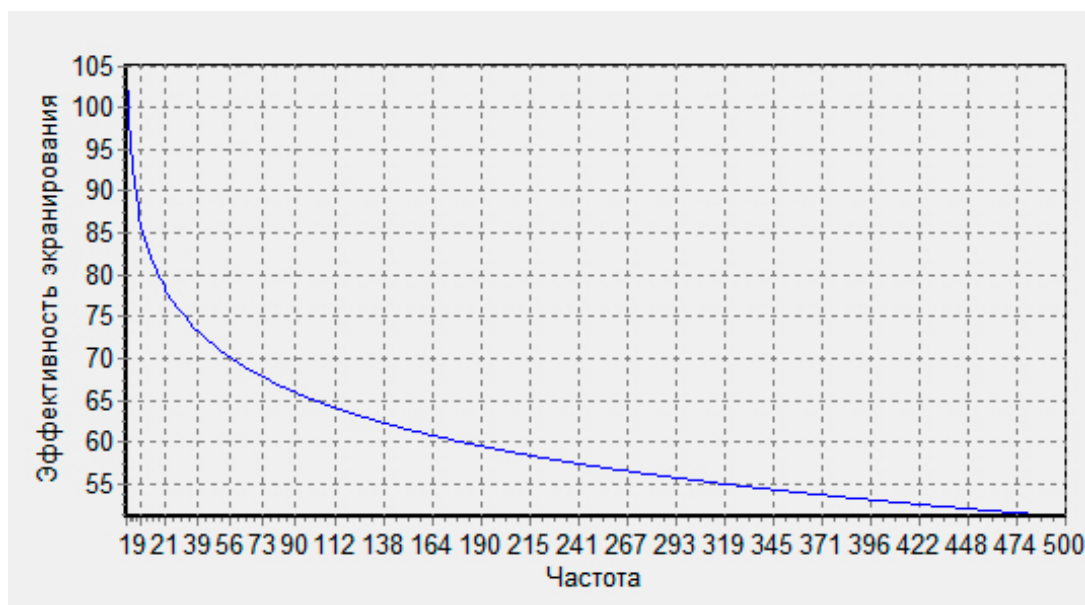


рис. 36

#### Зависимость эффективности экранирования от частоты

Также были взяты измерения из другой статьи [116].

Была исследована эффективность экранирования экрана с геометрическими параметрами 300 x 120 x 300 мм.

На данном экране находилось одно отверстие шириной 150 мм и высотой 50 мм.

Толщина экрана 1,5 мм.

Материал экрана был алюминиевый сплав.

Полученные экспериментальные значения отображены на графике (рис. 37):

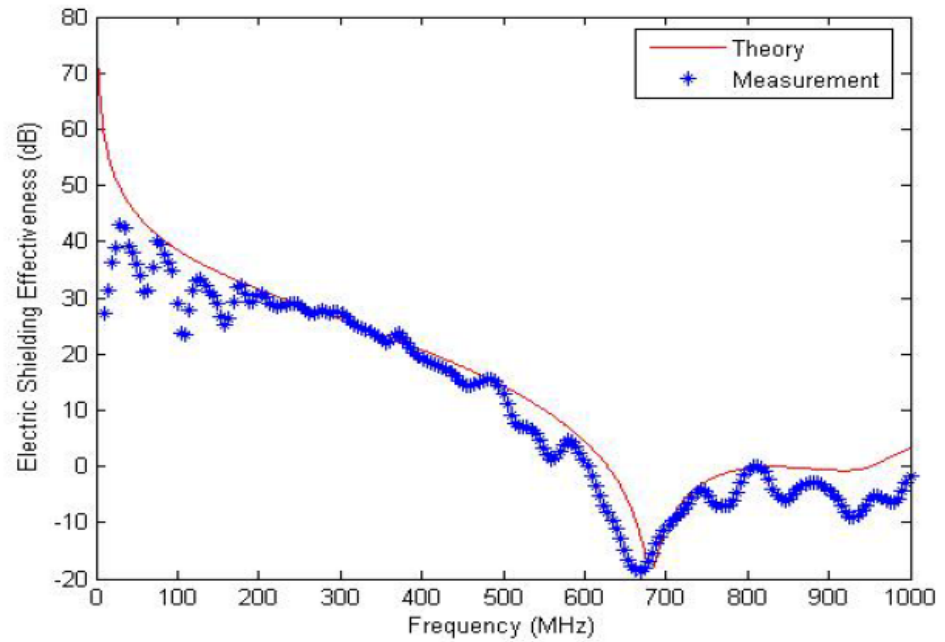


рис. 37

**Зависимость эффективности экранирования от частоты**

Полученные значения эффективности экранирования в эксперименте, со значениями, полученными с помощью программного комплекса SE Calculator, отображены в таблице (Таблица 4.2-4):

Таблица 4.2-4

Частота	100 МГц	200 МГц	300 МГц	500 МГц	1000 МГц
Эксперимент	40	35	34	25	15
SE Calculator	63	57	53	49	43

Полученный график зависимости эффективности экранирования от частоты в программном комплексе SE Calculator выглядит следующим образом (рис. 38):

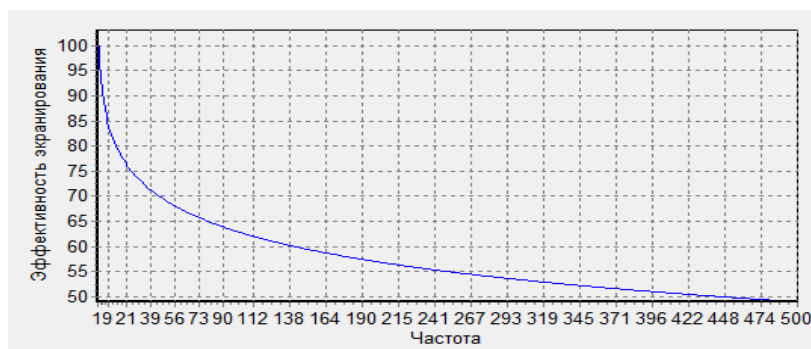


рис. 38

Зависимость эффективности экранирования от частоты

### 4.3. Развитие метода расчёта экрана с использованием «облачных технологий»

Облачные (рассеянные) вычисления (англ. cloud computing, также используется термин Облачная (рассеянная) обработка данных) — технология обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как Интернет-сервис. Пользователь имеет доступ к собственным данным, но не может управлять и не должен заботиться об инфраструктуре, операционной системе и собственно программном обеспечении, с которым он работает. Термин «Облако» используется как метафора, основанная на изображении Интернета на диаграмме компьютерной сети, или как образ сложной инфраструктуры, за которой скрываются все технические детали. Согласно документу IEEE, опубликованному в 2008 году, «Облачная обработка данных — это парадигма, в рамках которой информация постоянно хранится на серверах в интернет и временно кэшируется на клиентской стороне, например, на персональных компьютерах, игровых приставках, ноутбуках, смартфонах и т. д.».

Облачная обработка данных как концепция включает в себя понятия:

- инфраструктура как услуга,
- платформа как услуга,

- программное обеспечение как услуга,
- данные как услуга,
- рабочее место как услуга.

и другие технологические тенденции, общим в которых является уверенность, что сеть Интернет в состоянии удовлетворить потребности пользователей в обработке данных.

### **Сервисы облачных технологий**

- SaaS

Этот тип облачных технологий обеспечивает доступ тысячам клиентам на единое приложение через браузер. Поставщик разрабатывает веб-приложение и самостоятельно управляет им, предоставляя заказчикам доступ к программному обеспечению через Интернет. Выгода клиента в том, что это исключает его первоначальные вложения в серверы и дорогое программное обеспечение. Поставщику же модель SaaS позволяет эффективно бороться с нелегальным использованием программного обеспечения, поскольку само программное обеспечение не попадает к конечным заказчикам. Кроме того, концепция облачной технологии SaaS, позволяет уменьшить затраты на развёртывание и внедрение систем технической и консультационной поддержки продукта, хотя и не исключает их полностью.

- Utility computing

Идея не нова, но эта форма облачных технологий приобрела новую жизнь с Amazon.com, Sun, IBM и другими, предлагающими в настоящее время виртуальные серверы вычислительных ресурсов по принципу коммунальных услуг, доступ к которым клиент может получить в любое время. Выгода для Вас как клиента в том, что вы платите за вычислительные ресурсы и программное обеспечение только тогда, когда они вам действительно нужны. Концепция utility computing (UC) —



предоставление вычислительных ресурсов по принципу коммунальных услуг - позволяет добиться недостижимой ранее эффективности.

- Среда разработки как сервис

Другой вариант SaaS, эта форма облачных технологий обеспечивает среду разработки как сервис. Вы создаете собственные приложения, которые работают на инфраструктуре провайдера и доставляются пользователям через Интернет с серверов провайдера. Как и Legos, эти услуги ограничиваются дизайном поставщика и его возможностями, так что вы конечно не получаете полную свободу, но вы получите предсказуемость и предварительную интеграцию. Пример подобного сервиса Salesforce.com, Coghead и новый Google App Engine.

- MSP (управляемые услуги)

Одна из старейших форм облачных технологий, включает в себя процесс управления несколькими взаимосвязанными программами. В основном этим сервисом пользуются поставщики ИТ, а не конечные пользователи. MSP это управление программами, такими как антивирусная служба, электронная почта или служба мониторинга приложений.

- Service commerce platforms

Эта услуга гибрид SaaS и MSP, сервис, входящий в облачные технологии предлагает услуги из центра, с которым пользователи в дальнейшем взаимодействуют. Данный сервис наиболее распространен в условиях торговли. Позволяет пользователям, например, заказать билеты для путешествия или секретарские услуги из общей платформы, которая затем координирует предоставление услуг и цен в допустимых пределах заданных пользователем. Работает этот сервис как автоматизированное бюро обслуживания. Для примера можно привести Rearden Commerce и Ariba.

- Интернет интеграция

Интеграция облачных услуг в одно целое. Сегодня, облачные технологии включают в себя большое количество изолированных друг от друга облачных ИТ-услуг, к которым клиенты должны подключаться по отдельности. С другой стороны, современные ИТ технологии просто пронизывают предприятие, поэтому идея связанных между собой сервисов, запущенных на гибкой, масштабируемой инфраструктуре должно в конечном итоге сделать каждое предприятие одним из узлов в большом облаке. Это конечно длительный тренд с далеко идущими последствиями. Но среди имеющихся трендов в облачных технологиях, является, пожалуй, одним из самых трудно оспариваемых.

### **Использование SE Calculator в облачных технологиях**

Работа с помощью SE Calculator возможна «в облаке». Идея заключается в том, что на серверной части установлен и оптимально настроен данный программный продукт. Также написана клиентская часть, задача которой заключается всего лишь в обмене информацией между клиентом и сервером. Клиент вводит исходные данные, они передаются на сервер. Исходя из определения термина облачных технологий – сервер берет на себя все вычисления и в итоге высылает обратно клиенту результат. Также благодаря облачным технологиям, программу можно использовать, как своего рода социальную сеть в области электромагнитной совместимости, благодаря чему появилась возможность общения и обмена опытом, как между профессионалами, так и новичками, чего не было пока реализовано не в одной аналогичной программе.

### **Разработка алгоритма развития метода расчёта экрана с использованием облачных технологий**

При разработке алгоритма развития научных работ в области электромагнитной совместимости стоит начать с основ, а именно как видят развитие научного знания такие философы как Карл Раймунд Поппер, Имре Лакатос и Пол Карл Фейерабенд.

Процесс исторического развития науки по Попперу [Карл Поппер «Логика научного исследования»] можно описать следующим образом: существует некоторая проблема, затем выдвигается теория, предлагающая ее решение, теория подвергается критике и рано или поздно терпит неудачу, вследствие чего возникает новая проблема, более глубокая и сложная.

Эту концепцию можно представить в виде простой схемы (рис. 39):

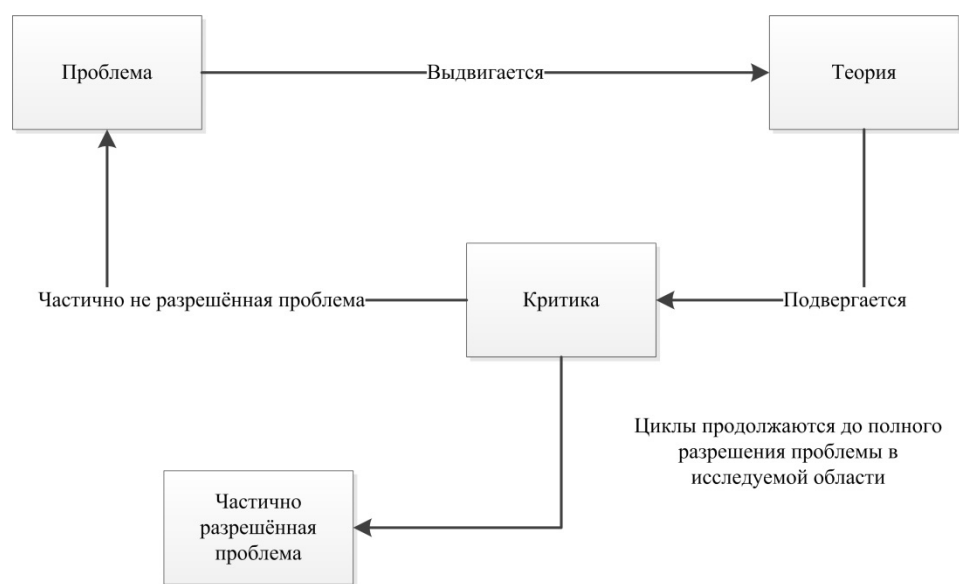


рис. 39

#### Процесс исторического развития науки по Попперу

Имре Лакатос представляет развитие научного знания следующим образом [Имре Лакатос «методология научно-исследовательских программ»]: в основе лежит «твёрдое ядро». Оно защищено от изменений «отрицательной эвристикой», т.е. оно неизменно при любых обстоятельствах, это своего рода цель, к которой надо прийти или её доказать. Вокруг ядра образуются «защитный пояс», который состоит из гипотез. Эти гипотезы поддаются постоянным проверкам, цель которых опровергнуть основную теорию (ядро). С другой стороны на гипотезы действует «положительная эвристика» и происходит своего рода верификация вспомогательной теории, что еще сильнее укрепляет её позиции. Чем больше вспомогательных гипотез, прошедших верификацию

или проверки, тем более развито научное знание. Это хорошо можно проследить на следующей схеме (рис. 40):

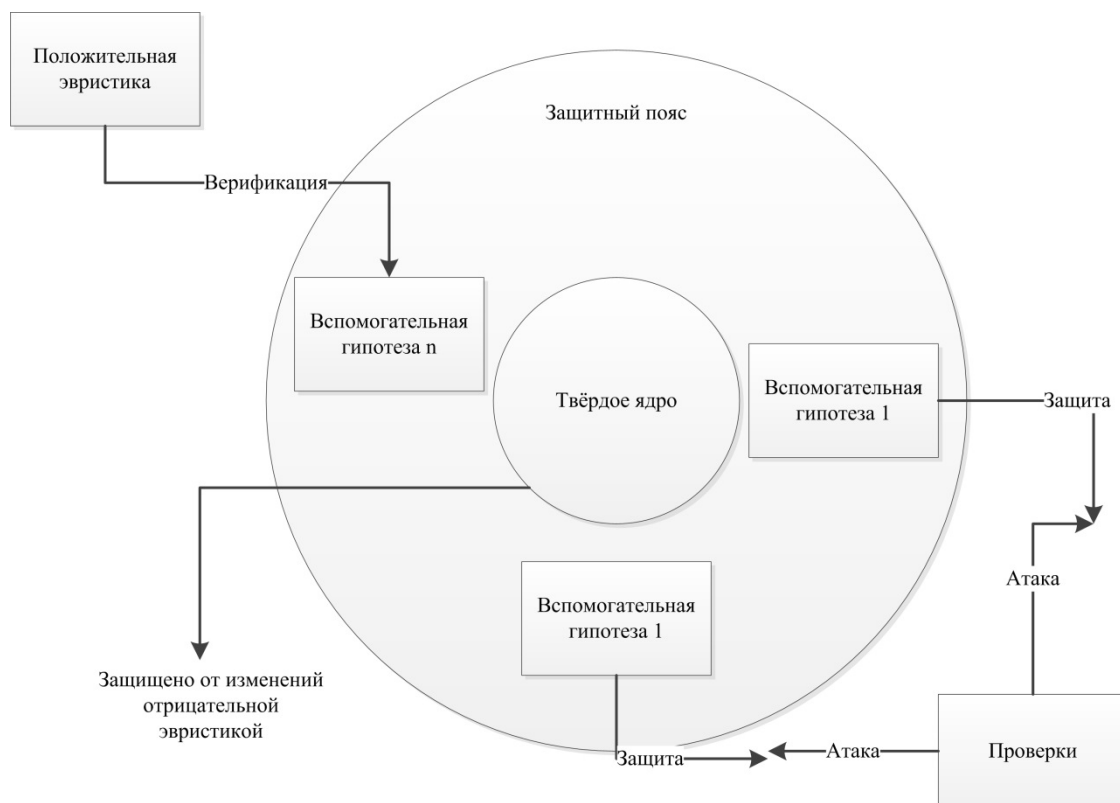


рис. 40

#### Развитие научного знания по Имре Лакатосу

Теперь рассмотрим, как представляет рост научного знания Пол Карл Фейерабенд.

По его мнению, развитие науки состоит из двух блоков:

1. Защита творческих позиций, максимально используя все их сильные стороны, не пасуя перед возникающими трудностями
2. Создание теорий, альтернативных общепризнанным

По его мнению, единственный важный принцип для науки «Anything goes» - пригодно всё, что способствует успеху. Рациональность, если она выступает как система ограничений творческих способностей, интеллектуальной и духовной свободы, должна быть отвергнута. Всё это также можно представить в виде схемы (рис. 41):



рис. 41

#### Развитие научного знания по Полу Карлу Фейерабенду

Опираясь на исследования, проведённые мной в области философии, которая рассматривает рост научного знания, можно предложить следующий алгоритм развития научного знания в области ЭМС, с использованием современных подходов и инструментов, а именно, с использованием «облачных технологий» и реализацией в виде программного продукта (рис. 42).

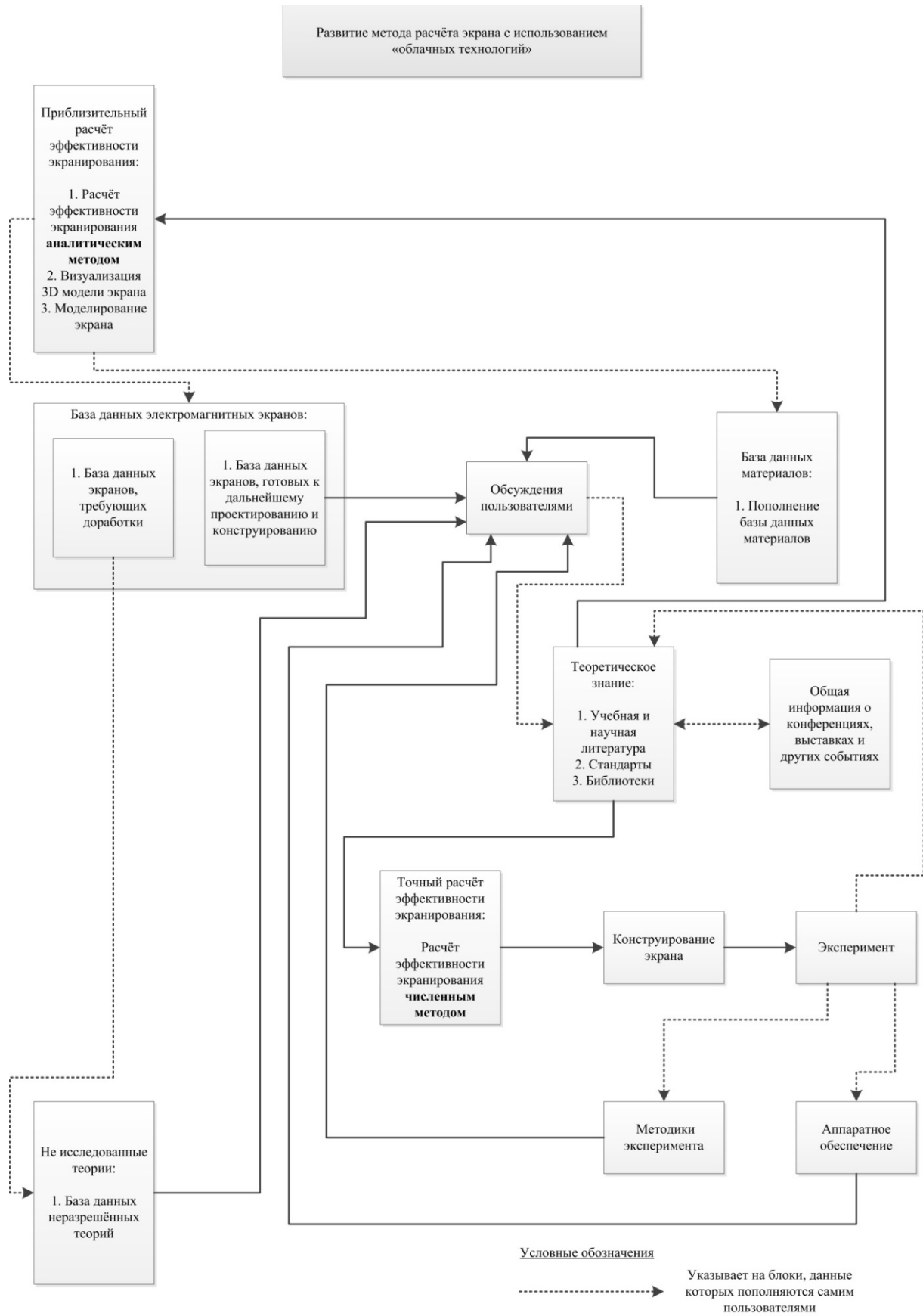


рис. 42

Развитие метода расчёта экрана с использованием облачных технологий

## **Описание алгоритма развития метода расчёта эффективности экранирования с использованием облачных технологий**

Перовое, с чего следует начать, это этап под названием «Приблизительный расчёт эффективности экранирования». В данном случае, я предлагаю начать с приблизительного расчёта эффективности экранирования аналитическим методом, который нам поможет отсеять большое количество экранов, не удовлетворяющем требованиям технического задания. Мы можем задать исходные данные и получить примерную эффективность экранирования экрана, который мы собираемся спроектировать и в будущем сконструировать. После вычисления, мы получим график зависимости эффективности экранирования от частоты. Также на этом этапе мы можем смоделировать, как влияют на эффективность экранирования изменения тех или иных исходных данных. На этом этапе появляется возможность построить 3D модель экрана, на котором станет понятно, как влияют геометрические параметры экрана на эффективность экранирования, а также как на это влияет расположение отверстий.

На этом этапе, при задании исходных данных для расчёта эффективности экранирования, нам требуется задать материал, который будет использоваться при конструировании экрана. Исходя из этого, логически напрашивается следующие два этапа, назовём их «База данных материалов» и «Обсуждения пользователями».

На этапе «База данных материалов» мы можем увидеть, какие материалы экранов существуют на сегодняшний день, а также нам открывается возможность самим пополнить базу данных материалов. Таким образом, этот этап интересен тем, что это своего рода энциклопедия по экранирующим материалам, и что самое важное, что эту энциклопедию наполняет информацией не один человек, а всё сообщество профессионалов в области электромагнитной совместимости в целом.

Далее наступает этап «Обсуждения пользователями». Это своего рода форум, в котором пользователи обсуждают экранирующие материалы, дают свои рекомендации и высказывают отрицательные стороны тех или иных материалов.

Теперь, когда мы выбрали и обсудили материал будущего электромагнитного экрана, который, по мнению пользователей, больше не будет претерпевать никаких изменений, мы должны занести его в некую базу знаний. Тем самым мы переходим к следующему этапу алгоритма «Теоретическое знание».

На данном этапе («Теоретическое знание») мы пополняем одну большую базу знаний по электромагнитной совместимости. Так как до этого мы шли по пути освоения экранирующих материалов, то на данном шаге мы пополняем всего лишь маленькую часть этого блока, а именно пополняем существующие экранирующие материалы.

Теперь вернёмся назад к этапу «Приблизительный расчёт эффективности экранирования». Предположим, что мы задали все исходные данные, нашли нужный нам экранирующий материал. Далее мы просто производим расчёт и получаем приблизительный результат – эффективность экранирования нашего экрана, также мы на данном этапе смогли визуализировать будущий экран. И предположим, что данные, которые получили, нас устраивает. Тогда мы переходим к следующему этапу – «База данных электромагнитных экранов».

На данном этапе, нам предлагается запомнить готовую модель нашего экрана, со всеми исходными данными. Причём, что самое важное, на этом этапе могут быть представлены как экраны, полностью удовлетворяющие требованиям заказчика, так и экраны, требующие доработки. И все эти экраны формируются в две базы данных. Из-за этого, на этом шаге у нас опять есть два пути развития. Начнём с базы данных экранов, готовых к дальнейшему проектированию и конструированию.



Если экран удовлетворил требованиям, то мы его выносим на суд пользователей, тем самым переходим на этап «Обсуждения пользователями».

На данном этапе пользователи обсуждают готовые экраны, задают вопросы и делятся своим мыслями по улучшению или по выявлению каких-либо неточностей, которые пропустил автор. И далее мы переходим к следующему, уже известному нам этапу «Теоретическое знание»

Так как мы получили что-то новое, то это новое нам нужно запомнить в архив. В данном случае этот архив представлен в виде этапа «Теоретическое знание». Опять же, мы пополняем только маленькую часть этого архива, так как рассматривали готовые к дальнейшему моделированию и конструированию экраны.

Если требуемый экран показал хорошие характеристики в приблизительном расчёте, мы дополнили им базу данных экранов, вынесли на суд других профессионалов в области ЭМС на этапе «Обсуждения пользователями», исходя из обсуждений, мы привнесли что-то новое в теоретическое знание, то далее нам нужно более точно смоделировать экран. Мы переходим к следующему шагу «Точный расчёт эффективности экранирования».

На этом этапе нам предлагается вычислить эффективность экранирования более точно, а именно одним из представленных численных методов. После получения результатов, переходим к следующему этапу – «Конструирование экрана».

На данном этапе наша модель экрана превращается в реально существующий экран. Далее нам нужно проверить его эффективность в реальных условиях, и мы переходим на этап «Эксперимент».

На этом этапе мы проводим практические исследования по эффективности экранирования экрана. И эти исследования также заносятся в общий архив на этапе «Теоретическое знание». Благодаря этим

исследованиям появляются на свет новые методики эксперимента, и предлагается новое аппаратное обеспечение, которое помогает более эффективно провести эксперимент. Тем самым из этапа «Эксперимент» получается ещё два этапа: «Методики эксперимента» и «Аппаратное обеспечение».

На этих этапах, мы формируем базы данных по методикам и аппаратному обеспечению. Также выдвигаем новые позиции на суд всех профессионалов в области ЭМС на этапе «Обсуждения пользователями» и также пополняем теоретическое знание на одноимённом этапе.

Теперь вернёмся назад, на этап «Приблизительный расчёт эффективности экранирования». Если по условию технического задания, не удаётся смоделировать экран, а именно получить требуемую эффективность экранирования, то появляется на свет «База данных экранов, требующих доработки». Эта база данных формируется на вытекающем отсюда этапе - «База данных электромагнитных экранов». Причины, по которым появляются новые экраны, требующие доработки мы можем рассмотреть на следующем этапе - «Не исследованные теории».

Эти теории так же выносятся на суд профессионалов на этапе «Обсуждения пользователями» и полученные результаты записываются в «Теоретическое знание». Так как над недоработанным экраном, уже постарался не один человек, а целое сообщество экспертов, то приняв все рекомендации можно вернуться на этап приблизительного расчёта и попробовать снова смоделировать экран и посчитать его приблизительную эффективность экранирования.

В данном алгоритме есть также ещё один автономный этап «Общая информация о конференциях, выставках и других событиях». На этом этапе, как и на многих других, пользователи размещают объявления о предстоящих событиях и о последних достижениях, которые были представлены на этих мероприятиях. После этого этапа следует сразу же

этап «Теоретическое знание», на котором эти достижения вносятся в общую базу знаний, посвящённой электромагнитной совместимости.

Следует особенно отметить, что вся информация, которая появляется в данной реализации, пополняется всем сообществом профессионалов в области электромагнитной совместимости, а не одним человеком или малой группой людей.

Как и везде можно выделить свои плюсы и минусы данной реализации, да и технологии, в целом:

Начнём с положительных аспектов:

- Не нужно устанавливать и настраивать программный продукт для корректной работы. Нужно запустить один файл и всё сразу будет готово к работе.
- Возможность пользоваться программным продуктом на практически любой конфигурации компьютера.
- Минимальный объём вмешательства программного продукта в операционную систему, благодаря чему не задействованы лишние службы и процессы, и загрузка системы практически равна 0 и тем самым ресурсы клиентского компьютера параллельно могут быть задействованы на решение других задач.
- Пополняемая база данных материалов экрана всеми пользователями SE Calculator, тем самым свежая версия базы материалов всегда под рукой.
- Возможность делиться моделями экранов с другими пользователями (также предусмотрена возможность их комментировать). Эта возможность открывает новые горизонты общения между конструкторами. Появляется возможность спросить совета не у одного человека, а у целого сообщества, рассмотреть все возможные решения и выбрать именно то, что вам нужно.

- Программа может работать также на вашем смартфоне или планшете.

Ну и минусы, к сожалению, тоже есть:

- Для получения всех сервисов программного продукта нужно постоянное подключение к сети интернет.

#### **4.4. Выводы**

1. Представил руководство пользователя программным комплексом SE Calculator. Это руководство позволит начинающим пользователям довольно быстро разобраться в программном комплексе и как можно быстрее начать работу.
2. Произвел расчёт эффективности экранирования перфорированного электромагнитного экрана и сравнения полученных результатов с результатами, полученными в эксперименте, проведённом в Аризонском Государственном Университете; с результатами расчётов, проведёнными различными численными методами; а также с экспериментами, опубликованными в других статьях. В итоге было показано, что результаты, полученные аналитическим методом приблизительно схожи с результатами, полученными в эксперименте.
3. Разработан алгоритм, позволяющий развить метод расчёта эффективности экранирования с использованием «облачных технологий», который позволит намного продуктивнее и более качественно разрабатывать новые электромагнитные экраны, а также быть в курсе последних событий в мире электромагнитной совместимости.

## Заключение

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Выполнен анализ проблемы ЭМС и экранирования, как средства обеспечения ЭМС. Выявлено, что ужесточаются требования помехозащищённости электромагнитных средств, постоянно развивается нормативная база, увеличивается мощность и расширяется спектр непреднамеренных и преднамеренных электромагнитных излучений. Из этого можно сделать вывод, что совершенствование расчётных моделей экранов, учитывающих реальные особенности конструкций, автоматизация процесса расчёта и встраивание процедуры проектирования экрана в процедуру конструирования аппаратуры, является актуальной проблемой.
2. Выполнен литературный обзор, посвящённый методам расчёта эффективности экранирования. Было выявлено, что все аналитические методы, в отличие от численных методов, рассматривают бесконечно протяжённый экран без каких либо неоднородностей.
3. Разработан алгоритм расчёта эффективности экранирования неоднородного электромагнитного экрана, как процедуры интегрированного проектирования экрана. В основу этого метода лёг коэффициентный метод расчёта эффективности экранирования, который учитывает наличие прямоугольных и круглых отверстий.
4. Разработан алгоритм визуализации, как процедуры интегрированного этапа проектирования. Благодаря этому алгоритму, конструктор на первых этапах проектирования электромагнитного экрана, может построить графическую 3D модель электромагнитного экрана, что существенно облегчает дальнейшие конструкторские работы.

5. Разработан метод нахождения резонансной зоны эффективности экранирования неоднородных электромагнитных экранов на основе экспериментальных данных. Этот метод очень полезен, так как аналитические методы расчёта эффективности экранирования не предусматривают область резонанса. Благодаря этому методу можно определить, на каких частотах будет происходить явление резонанса и в расчёте не учитывать эти частоты.
6. Разработан алгоритм корпоративного проектирования на базе «облачных технологий». Этот алгоритм позволяет профессионалам в области электромагнитной совместимости существенно проще взаимодействовать между собой, находясь в разных концах мира, обсуждать те или иные вопросы в области электромагнитной совместимости, а также самим пополнять базу знаний, включающую в себя литературу, статьи журналов, а также объявления о предстоящих конференциях и встречах.
7. Разработан программный комплекс «SE Calculator», в основу которого легли представленные в работе алгоритмы. Благодаря этому программному комплексу, было наглядно продемонстрировано, насколько существенно быстрее может происходить проектирование и конструирование электромагнитных экранов.

На основании вышеизложенных результатов можно заключить, что цель, поставленная в начале исследования, выполнена.

## Список литературы

1. Уильямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. - М.: Издательский дом "Технологии", 2004. - 508 с.
2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. - М.: Издательский дом "Технологии", 2004. - 540 с.
3. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering, WILEY, 2009. – 862 p.
4. Paul C.R. Introduction on Electromagnetic Compatibility/ - Wiley Inter-Science, 1999. - 766 p.
5. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. - М: Радио и связь, 1989. - 224 с
6. EMI Shielding Engineering Handbook [Electronic Recourse] : Catalog. – Chomerics, 2000. – 22 p. – <http://www.chomerics.com>.
7. Brewer R. Design Consideration for Minimalizing Large Aperture Effects in Shielding // ITEM. 2000. P. 193-200
8. Bill Sheldon, Billy Hollis. Professional Visual Basic 2010 and .NET 4. Wrox. 2010.
9. Кечиев Л.Н., Степанов П.В. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникации. - М.: Издательский дом "Технологии", 2005. - 320 с.
10. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. 238 с., ил.
11. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. – 2010 г. – 470 с.; ил. – (Библиотека ЭМС)
12. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol 43, No 3 august 2001

13. Xingcun Colin Tong, Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding: CRS Press, 2009. – 342 p.
14. Conductive Elastomer Gasket Design, Chomerics: [www.chomerics.com](http://www.chomerics.com)
15. Gasket design guide, Gore-Shield: [www.gore.com](http://www.gore.com)
16. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т.1. Элементарная теория и задачи. - М.: Наука, 1965.- 364с., ил.
17. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т.2. Более сложные вопросы теории и задачи. - М.: Наука, 1965.- 480с., ил.
18. М.Ф. Астахов, А.В. Кураваев, Справочная книга по расчету самолета на прочность – М.: ГИОП, 1954. – 683 с.
19. Кечиев Л.Н., Кузьмин В.И. Требования к установке прокладок для обеспечения внутриаппаратурной ЭМС // Новое в ЭМС.: сб. науч. тр. – М.: Изд-во МИЭМ, 1997. – С. 59-67
20. Xingcun Colin Tong, Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding: CRS Press, 2009. – 342 p.
21. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник; Под ред. Л.А. Контаков – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
22. Демский Д.В., Фомина И.А., Марченко М.В. «Автоматизация расчёта эффективности экранирования» Технологии ЭМС, №1 (44) 2013, с. 44 – 54.
23. Гусева Ю.А., Кармашев В.С., Кечиев Л.Н. Основы технического регулирования в области ЭМС. - М.: "Европейский центр по качеству", 2004. - 149 с.
24. ГОСТ 2789-73, Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
25. Christopoulos, Christos. Principles and techniques of electromagnetic compatibility / Christos Christopoulos. -- 2nd ed. 536 p.



26. Roger Marshall. All about powerboats: understanding design and performance. McGraw-Hill Professional, 2002, ISBN 0071362045, 9780071362047.
27. Дубицкий С.Д., ELCUT 5.1 – Платформа разработки приложений анализа полей. – Exponenta Pro. Математика в приложениях, №1(5) 2004 г. с.
28. Roy, A.K., and Kim, R.Y. "Experimental Determination of Transverse Shear Stiffness of a Thick Laminate." 1989 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics. May 29-June 1, Cambridge, Mass., 1989.
29. Nahas, M.N. "Survey of Failure and Post-Failure Theories of Laminated Fiber-Reinforced Composites." 'Journal of Composites Technology and Research, vol. 8, pp. 138-153, 1986.
30. Pagano, N.J. "On the Significance of Effective Modulus Solutions for Fibrous Composites." Journal of Composite Materials, vol. 8, pp. 214-228, 1974b.
31. Акбашев А.А., Кечиев Л.Н., Соколов А.Б. Эффективность экранирования перфорированных экранов // Технологии электромагнитной совместимости. - Москва, изд-во ООО «Издательский Дом «Технологии». – 2008. - № 2(25), С. 19-25.
32. Производство изделий из полимерных материалов ред. В.К. Крыжановского, изд. Профессия, Спб 2004
33. Chou, P.C., Carleone, J., and Hsu, CM. "Elastic Constants of Layered Media." Journal of Composite Materials, vol. 6, pp. 80-93, 1972.
34. Основы производства базальтовых волокон и изделий. Д. Д. Джигирис, М. Ф. Махова. М.: Теплоэнергетик, 2002. — 416 с.
35. Ли Г., Невилл К, Справочное руководство по эпоксидным смолам, пер. с англ., М., 1973.
36. Браутман Л., Крок Р. Современные композиционные материалы. – М.: Мир, 1970. – 672 с.

37. White, Donald R.J. A Handbook on Electromagnetic Interference and Compatibility Gainsville, Va: Don White Consultants, 1987. – 870 p.
38. Радиотехнические изделия «НПО Стеклопластик» <http://www.arms-expo.ru/site.xp/049057054050124051054048051.html>
39. Rooney M. Advanced Materials: Challenges and Opportunities // JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST, VOLUME 21, NUMBER 4 (2000) P. 516-527
40. Paul, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility / Clayton R. Paul.- 2nd ed. 1013 p.
41. Leland H. Hemming, Architectural Electromagnetic Shielding Handbook, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. – 244 p.
42. Tsai, S.W., and Wu, E.M. "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials", Journal of Composite Materials, vol. 5, pp.58-80, 1971.
43. Дубицкий С.Д. ELCUT – Конечно-элементный анализ низкочастотного электромагнитного поля. – EDA Express, 12 октября 2005. - с. 24-29
44. Шапиро Д.Н., Основы теории электромагнитного экранирования - Л.: «Энергия», 1975. – 106 с.
45. KaZaK Composites <http://kazakcomposites.com/>
46. KaZaK Composites <http://kazakcomposites.com/>
47. Koefoed Michael. Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades. Special Report No. 50, Institute of Mechanical Engineering, Aalborg University, Denmark, January 2003, ISSN 0905-2305.
48. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов, - М.: Издательство «Мир», 1979. – 392с.
49. SolidWorks [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)
50. Christensen, R.M. "Tensor Transformations and Failure Criteria for the Analysis of Fiber Composite Materials", Journal of Composite Materials, vol. 22, pp.874-897, 1988.

- 51.Salamon, M.D.G. "Elastic Moduli of Stratified Rock Mass," International Journal of Rock Mechanics Mineral Science, pg. 519,1968.
- 52.Rytov, S.M. "Acoustical Properties of a Thinly Laminated Medium," Soviet Phys. Acoustics, Vol. 2, pg. 68,1956.
- 53.Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М., изд-во МГУ, 1984.
- 54.Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина, кн.1, - М.: Машиностроение, 1988. - 448 с.
- 55.Carbon Foam from Touchstone Research Laboratory  
<http://www.cfoam.com/emishielding.htm>
- 56.Углеродные волокна и углекомполиты, под ред. Э. Фитцера, пер. с англ., М., 1988
- 57.Celozzi, Salvatore. Electromagnetic shielding / Salvatore Celozzi, Rodolfo Araneo, Giampiero Lovat.375 p.
- 58.Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие для вузов / Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. [и др.] ; общ. ред. Берлина А. А. - СПб.: Профессия, 2008.
- 59.А. А Берлин Современные полимерные композиционные материалы// Соросовский образовательный журнал, 1995, № 1, С. 59.
- 60.Ansys в руках инженера: Практическое руководство. Изд. 2-е, испр. М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272с.
- 61.Roy, A.K., and Tsai, S.W. "Three-Dimensional Effective Moduli of Orthotropic and Symmetric Laminates." Journal of Applied Mechanics, vol. 59, March, 1992.
- 62.Andrei Ushakov, Yuri Klenin, Sergey Ozerov. Development of modular arched bridge design // Proceedings of 5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5). Irvine, CA, USA. 2008. p. 95-101.

63. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. – М.: Недра. 1972. – 288 с.
64. Achenbach, J.D. "The Layered Medium as a Homogeneous Continuum with Microstructure," Technical Report AFML-TR-70-27, Air Force Materials Laboratory, 1970.
65. Golio M. RF and microwave applications and systems / CRS Press – 692 p.
66. Углеродные волокна и углекомпози́ты, под ред. Э. Фитцера, пер. с англ., М., 1988
67. Промышленные полимерные композиционные материалы: пер. с англ. /Под ред. Бабаевского П.Г. – М., 1980. – 427 с.
68. Behrens E. "Sound Propagation in Lamellar Composite Materials and Averaged Elastic Constants," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 42, pg. 378, 1967.
69. White, J.E., and Angona, F.A. "Elastic Wave Velocities in Laminated Media," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 27, pg. 311, 1955.
70. Postma, G.W. "Wave Propagation in a Stratified Medium." Geophysics, Vol. 20, pg. 780, 1955.
71. Enie, R.B., and Rizzo, R.R. "Three-Dimensional Laminate Moduli." Journal of Composite Materials, vol. 4, pp. 150-154, 1970.
72. Pagano, N.J. "Exact Moduli of Anisotropic Laminates." In G.P. Sendeckyj, editor, Mechanics of Composite Materials, chapter 2, pp. 23-44, Academic Press, 1974a.
73. Sun ,C.T. and Li, S. "Three-Dimensional Effective Elastic Constants for Thick Laminates." Journal of Composite Materials, vol. 22, pp. 629-639, 1988.
74. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004 год. 628 стр.
75. Hahn, H.T., and Kallas, M.N. "Failure Criteria for Thick Composites", BRL-CR-691, June 1992.

- 76.W. S. JOU A Novel Structure of Woven Continuous-Carbon Fiber Composites with High Electromagnetic Shielding, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 33, No. 3, 2008
- 77.ELCUT. Руководство пользователя. – Производственный кооператив TOP, Санкт-Петербург, 2005. - 257 с.
- 78.ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.5. ПК “TOP”, Санкт-Петербург, 2007
- 79.Whitney, J.M., Daniel, I.M., and Pipes, R.B. "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials." The Society for Experimental Stress Analysis, Brookfield Center, Connecticut, 1982.
- 80.Design Guidelines for Shielding Effectiveness, Current Carrying Capability, and the Enhancement of Conductivity of Composite Materials/ NASA Contractor report 4784/ - 1997. - 61 p/
  - a. «Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков» / Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. – М.: Мир, 2002. – 368 с.
- 81.Sengupta D.L., Liepa V.V. Applied electromagnetic and electromagnetic compatibility, WILEY, 2006 – 511 p.
- 82.Brandner, T. et al: “CFRP Electronics Housing for a Satellite”, Proceedings of European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, Noordwijk, May 10-12, 2005.
- 83.Hahn, H.T., and Kallas, M.N. "Failure Criteria for Thick Composites", BRL-CR-691, June 1992.
- 84.Чернушенко А.М., Конструкции СВЧ устройств и экранов: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
- 85.«Углеродные волокна»: Пер. с япон./Под. Ред. С.Симамуры. – М.: Мир, 1987 – 304 с.
- 86.Рогинский В.Ю. Экранирование в радиоустройствах. Л., «Энергия», 1986. 112 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 725)

87. Пластики конструкционного назначения, под ред. Е. Б. Тростянской, М., 1974.
88. Фенольные смолы и материалы на их основе, А. Кноп, В. Шейб, 280 с. М. Химия 1983.
89. Sun, C.T., Achenbach, J.D., and Herrmann, G. "Continuum Theory for a Laminated Medium," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pg. 467, 1968.
90. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / Гл. ред. А.Г. Братухин. М: ОАО «НИЦ АСК», 2008. 608 с.: илл.
91. Дубицкий С.Д., Поднос В. Г., ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей. – CADMaster. – 2001. – 1. – с. 17-21
92. Bastos J., Sadowski N. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, Marcel Dekker – 497 p.
93. Tsai, S.W. *Composites Design*, Forth Edition, Think Composites, Dayton, Ohio, 1987.
94. Whitney J.M. "Structural Analysis of Laminated Anisotropic Plates." Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1987.
95. СОВМЕСТИМОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ ЭМС- 2009, С. 111-112
96. Стекланные волокна. Под ред. М.С.Аслановой, М. Химия, 1979, с.203.
97. Седов Л. Н., Михайлова З. В., Ненасыщенные полиэфиры, М., 1977.
98. Сафонов А.А., Демский Д.В. «Автоматизированная методика построения 3-d модели электромагнитного экрана с учётом требуемой эффективности экранирования.» Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Тезисы докладов. 2009, с. 196.

99. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617918 «Расчёт эффективности экранирования электромагнитных экранов (SE Calculator)»
100. Демский Д.В. «Алгоритм расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов» Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Тезисы докладов. 2011, с. 213.
101. Демский Д.В., Лафишев М.А. «Расчёт эффективности экранирования неоднородных экранов» Технологии ЭМС, №2 (37) 2011, с. 55 – 56.
102. Демский Д.В., Лафишев М.А. «Алгоритм расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов» 9-й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Труды симпозиума. 13-16 сентября 2011 г, с. 141 – 142.
103. Демский Д.В. «Расчёт эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов» Материалы международной научно-практической конференции «Инфо 2011», с 253 – 255
104. Демский Д.В. «Применение CALS-технологий для расчёта эффективности экранирования неоднородных электромагнитных экранов» Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвящённая 50-летию МИЭМ. Тезисы докладов. 2012, с. 269.
105. Демский Д.В. «Особенности эффективности экранирования неоднородных электромагнитных экранов» Информационные технологии в науке, бизнесе и образовании. IV международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных.
106. Демский Д.В. «Реализация алгоритма расчёта эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов с использованием CALS-технологий» Системы управления

- беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами. Тезисы докладов II всероссийской научно-технической конференции Москва, 24 – 26 октября 2012 г.
107. Демский Д.В., Фомина И.А., Марченко М.В. «Автоматизация расчёта эффективности экранирования» Технологии ЭМС, №1 (44) 2013, с. 44 – 54.
  108. Журавлёв И.Н., Кечиев Л.Н., Крючков Н.М., Савин Ю.В., Демский Д.В. «Специализированный измеритель напряжённости электрического поля для измерения эффективности экранирования» Технологии ЭМС, №1 (44) 2013, с. 23 – 28.
  109. Qu Zhaoming ; Electrostatic & Electromagn. Protection Inst., Mech. Eng. Coll., Shijiazhuang, China ; Wang Qingguo ; Cheng Erwei ; Jia Rui / Simulation and experiment research on shielding effectiveness of enclosure using Reverberation Chamber / Environmental Electromagnetics, 2009. CEEM 2009. 5th Asia-Pacific Conference on
  110. Dehkhoda, P. ; Inst. of Telecommun. & Appl. Electromagn., Amirkabir Univ. of Technol., Tehran, Iran ; Tavakoli, A. ; Moini, R. / A fast modal MoM based technique to evaluate the shielding effectiveness of a non-zero thickness enclosure with rectangular apertures / Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th Canadian Conference on
  111. Po'ad, F.A. ; Center for Electromagn. Compatibility, Kolej Univ. Teknologi Tun Hussein Onn ; Zarar Mohamed Jenu, M. ; Christopoulos, C. ; Thomas, D.W.P. / Analytical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure with off-centered apertures / Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006. 17th International Zurich Symposium on
  112. Armstrong, R. ; Dept. of Electron., Univ. of York, York, UK ; Marvin, A. ; Dawson, J. / An experimental investigation of the use of Q-factor to



- determine the shielding effectiveness of electrically large equipment enclosures with apertures / EMC Europe 2011 York
113. Xu Xiao-ying ; Sch. of Sci., Wuhan Univ. of Technol., Wuhan, China ; Wang Hui ; Deng Qing-lin ; Xiao Ji-xiong / Experimental study and theoretical analysis on shielding effectiveness of enclosure with aperture / Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on (Volume:3 )
  114. Olyslager, F. ; Dept. of Inf. Technol., Ghent Univ., Belgium ; Laermans, E. ; De Zutter, D. ; Criel, S. / Numerical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure / Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on (Volume:41 , Issue: 3 )
  115. Zarar Mohd Jenu, M. ; Kolej Univ. Teknologi Tun Hussein Onn, Parit Raja ; Po'ad, F.A. / Electric and magnetic shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures / Microwave Conference, 2006. APMC 2006. Asia-Pacific
  116. Farhana Ahmad Po'ad ; Center for Electromagn. Compatibility, Kolej Univ. Teknologi Tun Hussein Onn, Johor ; Mohd Zarar Mohd Jenu ; Christopoulos, C. ; Thomas, D.W.P. / Estimation of Electric and Magnetic Shielding Effectiveness of a Metallic Enclosure with Apertures / RF and Microwave Conference, 2006. RFM 2006. International
  117. Po'ad, F.A. ; Center for Electromagn. Compatibility, Kolej Univ. Teknologi Tun Hussein Onn ; Zarar Mohamed Jenu, M. ; Christopoulos, C. ; Thomas, D.W.P. / Analytical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure with off-centered apertures / Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006. 17th International Zurich Symposium on
  118. Stavros V. Georgakopoulos, Student Member, IEEE, Craig R. Birtcher, and Constantine A. Balanis, Fellow, IEEE / HIRF Penetration Through

Appertures: FDTD Versus Measurements / IEEE Transactions On  
Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No. 3, August 2001