

Особенности экранирования металлических корпусов

С ПОМОЩЬЮ КОНТАКТНЫХ ПРУЖИН

Рейнхард Микш
(Dipl.-Ing. Reinhard Miksch)

proemv@proemv.de

Перевод:
Аксель Бретц (Axel Braetz)

Для соблюдения существующих строгих норм по ЭМС при производстве приборов, как правило, приходится использовать экранирующий эффект металлических корпусов, которые обеспечивают как повышение устойчивости работы самого прибора, так и снижение создаваемых им помех.

Экранирующие свойства корпусов приобретают в настоящее время все большее значение, так как производители приборов используют разнообразные блоки и подсистемы различных поставщиков, на которых они не могут влиять в вопросах соблюдения ЭМС. Внесение изменений в поставленное оборудование в большинстве случаев также невозможно. Это требует комплексного решения возникающей проблемы. Одним из перспективных подходов к ее решению является использование экранирующих свойств металлических материалов. В настоящее время экраны широко применяются в кабельных устройствах, печатных платах, локальных блоках, корпусах, помещениях и, вместе с абсорберами, в больших измерительных залах.

Что касается металлических корпусов, то их экранирующие свойства зависят от характера воздействующего поля. Статические и медленно изменяющиеся магнитные поля (до нескольких кГц) практически не экранируются металлическими корпусами, так как последние не содержат ферромагнитных материалов, то есть не содержат никаких элементарных магнитов, способных ориентироваться во внешнем поле.

От всех других полей (включая высокочастотные магнитные поля) металлические корпуса оказывают экранирующее действие, которое вызывается вихревыми токами в металлических стенах.

Экранирующее действие металлических материалов основывается на том, что электромагнитные поля проникают в экран и индуцируют там заряды или токи, собственные поля которых накладываются на порождающее поле и частично компенсируют его. При этом не играет роли, является ли экранирующий корпус источником помехи или ее приемником. Фактор экранирования Q — это мера эффективности экрана, который рассчитывается как отношение напряженности поля без экрана к напряженности поля с экраном. Для магнитного поля он определяется как $Q_H = H_0 / H_S$, а для электрического — $Q_E = E_0 / E_S$.

Фактор экрана является, как правило, комплексным числом.

В практических расчетах используют затухание экрана, которое определяется как логарифмическое отношение обратной величины фактора экрана:

$$a_S = 20 \lg (1 / |Q|)$$

и измеряется в дБ.

Электромагнитные поля разделяют на статические и переменные. Переменные поля дополнительно подразделяют на квазистационарные поля (медленно изменяющиеся поля) и электромагнитные волны (быстро изменяющиеся поля).

Особенность квазистационарных полей состоит в том, что их временная зависимость так незначительна, что любое изменение поля мгновенно становится заметным во всей рассматриваемой области, и, таким образом, картина поля при определенных значениях напряжения и силы тока идентична картине статического поля при тех же значениях напряжения и тока. Они представляют собой временную последовательность статических полей равного пространственного распределения $E_y(x, y, z)$ и, соответственно, $H_y(x, y, z)$, которые отличаются лишь постоянным множителем по их интенсивности. Из-за ограничения «в рассматриваемой области поля...», определение «медленно» — относительно и является вопросом удаленности от создающей данное поле установки (антенны). Если наблюдатель находится в непосредственной близости от антенны, в так называемом «ближнем поле», то он воспринимает стационарное (пространственно фиксированное) квазистатическое поле. А конкретно в случае вибраторной антенны — квазистатическое электрическое поле, в случае рамочной антенны — квазистатическое магнитное поле. В ближней области поле изменяется равнозначно, то есть всюду одновременно усиливается или ослабевает.

Квазистатические поля обладают очень незначительной временной зависимостью.

Аналитический расчет действия электромагнитных экранов выводится из решения уравнения Максвелла для пространства внутри и вне экрана, а также в материале самого экрана. Этот метод очень эффективен, но также предъявляет очень высокие требования к математическому аппарату. Поэтому на практике широко распространен, вопреки его недостаткам, метод импеданса по Шелкунову.

Эта модель экранирующего затухания основывается на аналогии с распространением волн перенапряжения в электрически длинных двухпроводных линиях. При этом в телеграфных уравнениях, описывающих такие линии, комплексные напряжения заменяются комплексными напряженностями электрического поля, а комплексные токи заменяются комплексными напряженностями магнитного поля.

Подобно тому, как волны перенапряжения на концах длинных линий частично отражаются, частично пропускаются и соответственно затухают вдоль линий, то же самое происходит с электромагнитными волнами на краях свободного пространства либо внутри материала.

Бескрайний экран, перпендикулярный к направлению распространения плоской волны, вызывает эффекты, эквивалентные потерям в отрезке линии с высоким волновым сопротивлением.

Эта аналогия представлена на рис. 1.

Экранирующее затухание S состоит из нескольких частей:

$$S = R + A + B,$$

где R — отражательное затухание на граничных плоскостях a и i , A — поглощающее затухание, вызванное ослаблением внутри экрана (вихревые токи, преобразование в тепло), B — слагаемое коррекции, которое учитывает многократные отражения в экране.

Отражательное затухание (рис. 2) может выражаться непосредственно константами материала (таблица 1).

Таблица 1

«Дальнее» поле ($r \gg \lambda, / 2\pi$)	$R = 108 - 101g \frac{\mu_r f}{\sigma_r}$
Электрическое «ближнее» поле	$R = 142 - 101g \frac{\mu_r f^3 r^2}{\sigma_r}$
Магнитное «ближнее» поле	$R = 75 - 101g \frac{\mu_r}{f \sigma_r r^2}$

При этом используются следующие единицы измерения: R в дБ, f в МГц, r в м, μ_r — относительная магнитная проницаемость, σ_r — относительная проводимость меди.

Некоторые примеры показателей относительной магнитной проницаемости и относительной проводимости различных металлов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Материал	Монометалл	Железо	Нерж. сталь	Алюминий	Легун	Медь	Медь-бериллий
μ_r	50000	200	50	1,00	1,00	0,99	1,00
σ_r	0,03	0,17	0,03	0,62	0,35	1,00	0,22

Поглощающее затухание (рис. 3) описывает ослабление электромагнитной волны при ее прохождении через материал экрана. В упрощенной форме оно может рассчитываться по следующей формуле:

$$A = 1314 d \sqrt{f \mu_r \sigma_r},$$

где используются следующие единицы измерения: A в дБ, f в МГц, d в см, μ_r — относительная магнитная проницаемость, σ_r — относительная проводимость меди.

Слагаемое коррекции B , учитывающее многократные отражения, играет роль при величине поглощающего затухания $A < 10-15$ дБ. Так, для медного экрана толщиной 1 мм это условие выполняется только на частотах меньше 10 кГц, а для аналогичного железного экрана при частотах — меньше 200 Гц. Таким образом, зачастую мы можем им пренебречь.

Повторное отражение волн от пограничного слоя a заметно влияет на фактические величины выходящей волны (из E_i и H_i).

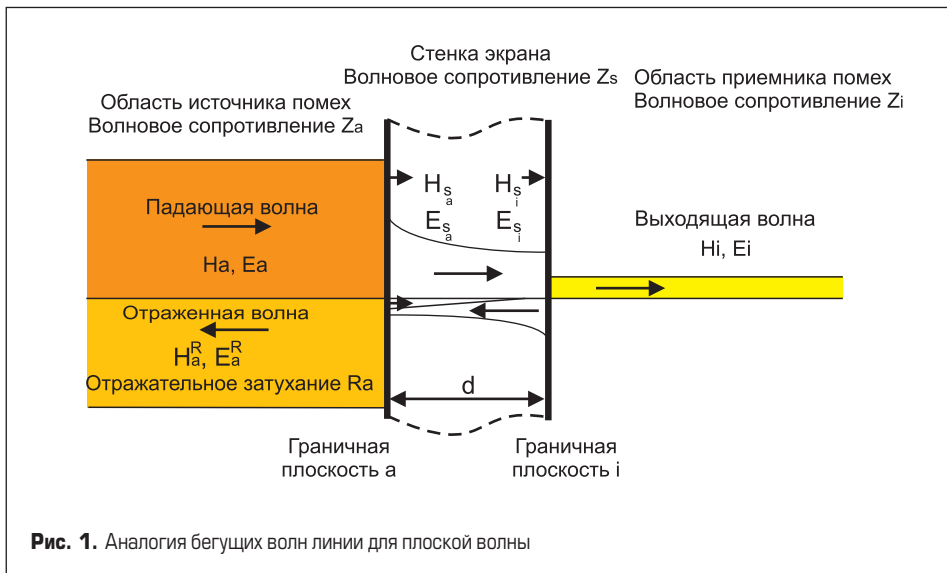


Рис. 1. Аналогия бегущих волн линии для плоской волны

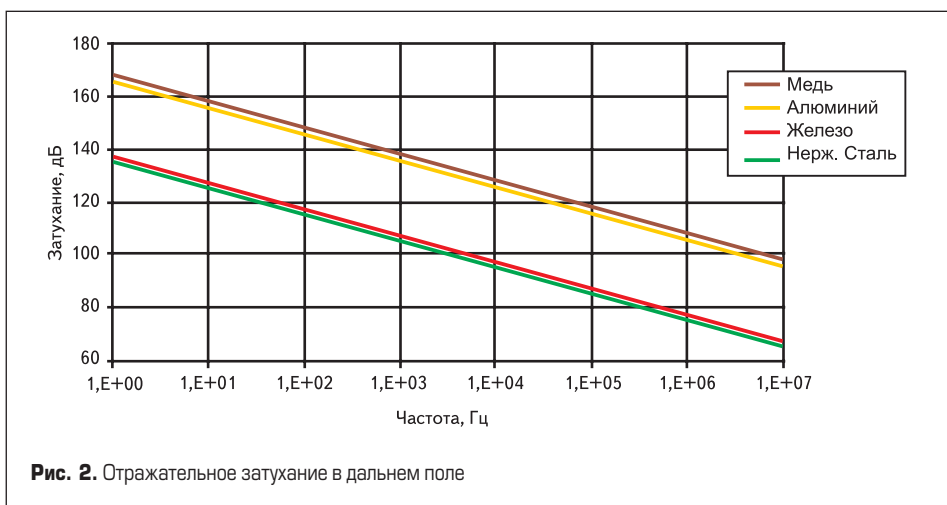


Рис. 2. Отражательное затухание в дальнем поле

Иногда получается, что теоретически рассчитанные значения параметров экрана сильно отличаются от достигнутых практически. Такие расхождения могут возникать в том случае, если ограничения концепции метода импеданса были учтены недостаточно. Например, стена экрана не бесконечна, отражения в пределах корпуса могут приводить к резонансам, имеющиеся пазы (шлицы) приводят к ухудшению контакта между частями экрана.

Последнее обстоятельство, а именно изолирование пазов, переходов и шлицев, далее будет рассмотрено подробнее.

Большие экранирующие корпуса и поглощающие изолирующие комнаты по технологическим причинам состоят, как правило, из множества частей.

На относительно высоких частотах безупречные переходы между отдельными частями конструкции могут быть созданы за счет сварки и пайки. Но, кроме огромной связанной с этим работы, остается проблема изоляции дверей и снимающихся стенок, которые позволяют осуществлять доступ внутрь корпуса. Влияние отверстий для подвода электропитания и сигнальных кабелей

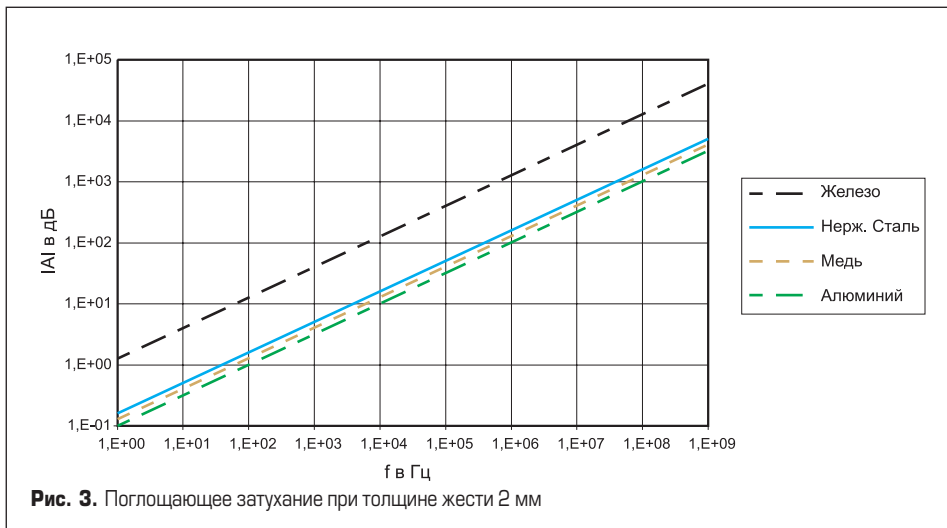


Рис. 3. Поглощающее затухание при толщине жести 2 мм

в рамках этого сообщения рассматриваться не будет.

Для высокочастотной изоляции дверей и стыков по всей их длине, без прерывания, должен использоваться электропроводящий материал. Такой контакт предлагается в разнообразных формах и из различных материалов от контактных дорожек до эластомеров, вязаных проволочных сеток, спирали и т.д. При выборе контакта всегда решающую роль играет функциональное соответствие от механической устойчивости до очень хорошей проводимости в интересующей области частот.

Известно, что щели в металлических деталях длиной много большей, чем $\lambda/10$, и шириной много меньшей, чем $\lambda/10$, проявляют себя как дипольные антенны с такими же размерами (принцип двойственности). В металлической поверхности индуцируются токи при попадании на нее плоской волны. Эти стеночные токи текут вокруг прорези и приводят к отделению магнитного поля. Это означает, что щель-антенна имеет индуктивный характер. Сравнение между щлицем и диполем в качестве антенн передано на рис. 4 через расположение линий поля в «ближней» области.

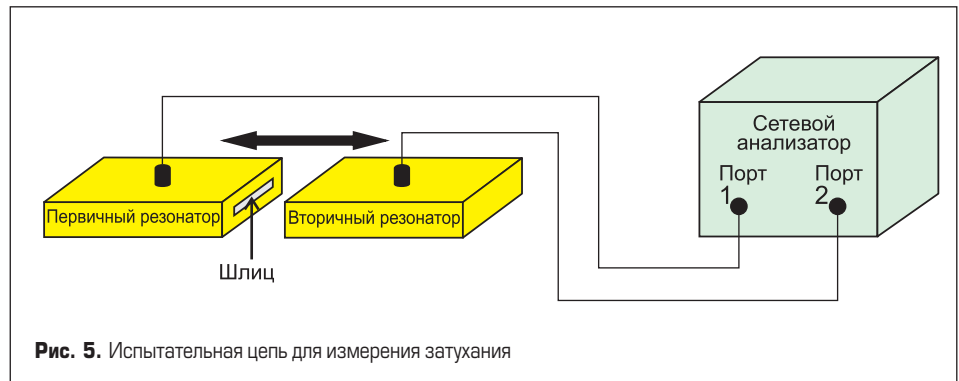
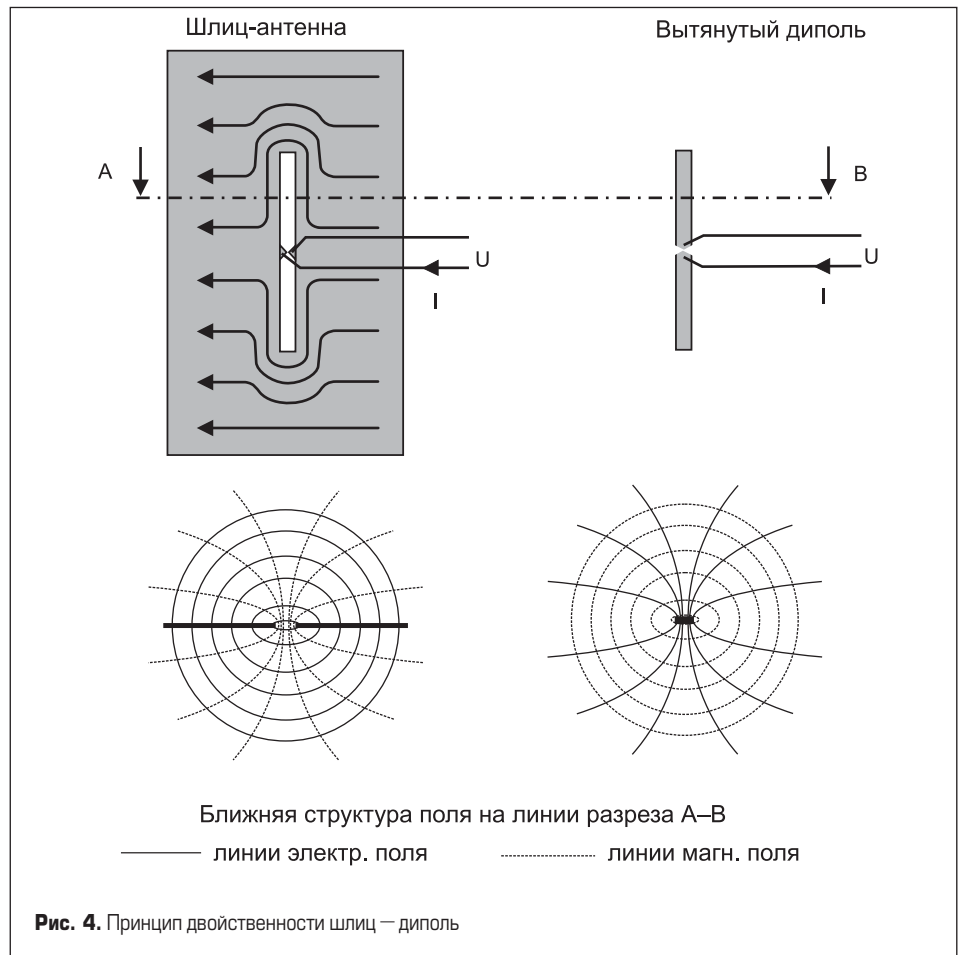
Так как контактные пружины обеспечивают очень хорошие электрические и механические свойства, то они находят широкое применение в ЭМС-практике для дверей и съемных панелей, которые должны часто открываться. Нашей задачей является эффективное устранение щель-антенн при использовании контактных пружин. С этой целью они были исследованы при применении в щлице. В «ближней» области происходит концентрация линий магнитного поля у щлица (рис. 4), поэтому для измерений в непосредственной близости от разреза предпочтительно использование магнитных полевых зондов.

Чтобы не воспроизводить бесконечно большие экранирующие плоскости, измерение затухания происходило на щлице между двумя прямоугольными полыми объемными резонаторами. Этот метод имеет следующие преимущества:

- Поведение электромагнитных полей известно и просто в описании.
- Контактные пружины хорошо и просто контактируют с измеряемым объектом.
- Аналитический метод расчета математически относительно прост.
- Потери полых объемных резонаторов относительно незначительны.
- Этот метод измерения соответствует нормам ЭМС для анализа контактных материалов.

Полый объемный резонатор работает на своей H_{101} -волне. В нашем случае использовались полые объемные резонаторы с резонансной частотой примерно 920 МГц.

На рис. 5 представлена схема измерительной цепи. Различные испытуемые пружинные контактные ленты при помощи болтов по очереди закреплялись в щлице между обоими резонаторами. Меняя силу затягивания болтов, удалось установить влияние прижимного да-

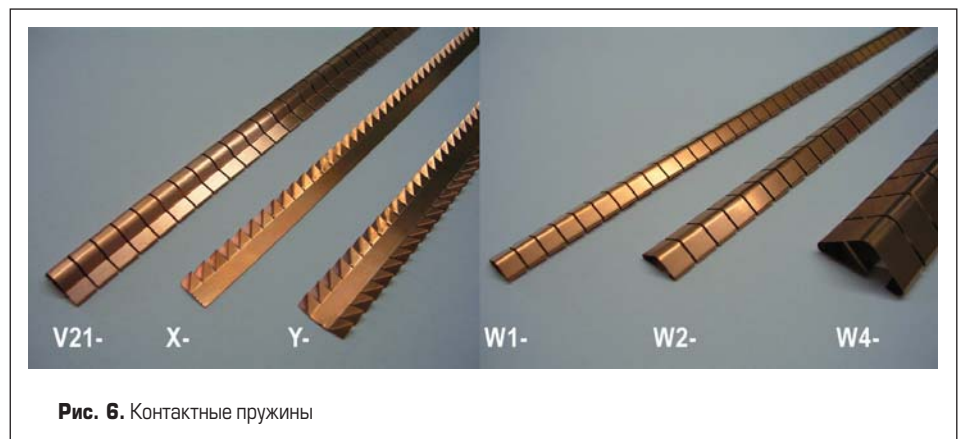


вления и соответственно деформации контактов на затухание.

Для проведения тестов использовались следующие типы контактных пружин: V21, X, Y, W1, W2 и W4 (рис. 6).

К первичному резонатору подключается мощность 10 дБмВт из порта 1 сетевого анали-

затора и измеряется выходная мощность вторичного резонатора. Измеряемый на порте 2 параметр S соответствует затуханию измеряемой контактной ленты, если мы предварительно провели калибровку нашей системы с открытым щлицем, то есть без испытуемой контактной ленты.



Для установления зависимости экранирующего затухания от силы прижимного давления исследовались два режима деформации:

1. Пружина имеет надежный контакт с основой, но она не деформирована.
2. Пружина сжимается на 30% (нормальный режим использования).

Более сильная деформация пружин не исследовалась, так как это приводило либо к потере ими эластичности, либо они ломались.

Результаты измерений представлены в таблице 3.

Анализ выполненных измерений позволил установить что:

- чем больше контактная пружина, тем лучше экранирующее затухание;
- чем меньше разрезы между пальцами пружинных лент, тем выше затухание;
- чем толще материал контактных пружин, тем выше экранирующее затухание;
- чем выше прижимное давление пружин, тем лучше экранирующее затухание (при учете механических свойств материала);
- чем больше контактирующая поверхность пружины с экраном, тем выше затухание.

Абсолютные значения величин, полученных нами при измерениях, ниже указанных в каталоге. Причина такого несоответствия может заключаться в общем построении измерительной цепи, так как исследование происходило не в специальной малоотражающей среде. Мы перемещаемся в области затухания от 80 до 100 дБ, что соответствует затуханию более чем в 100 миллионов раз. В этом случае даже незначительные нарушения соединения с измерительной цепью (например, слабое экранирование кабелей и разъемов) становятся заметными.

Для проверки измерений проводится аналитический расчет экранирующего действия контактных пружин. Для этих целей используются два прямоугольных полых объемных резонатора, так как контактные пружины размещаются на их поверхностях лучше.

При контакте пружин с противоположной плоскостью в них, в зависимости от конструкции и прижимного давления, возникают эллиптические отверстия с большим радиусом l , который соответственно является переменным (рис. 7).

Сначала рассчитывается сцепление отдельного эллипса, затем полученная величина умножается на количество имеющихся в разрезе эллипсов. Сцеплением между смежными эллипсами можно пренебречь. Расчет проводится для идеального полого объемного резонатора, в котором присутствует только волна H_{101} .

Проведенные расчеты величины затухания от радиуса эллипса для пружин типа V21 находятся в соответствии с данными, полученными выше (таблица 4).

Из этой таблицы видно, что измеренные величины почти совпадают с рассчитанными. Это значит, что при применении пружин важен хороший контакт при деформации, минимум в 30%, необходимый для удержания малого диаметра эллиптических отверстий и достижения приемлемого затухания.

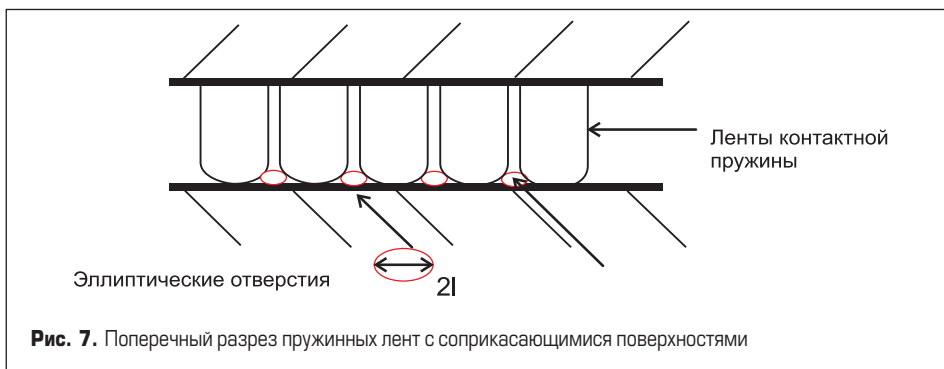


Рис. 7. Поперечный разрез пружинных лент с соприкасающимися поверхностями

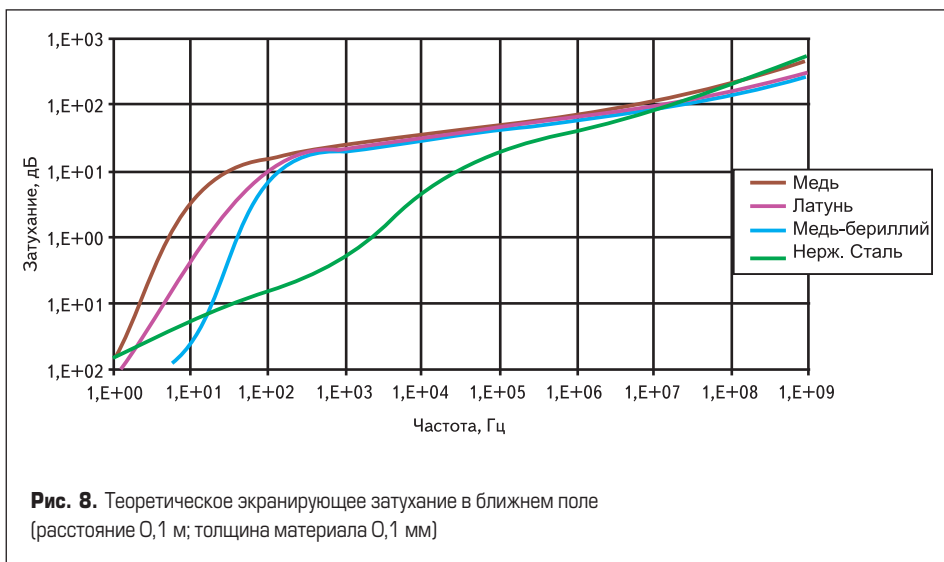


Рис. 8. Теоретическое экранирующее затухание в ближнем поле (расстояние 0,1 м; толщина материала 0,1 мм)

Таблица 3

Тип	Затухание, дБ (режим 1)	Затухание, дБ (режим 2)
Контактная пружина V21	-53	-69
Контактная пружина X	-34	-48
Контактная пружина Y	-13	-43
Чердачная контактная пружина W1	-53	-62
Чердачная контактная пружина W2	-62	-67
Чердачная контактная пружина W4	-66	-78

Таблица 4

	$l = 2$ мм	$l = 4$ мм	$l = 6,4$ мм	Режим 1	Режим 2
Затухание, дБ	-67	-58	-52	-53	-69

Таблица 5

Преимущества меди-бериллия	Преимущества высококачественной стали
Хорошая проводимость; отличная прочность; высокий предел усталости; не магнитен; необычная износостойкость; качество на уровне стандартов автоматостроения; хорошая коррозионная стойкость; широкая область рабочей температуры; отсутствие искрообразования	Нержавеющий материал; долговечность; благоприятные антикоррозионные качества; абсолютная неядовитость

Контактные пружины могут производиться из различных материалов. В ходе развития в области ЭМС среди контактных материалов, подверженных механическим нагрузкам, утвердились высококачественная сталь и медь-бериллий. На графике (рис. 8) представлена зависимость затухания материала от частоты. При этом предполагается, что толщина материала равна 0,1 мм, источник ВЧ-поля находится в ближней области на расстоянии 0,1 м от экрана. Для сравнения на графике приведены данные для меди, которая широко применяется в электротехнике. Медь, в силу ее ме-

ханических свойств, не подходит в качестве материала для контактных пружин. В механическом отношении хорошим материалом является медь-бериллий (CuBe), который в области от 100 Гц до 1 ГГц обладает почти равными с медью показателями затухания.

Высококачественная сталь не является эффективным экраном на низких частотах. Примерно от 10 кГц и выше ее показатели приближаются к показателям меди.

В таблице 5 сопоставлены два наиболее распространенных материала для контактных пружин.