

Глава 3

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

§ 3.1. Вводные замечания

Протекающие в цепях радиотехнических приборов токи создают в окружающем пространстве магнитное поле, а заряды, имеющиеся на отдельных частях прибора, — электрическое поле. Эти электрические и магнитные поля, действуя на различные элементы прибора, могут, в свою очередь, создать в них нежелательные токи и напряжения, не предусмотренные при конструировании, которые часто ухудшают работу прибора, а иногда и вовсе нарушают ее.

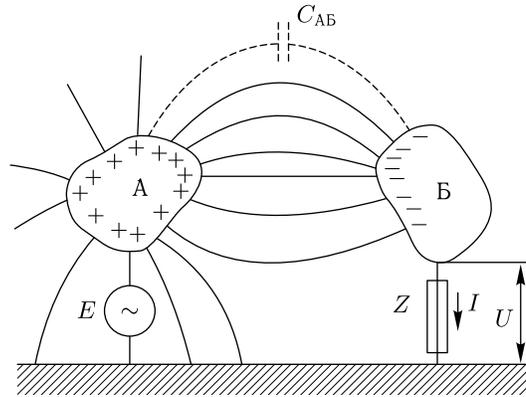
Для борьбы с этими нежелательными явлениями отдельные цепи и элементы приборов помещают в специальные экраны, препятствующие проникновению электрических и магнитных полей за их пределы, как говорят, экранируют их. В следующих параграфах будут разобраны различные способы экранирования.

§ 3.2. Экранирование электрических полей

Пусть в некотором приборе проводящее тело A , благодаря действию переменной синусоидальной эдс E (рис. 3.1), будет попеременно заряжаться положительным и отрицательным электричеством. Вокруг него при этом будет создаваться электрическое поле. Часть силовых линий этого поля будет кончаться на проводнике B , наводя на нем заряд. Заряд противоположного знака будет отводиться по проводу через сопротивление Z в корпус прибора, где его нейтрализует заряд, вызванный электродвижущей силой E . Так как заряд проводника A — переменный, то тело B будет перезаряжаться и через сопротивление Z будет протекать переменный ток.

Этот процесс можно представить и иначе. Между телами A и B имеется некоторая емкость C_{AB} . Вследствие этого в цепи, содержащей эдс E , тело A , емкость C_{AB} , тело B , сопротивление Z и корпус прибора, потечет ток I , равный

$$I = \frac{E}{Z + \frac{1}{i\omega C_{AB}}}.$$

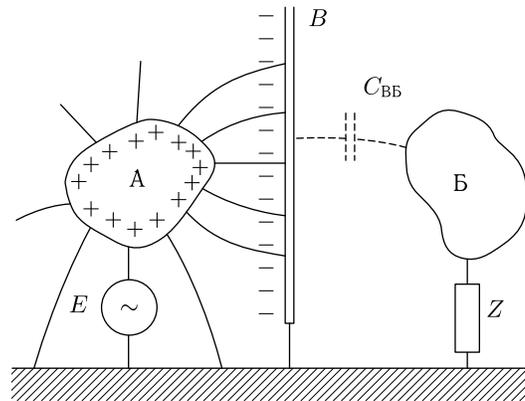
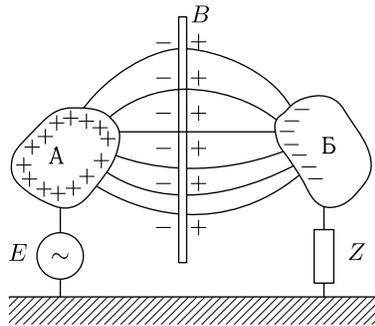
Рис. 3.1. Электрическое поле тела *A* без экрана

Пока угловая частота ω электродвижущей силы E мала, сопротивление емкости $\frac{1}{i\omega C_{AB}}$ очень велико, ток I мал и с ним можно не считаться. С увеличением частоты ω уменьшается сопротивление емкости C_{AB} и увеличивается ток. Это может вызвать нарушение правильной работы прибора. В радиотехнических приборах частоты бывают весьма большими и поэтому с описанным явлением приходится считаться.

Если между телами *A* и *B* поместить проводящий лист *B*, соединенный с корпусом прибора (рис. 3.2), то он будет перехватывать силовые линии, которые раньше шли от *A* и *B*. Допустим, в данный момент времени тело *A* заряжено положительно. Тогда на листе *B* наведется отрицательный заряд. Освободившийся в листе *B* положительный заряд отведется в корпус прибора, где его нейтрализует отрицательный заряд, отведенный электродвижущей силой из тела *A*. Отрицательный заряд, наведенный на листе *B*, будет нейтрализовать действие положительного заряда тела *A* на тело *B*.

Обязательным условием экранирования является соединение листа *B* с корпусом. Если соединения с корпусом нет, то освободившийся на листе положительный заряд перейдет на правую поверхность листа, как это показано на рис. 3.3, и создаст поле, которое наведет заряд на тело *B*. Никакого экранирования при этом не будет.

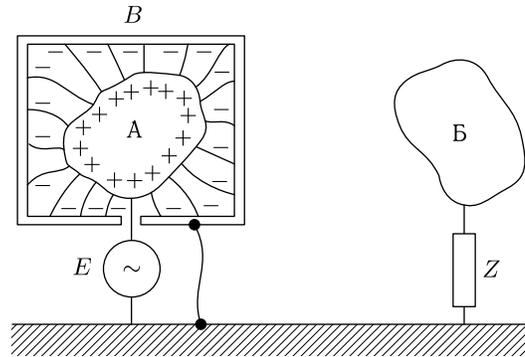
При соединении листа *B* с корпусом некоторое влияние тела *A* на тело *B* все-таки останется, во-первых, потому, что часть силовых линий обойдет лист *B* сверху и создаст некоторый заряд на теле *B*. Во-вторых, ток, протекающий при перезарядке листа *B*, идет двумя путями: основная часть его проходит по листу на корпус прибора, а некоторая незначительная часть проходит на корпус через емкость C_{BB} (рис. 3.2) и сопротивление Z , создавая на нем падение напряжения.

Рис. 3.2. Действие экрана B на электрическое поле тела A Рис. 3.3. Действие изолированного экрана B на электрическое поле тела A

Влияние первой причины легко устранить, окружив тело A со всех сторон экраном, т. е. поместив его как бы в коробку, изготовленную из хорошо проводящего ток металла (рис. 3.4).

Влияние второй причины можно ослабить путем уменьшения сопротивления экрана и проводника, соединяющего экран с корпусом. Чем меньше это сопротивление, тем, очевидно, большая часть тока будет протекать непосредственно в корпус прибора. Также можно ослабить влияние второй причины, помещая между экраном B и телом B еще один экран, соединенный с корпусом.

Таким образом, для защиты от действия электрического поля необходимо элемент схемы, вызвавший появление поля (тело A), или элемент, подвергающийся нежелательному воздействию электрического поля (тело B), поместить в экран, изготовленный из металла, обладающего малым удельным сопротивлением (медь, алюминий), и надежно соединить этот экран с корпусом прибора. Иногда достаточно

Рис. 3.4. Действие экрана B на электрическое поле тела A

поставить между упомянутыми элементами схемы металлическую перегородку, соединенную с корпусом.

§ 3.3. Экранирование магнитных полей

Пусть существуют две цепи, между которыми имеется взаимная индуктивность M , вызванная тем, что часть магнитных линий индукции одной цепи будет охватывать другую. Тогда ток I , протекающий в одной из этих цепей, будет наводить в другой эдс, равную $i\omega MI$. Чем выше частота ω , тем больше будет наведенная эдс. Для устранения этого явления, которое в ряде случаев бывает нежелательным, применяют экранирование магнитного поля.

Существует два метода экранирования магнитных полей:

1) с помощью ферромагнитных материалов и 2) с помощью вихревых токов.

Первый способ применяется при экранировании постоянных магнитных полей и полей низкой частоты. Второй способ дает хорошие результаты при экранировании полей высокой частоты.

Рассмотрим первый способ.

Пусть требуется защитить катушку от действия внешнего магнитного поля. Поместим эту катушку внутри кожуха-экрана, изготовленного из ферромагнитного материала. При этом линии индукции (рис. 3.5) будут проходить в основном по стенкам экрана, обладающим малым магнитным сопротивлением по сравнению с сопротивлением пространства внутри экрана.

Линии индукции, создаваемые током, протекающим в катушке K (рис. 3.6), также будут замыкаться через стенки экрана, почти не выходя наружу. Для лучшего экранирования материал экрана нужно выбирать с большой магнитной проницаемостью; часто для этого используют железо-никелевый сплав — пермаллой, в большинстве же случаев — железо.

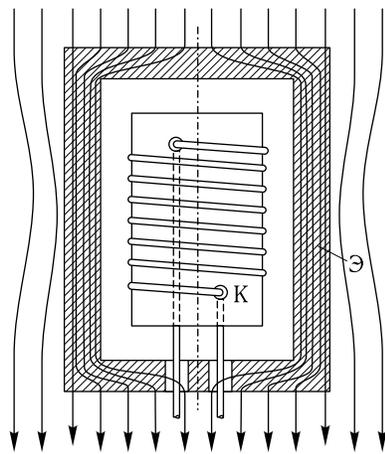


Рис. 3.5. Экранирование катушки K от внешнего магнитного поля ферромагнитным экраном \mathcal{E}

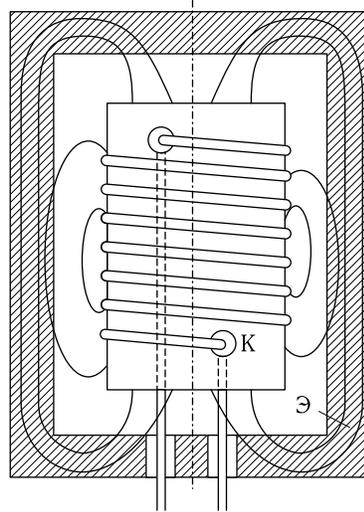


Рис. 3.6. Экранирование поля катушки K ферромагнитным экраном \mathcal{E}

Для получения надежного экранирования стенки экрана придется делать сравнительно толстыми с тем, чтобы уменьшить сопротивление магнитному потоку. Иногда для этих же целей приходится применять несколько экранов, помещенных один внутри другого. Поэтому хорошо действующие экраны из ферромагнитных материалов получаются сравнительно тяжелыми и громоздкими.

При конструировании экранов следует обращать внимание на то, чтобы швы и разрезы в экране не шли поперек ожидаемого направления линий магнитной индукции, так как это увеличит магнитное сопротивление стенок экрана и ухудшит его экранирующие свойства.

Перейдем ко второму способу экранирования — экранированию с помощью вихревых токов. Этот способ целесообразно применять на высоких частотах.

Представим себе замкнутое металлическое кольцо, расположенное в переменном магнитном поле.

Пусть суммарный магнитный поток, охватываемый кольцом, будет равен

$$\Phi_m \cos(\omega t + \varphi)$$

или в комплексной форме Φ .

Этот поток будет складываться (рис. 3.7) из магнитного потока Φ_0 , созданного внешними причинами, например, какими-либо катушками индуктивности, и магнитного потока $\Phi_1 = LI$, созданного вихревым током I , протекающим через кольцо. Этот ток создается эдс, наведенной

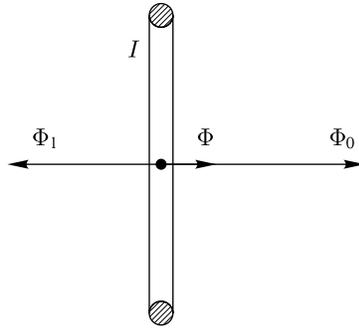


Рис. 3.7. Экранирование переменного магнитного поля кольцом

в кольце суммарным потоком Φ . Через L обозначена индуктивность кольца.

Суммарный магнитный поток, таким образом, равен

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_1 = \Phi_0 + LI. \quad (3.1)$$

Определим ток I , протекающий в кольце. Эдс, наводимая в кольце потоком Φ , будет равна $\mathbf{E} = -i\omega\Phi$, а ток, протекающий в кольце под действием этой эдс, будет равен

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{E}}{r} = -i\omega \frac{\Phi}{r}, \quad (3.2)$$

где r — сопротивление кольца.

В ф-ле (3.2) индуктивность L учитывать не нужно, так как создаваемая ею противо-эдс входит в эдс \mathbf{E} , поскольку она вызывается суммарным магнитным потоком, включающим в себя и поток Φ_1 , обусловленный индуктивностью кольца.

Считая поток Φ_0 известным, мы из (3.1) и (3.2) можем найти суммарный магнитный поток

$$\Phi = \frac{\Phi_0}{1 + i\frac{\omega L}{r}},$$

откуда

$$\Phi = \frac{\Phi_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{r}\right)^2}}. \quad (3.3)$$

Таким образом, чем больше будет отношение $\frac{\omega L}{r}$, тем сильнее будет ослабление магнитного поля внутри кольца вследствие наложения на внешнее поле поля обратного направления, вызванного вихревым током в кольце. С увеличением частоты ω это ослабление будет расти.

Оно будет также расти, если уменьшать величину r , т. е. делать кольцо из материала с меньшим удельным сопротивлением.

На рис. 3.8 приведена зависимость $\frac{\Phi}{\Phi_0}$ от отношения $\frac{\omega L}{r}$.

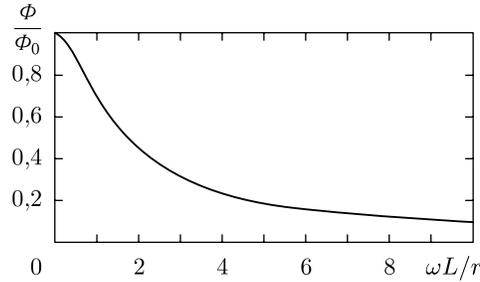


Рис. 3.8. Зависимость экранирующего действия кольца от отношения $\frac{\omega L}{r}$

Вне кольца магнитные поля, как внешнее, так и вызванное током кольца, будут складываться. Общая картина поля около кольца изображена на рис. 3.9. Из этого рисунка видно, что кольцо благодаря вихревым токам, протекающим в нем, не пропускает через себя магнитное поле: оно вытесняется и огибает кольцо снаружи.

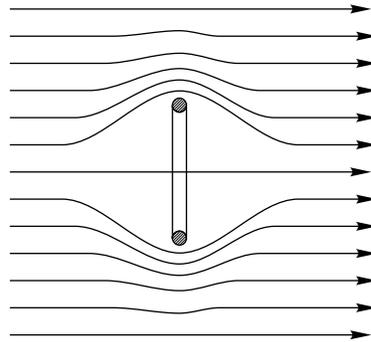


Рис. 3.9. Экранирование переменного магнитного поля кольцом

Если на пути магнитного поля поместить лист проводящего материала, то в нем появятся кольцевые вихревые токи и этот лист мысленно можно представить состоящим из отдельных замкнутых колец. Из сказанного выше следует, что вихревые токи в этих кольцах будут вытеснять магнитное поле из проводящего листа. Картина силовых линий для этого случая изображена на рис. 3.10. Таким образом, проводящий лист будет являться экраном, препятствующим силовым линиям проходить через него.

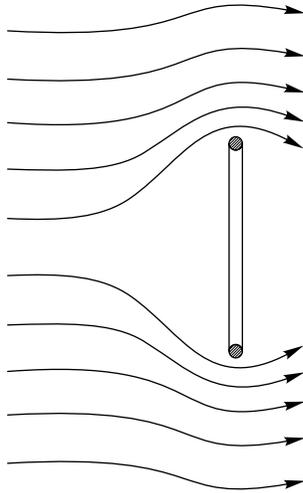


Рис. 3.10. Экранирование переменного магнитного поля проводящей пластинкой

При высоких частотах вихревые токи в металле будут течь практически лишь в поверхностном слое металла, так как внутренние слои будут экранированы поверхностными слоями и переменное магнитное поле проникать туда не будет. Это явление аналогично явлению поверхностного эффекта. Уменьшение плотности вихревых токов и напряженности магнитного поля по мере погружения в толщу экрана происходит по закону

$$A = A_0 e^{-\frac{x}{x_0}},$$

где A — плотность тока или напряженность поля на глубине x от поверхности экрана, A_0 — плотность тока или напряженность магнитного поля на поверхности экрана, x_0 — глубина погружения, на которой плотность тока или напряженность магнитного поля убывает в e раз.

Величина x_0 может быть найдена по формуле

$$x_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu_r \pi f}},$$

где ρ — удельное сопротивление материала экрана, $\mu_0 \mu_r$ — его магнитная проницаемость.

Для технической меди

$$x_0 = \frac{6,67}{\sqrt{f}} \text{ см},$$

для алюминия

$$x_0 = \frac{8,39}{\sqrt{f}} \text{ см},$$

для серебра

$$x_0 = \frac{6,39}{\sqrt{f}} \text{ см}.$$

В табл. 3.1 приведены значения x_0 для технической меди в зависимости от частоты. Из этой таблицы видно, что для изготовления экранов на высоких частотах может быть взят весьма тонкий материал. Эффективность экранирования от этого не нарушится.

Таблица 3.1

f	10 кГц	1 МГц	100 МГц
x_0	0,667 мм	0,0667 мм	0,00667 мм

Из рассмотренного выше примера с кольцом следует, что для получения лучшей экранировки следует брать материал экрана с малым удельным сопротивлением. Для экранирования с помощью вихревых

токов катушек индуктивности последние обычно помещают в алюминиевые или медные цилиндрические коробки — экраны, закрытые крышкой. Переменное магнитное поле из-за наличия в экране вихревых токов практически не имеет возможности пройти через металл экрана и выйти наружу. Картина поля для этого случая изображена на рис. 3.11.

Иногда из конструктивных соображений экраны делают прямоугольного сечения. В рассмотренных экранах допустимо делать швы и разрезы, идущие только по направлению вихревых токов. В этом случае не будет увеличиваться сопротивление вихревым токам и экранирование будет достаточно эффективным. Так например, разрез по линии aa' (рис. 3.12) не будет понижать эффективность экранирования, в то время как разрез bb' , идущий поперек линий вихревых токов, резко ухудшит экранирующие свойства. Поэтому экраны для катушек индуктивности обычно делают путем выдавливания, без швов по образующим цилиндра, и в качестве снимающейся крышки используют дно цилиндра.

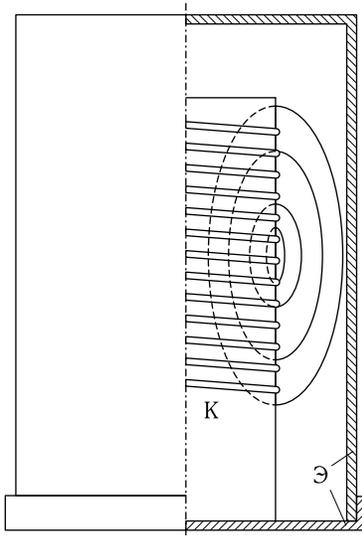


Рис. 3.11. Экранирование катушки K экраном \mathcal{E} с помощью вихревых токов

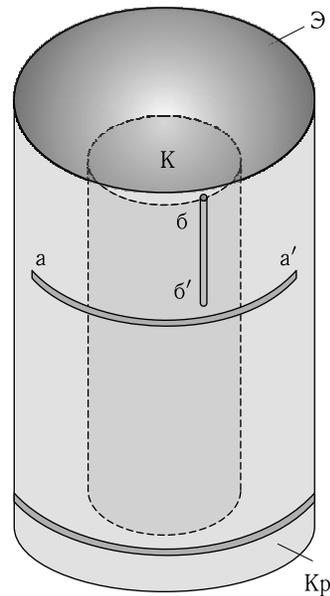


Рис. 3.12. Экранирование катушки K экраном \mathcal{E} . Разрез aa' не нарушает экранировку, bb' — нарушает. Kp — крышка экрана

Экранирование с помощью вихревых токов вызывает потерю электромагнитной энергии вследствие перехода ее в тепло, поскольку под действием вихревых токов экран нагревается.

На простейшем примере экранирования кольцом выясним, от каких факторов будет зависеть эта потеря энергии.

Из ф-л (3.2) и (3.3) получим

$$I = \frac{\omega\Phi_0}{r\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{r}\right)^2}},$$

откуда мощность, теряемая в кольце, будет равна

$$P = I^2 r = \frac{r\omega^2\Phi_0^2}{r^2\left[1 + \left(\frac{\omega L}{r}\right)^2\right]} = \Phi_0^2 \frac{r\omega^2}{r^2 + \omega^2 L^2}. \quad (3.4)$$

Из этой формулы видно, что при малых значениях ω , когда в знаменателе ф-лы (3.4) можно пренебречь $\omega^2 L^2$ по сравнению с r^2 , мощность P меняется пропорционально ω^2 . На больших частотах, когда $\omega^2 L^2 \gg r^2$, мощность, теряемая в кольце, почти не зависит от частоты ω . На рис. 3.13 приведена зависимость P от ω .

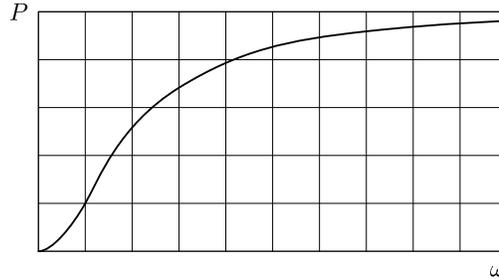


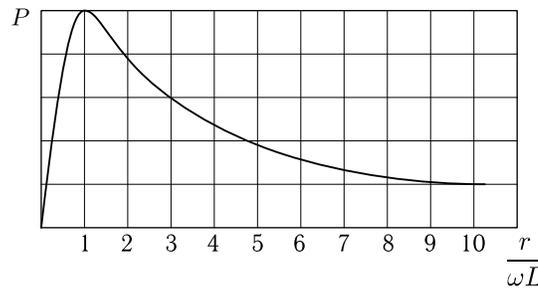
Рис. 3.13. Зависимость мощности потерь в экране P от частоты ω

Рассмотрим, как будет изменяться P с изменением сопротивления r кольца. При малых значениях r , когда $r^2 \ll \omega^2 L^2$ и величиной r^2 в знаменателе ф-лы (3.4) можно пренебречь, потери P будут расти примерно пропорционально r .

При очень больших значениях r (когда $r^2 \gg \omega^2 L^2$) знаменатель будет увеличиваться примерно пропорционально r^2 и потери будут уменьшаться обратно пропорционально r .

Очевидно, при некотором значении r потери будут максимальны. Исследуя выражение (3.4), нетрудно найти, что максимум P будет иметь место при $r = \omega L$. На рис. 3.14 приведена зависимость P от r .

Из сказанного очевидно, что уменьшение сопротивления экрана r будет, во-первых, улучшать его экранирующие свойства и, во-вторых, уменьшать потерю энергии, если $r < \omega L$ (это видно из рис. 3.14).

Рис. 3.14. Зависимость мощности P потерь в экране от его сопротивления r

Обычно экраны делают из меди или алюминия. Иногда на поверхность экрана наносят слой серебра, улучшающий экранирующие свойства и уменьшающий потерю энергии, так как удельное сопротивление серебра примерно на 10 % меньше удельного сопротивления технической меди и его поверхность в меньшей степени, чем у меди, покрывается плохо проводящими окислами.

Применение ферромагнитных материалов для экранирования магнитных полей высокой частоты нецелесообразно из-за большего сопротивления этих материалов и значительных потерь в них.

На основании разобранных примеров можно также сделать вывод относительно потерь энергии в различных предметах, помещенных в магнитное поле высокой частоты. Если сопротивление этих предметов будет очень малым, то потери в них будут малы, так как магнитное поле будет из них вытесняться. Если их сопротивление будет очень велико, то потери также будут малы, так как хотя поле и будет проникать эти тела, но вихревые токи, возникающие в них, будут малы.

При некотором среднем сопротивлении потери будут максимальны. Поэтому, в целях уменьшения потерь, стараются помещать в переменное магнитное поле тела либо из хорошего проводника, либо из хорошего изолятора.

Рассмотрим, как экран влияет на параметры экранируемой катушки индуктивности.

Вследствие того, что вихревые токи, возникающие в экране, уменьшают магнитный поток катушки, индуктивность катушки уменьшается. Чтобы это уменьшение индуктивности не было чрезмерным, обычно диаметр экрана берут примерно равным удвоенному диаметру катушки. При этом индуктивность катушки уменьшается на 15–20 %.

Наличие потерь в экране увеличивает активное сопротивление катушки r_L . Увеличение активного сопротивления r_L и уменьшение индуктивности приводят к уменьшению добротности катушки.

Собственная емкость катушки при помещении ее в экран возрастает вследствие того, что появляется дополнительная емкость между витками катушки и экраном. Это увеличение емкости тем больше, чем меньше диаметр экрана.

§ 3.4. Экранирование однопроводных и двухпроводных линий

Пусть от некоторой синусоидальной эдс E в нагрузку Z течет по проводу ток. Обратным проводом пусть служит корпус прибора. Вокруг провода появятся электрические и магнитные силовые линии. Попробуем заэкранировать эти поля с помощью металлической трубы, надетой на провод и изолированной от него (рис. 3.15). Если трубу соединить электрически с корпусом прибора, то осуществляется экранировка электрического поля, но экранирование магнитного поля не получится. Действительно, при обходе по некоторому замкнутому контуру (на рис. 3.15 он показан пунктиром) вокруг экранирующей трубы мы согласно закону полного тока получим

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = i, \quad (3.5)$$

где i — ток, охватываемый этим контуром, т. е. ток, протекающий по проводу, так как общий ток, протекающий по трубе, будет равен нулю (поскольку труба соединена с корпусом лишь с одного конца). Таким образом, при $i \neq 0$ внешнее магнитное поле не может равняться нулю и экранирования магнитного поля не получится.

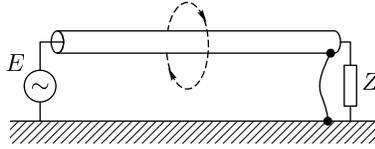


Рис. 3.15. Экранирование провода трубой. Экранировки магнитного поля нет

Некоторое экранирующее действие получится в том случае, если соединить с корпусом оба конца трубы. При этом по экранирующей трубе потечет часть обратного тока и ток i в формуле (3.5) будет равен разности токов, текущих по проводу и по трубе. Это вызовет уменьшение напряженности магнитного поля \mathbf{H} . Если в качестве обратного провода использовать экранирующую трубу (рис. 3.16), то ток i , равный разности токов, протекающих по проводу и по трубе,

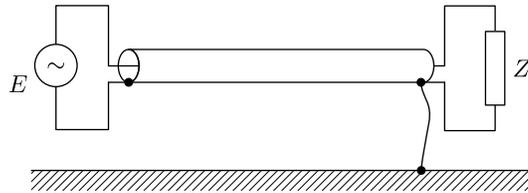


Рис. 3.16. Экранирование провода трубой

будет равен нулю и напряженность магнитного поля \mathbf{H} вне трубы также будет равна нулю.

Действительно, если предположить, что вне трубы в этом случае имеются замкнутые линии магнитной индукции, то при обходе по одной из них с единичным магнитным зарядом мы совершим некоторую работу, в то время как согласно ф-ле (3.5) такая работа должна быть равна нулю, так как в данном случае $i = 0$.

Незамкнутых линий магнитной индукции вне трубы также не может быть, поскольку они должны были бы замкнуться, проходя через металл трубы, но этого не может быть из-за экранирующего действия металла при высокочастотном магнитном поле.

Если прямой и обратный провод идут в одной металлической экранирующей трубе, соединенной с корпусом (рис. 3.17), то такая труба также будет создавать электрическую и магнитную экранировку.

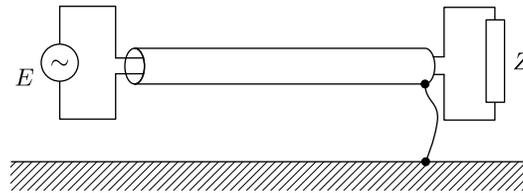


Рис. 3.17. Экранирование двух проводов трубой

На практике экранирующую трубку обычно делают либо из свинца, покрывающего изоляцию провода, так как свинец легко деформируется и не препятствует изгибанию провода, либо оплетая изоляцию провода тонкими медными или бронзовыми проводниками.