

ОБ ЭКРАНИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

А. Талицкий

Многим с детства известен простой фокус, когда шарик, булавка или иной металлический предмет чудесным образом начинает двигаться по столу вследствие воздействия «некой невидимой силы», роль которой выполняет сила магнитного поля постоянного магнита, которым демонстрирующий фокус манипулирует под столом незаметно для окружающих, см. рис 1.

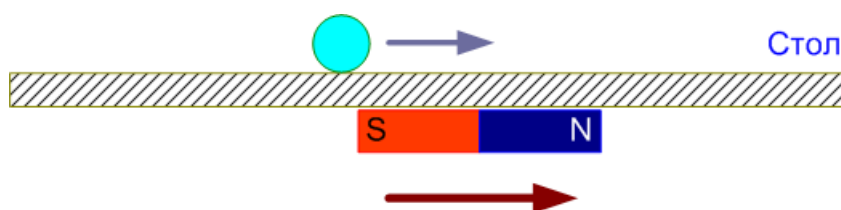


Рис.1 Шарик приводится в движение магнитом, расположенным с обратной стороны стола.

То есть магнитные силовые линии свободно проходят через окружающие нас предметы и даже немагнитные металлы, подобный опыт можно провести, если взять в качестве столешницы, например, алюминиевую или медную пластину. Однако если взять пластину из магнитного материала (сталь, чугун и др.), опыт не получится – магнитные силовые линии окажутся замкнутыми в такой пластине. Этот случай показывает, что пластина из магнитного материала обладает эффектом *экранирования* магнитного поля.

Автору не раз приходилось встречать конструктивные решения, когда трансформаторы или иные элементы радиоэлектронных устройств, являющиеся потенциальными источниками электромагнитного излучения, помещались в экран, представляющий собой стальной кожух.

Из курса физики известно, что любой проводник с током создает вокруг себя магнитное поле. На этом принципе основан довольно простой бесконтактный способ измерения силы переменного тока прибором, называемым «токовыми клещами». По существу это обычный измерительный токовый трансформатор, но с возможностью размыкания (замкнутого) магнитопровода для обеспечения подключения к измеряемой цепи без разрыва измеряемой цепи.

А что если измеряемую цепь, точнее отрезок провода, где мы проводим измерение тока с помощью токовых клещей, поместить в магнитный экран? Ответ, казалось бы, очевиден: если магнитное поле, создаваемое проводником с током будет частично заэкранировано, мы должны обнаружить соответственно уменьшение силы тока, регистрируемого с помощью токовых клещей, а если магнитное поле провода будет заэкранировано полностью, мы должны обнаружить полное уменьшение силы тока до нуля. Как и сам автор, так и коллеги автора ожидали получить именно этот результат.

К такому результату должны приводить также и следующие рассуждения. По закону Био-Савара-Лапласа напряженность магнитного поля в некой точке, создаваемой бесконечно малым элементом проводника dl , см. [1], стр. 274, равна:

$$dH = \frac{I dl \sin(\alpha)}{4\pi r^2}, \text{ где:}$$

I – сила тока в проводнике, r – расстояние от исследуемой точки до указанного элемента dl , α – угол между радиус-вектором r и элементом проводника dl .

Отсюда для прямолинейного проводника с током, см. вывод в [2], стр. 275:

$$H = \frac{I}{4\pi r} \int \sin(\alpha) d\alpha,$$

здесь r – расстояние от исследуемой точки до проводника.

Подставляя пределы интегрирования от 0 до 180° , получаем известную формулу напряженности магнитного поля, создаваемым бесконечно длинным проводником с током:

$$H_\infty = \frac{I}{4\pi r} \int_0^{180^\circ} \sin(\alpha) d\alpha = \frac{I}{4\pi r} [-\cos(\alpha)]_0^{180^\circ} = \frac{I}{4\pi r} \cdot 2 = \frac{I}{2\pi r}$$

Теперь нетрудно рассчитать напряженность магнитного поля, если часть бесконечно длинного проводника с током поместить в магнитный экран. Пусть будет заэкранирован сектор от 30 до 150 град. (см. рис. 2), тогда напряженность магнитного поля будет:

$$H_c = \frac{I}{4\pi r} \left(\int_0^{30^\circ} \sin(\alpha) d\alpha + \int_{150^\circ}^{180^\circ} \sin(\alpha) d\alpha \right) = \frac{I}{4\pi r} \cdot 0,268$$

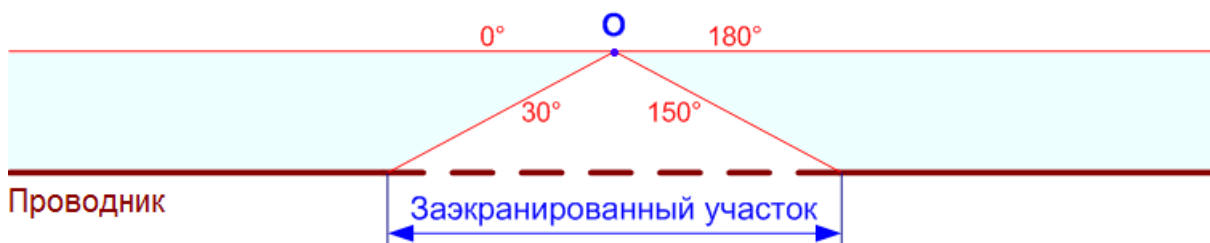


Рис.2 К расчету напряженности магнитного поля в некоторой точке O , в случае, если часть проводника будет заэкранирована.

Итак, выходит, что при экранировании вышеуказанного сектора (от 30 до 150 град.) бесконечно длинного проводника с током напряженность магнитного поля в некоторой определенной точке должна уменьшиться более, чем в 7 раз ($H_c / H_\infty = 7,46$).

Нетрудно видеть, что если проводник будет заэкранирован полностью (сектор от 0 до 180 град.), интеграл обращается в ноль.

Однако на практике получается совершенно иной результат. Для проверки был поставлен следующий эксперимент. Проводник, представляющий собой медный провод марки ПВ-3 сечением $1,5$ кв. мм, был вставлен в отрезок стальной трубы с толщиной стенки 2 мм, диаметром 20 мм и длиной 150 мм. Таким образом, участок проводника указанной длины был помещен в магнитный экран, см. рис. 3. Через проводник был подан синусоидальный переменный ток 10 А частотой 50 Гц. Токовыми клещами была проведена контрольная

проверка тока на том участке, где проводник был открыт (неэкранирован), чтобы убедиться, что сила тока в проводнике действительно составляет 10 А. Затем клещи были перемещены на участок, где проводник был экранирован, как показано на рисунке (для наглядности изображен только сердечник токовых клещей). В результате ожидаемого изменения тока не последовало. Как посередине экранированного участка, так и при приближении токовых клещей к его краям сила тока составляла ровно 10 А.

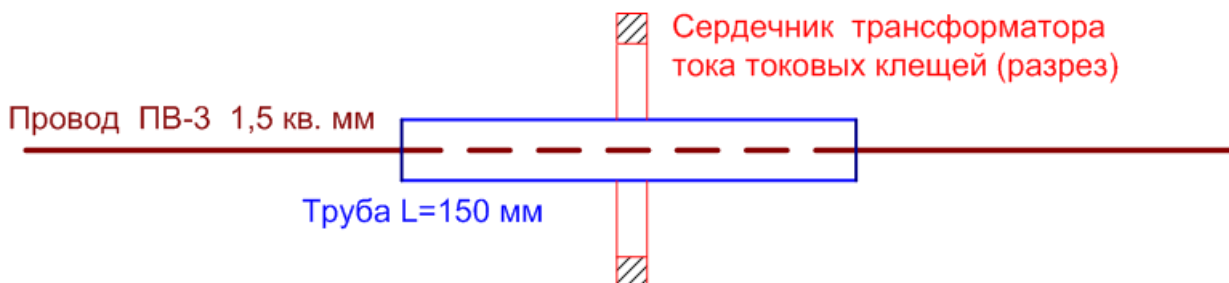


Рис. 3 Корпус токовых клещей не показан, изображен только сам сердечник, представляющий собой замкнутый магнитопровод.

Неожиданный результат эксперимента привел к необходимости дополнительной проверки, когда магнитное поле проводника будет экранировано полностью. Для этого провод был «спрятан» в стальную трубу замкнутой конфигурации, оставлен только небольшой зазор для ввода и вывода провода, см. рис. 4. Сам подвод проводов к трубе в экранировании не нуждается, т.к. токи являются встречно-параллельными и суммарное магнитное поле, создаваемое этими токами, равно нулю.

Результат этого эксперимента оказался аналогичен предыдущему, измеренный токовыми клещами ток в любой точке трубы был равен 10 А. Складывается впечатление, что магнитное поле совершенно «не видит» никаких препятствий, т.е. совершенно безразлично, «одет» проводник в данном случае в стальную трубу или эта труба отсутствует совсем.

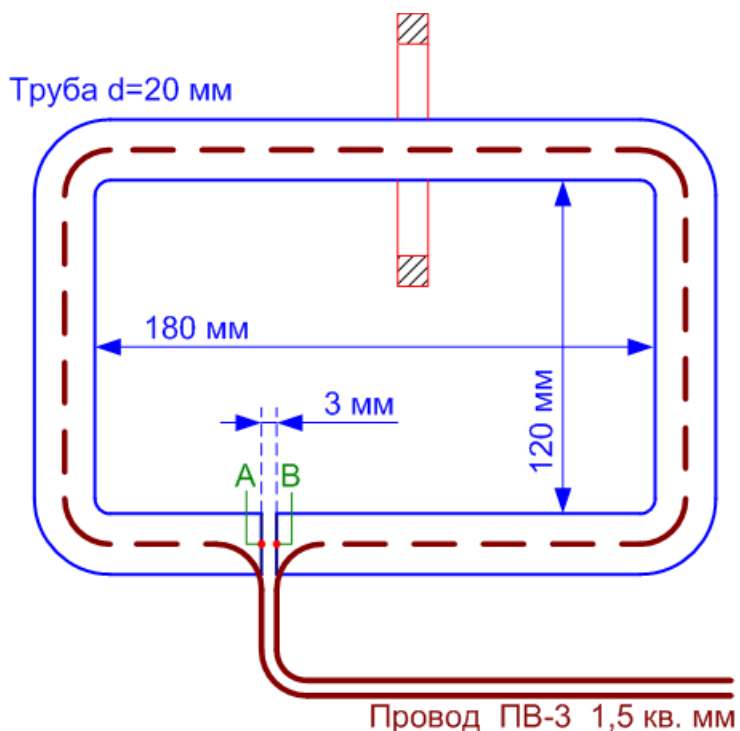


Рис. 4 Полностью экранированный проводник.

Одна из версий объяснения полученного парадокса нашлась довольно быстро, один из коллег, не пожелавший, чтобы его имя было опубликовано, высказал следующее

предположение: ток в проводнике создает магнитное поле в стальной трубе и эта труба под воздействием магнитного поля сама становится источником «вторичного» магнитного поля, которое мы и регистрируем токовыми клещами. В принципе это объяснение вполне правдоподобно, однако при более детальном рассмотрении все же остается некоторая нота неудовлетворенности.

Во-первых, сразу встает вопрос, почему в случае с постоянным магнитом (см. опыт с шариком вначале), металлическая пластина не становится источником «вторичного» магнитного поля, а напротив, является вполне удовлетворительным экраном?

Во-вторых, как сталь, так и любой другой магнитный материал (здесь будет корректнее применить термин «ферромагнетик»), обладает нелинейной зависимостью магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H , кроме того, эта зависимость обладает еще и гистерезисом. Таким образом, магнитное поле, индуцируемое в стальной трубе, при подаче в проводник синусоидального тока, должно быть несинусоидальным. Это подтверждается тем, что ЭДС, измеренная между точками А и В в месте зазора для ввода и вывода провода, см. рис. 4, несинусоидальна. Если в стальной трубе магнитное поле несинусоидально, значит и «вторичное» магнитное поле должно быть также несинусоидальным, т.е. мы должны эту нелинейность увидеть при регистрации силы тока токовыми клещами. Однако на практике при подключении токовых клещей к осциллографу наблюдается чистая синусоида, как будто между проводником и измерительным элементом нет никакого сугубо нелинейного ферромагнитного материала.

Возможно, здесь потребуется более тонкое объяснение описываемого эффекта, и поскольку вопрос явно выходит за рамки рассуждений на инженерном уровне, автор *обращается к научному сообществу* - к инженерам, ученым и иным коллегам, связанным с научно-исследовательской деятельностью, за соответствующими разъяснениями.

Кроме, того, настораживают полученные результаты эксперимента в плане практического аспекта экранирования магнитных полей. Спрашивается, зачем, к примеру, помещать силовой трансформатор питания электронной аппаратуры в стальной экран, если от него не ожидается никакого эффекта? Зачем это делалось ранее? Может, всего лишь из эстетических соображений?

Также возникают не менее интересные вопросы по экранированию *сильных* магнитных полей, возникающих от мощных источников электромагнитного излучения, таких как: электростанции, подстанции, ЛЭП, электрифицированные ЖД и др. В частности, насколько защищает пассажира металлическая обшивка вагона поезда от магнитного поля, создаваемого контактным проводом? Исходя из результатов настоящего эксперимента, следует предположить, что не защищает никак, корпус из магнитного материала по указанным выше рассуждениям должен сам стать источником «вторичного» магнитного поля. Таким образом, пассажир, находящийся в вагоне должен оказаться в том же положении, как если бы он путешествовал на открытой платформе (безусловно, это только предположение, со всей определенностью это можно будет утверждать только тогда, когда будет поставлен эксперимент и проведены соответствующие измерения).

18.08.2022 г.

г. Екатеринбург

E-mail:

svetlov@energyel.com

Лит:

1. Курс физики. Н.Н. Евграфова, В.Л. Каган, Москва, «Высшая школа», 1984 г., 487 с.
2. Курс общей физики, Т.2. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева, Москва, «Физматгиз», 1958 г., 509 с.