

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКОВ И ИХ ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

Для специалистов это давно решенный вопрос. Причем все [1-3] едины во мнении, что картины магнитного поля сплошного проводника и в виде трубы при протекании любого электрического тока могут быть иллюстрированы рис. 1а,б. Однако в научной, технической и специальной литературе о существовании магнитного поля внутри проводника высказываются априорно, не приводя доказательств. Отсюда необходимость поиска объективной истины аналитическим и экспериментальным путем на основе принципов системности и преемственности. Результаты этой работы отражены в настоящей статье.

Прежде всего обратимся к доказательству теоремы Остроградского–Стокса, согласно которой циркуляции вектора магнитной напряженности вокруг каждого элементарного проводника взаимно уничтожаются. Исключение составит лишь внешний периферийный контур. Следовательно, первая или исходная магнитная силовая линия расположится на поверхности проводника, а над ней разместятся остальные линии внешнего поля магнитной напряженности  $H$  (см. рис. 1в). Уже отсюда следует, что магнитного поля внутри проводника нет.

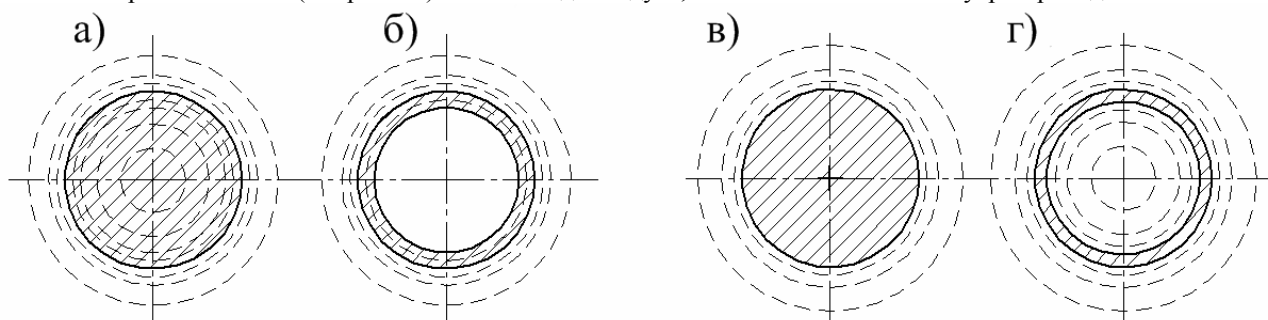


Рис.1 Принятое и реальное изображение картин магнитных полей сплошного цилиндрического и трубчатого проводника

Если те же рассуждения использовать по отношению к тонкостенному цилиндрическому проводнику, то получим, что здесь будут две исходные силовые линии: одна из них лежит на наружной поверхности цилиндра, другая – на внутренней, а их направления противоположны. Остальные силовые линии расположатся соответственно над первой и под второй (см. рис. 1г).

Однако без экспериментальной проверки оба заключения могут быть отнесены лишь к бездоказательной версии. Опишем два эксперимента. Согласно первому из них одиночный цилиндрический проводник сплошного сечения был разрезан вдоль образующей на две половинки. Их включили параллельно и разместили на поверхностях одной из них измерительные катушки, подключенные к милливольтметрам. Сближение половин при наличии протекающего по ним тока дает следующий эффект: сигнал от измерительной катушки, расположенной на плоской поверхности, снижается, а с противоположной (полукруглой) растет. Это дает основание полагать, что при соприкосновении половин образца (измерительная катушка не позволяет это сделать) магнитное поле между ними исчезнет. Второй эксперимент был выполнен при использовании медной тонкостенной трубы диаметром 40 мм и толщиной 1 мм, пронзающей бумажный лист, на который были насыпаны стальные опилки. Кроме того, вне и внутри трубы были расположены миниатюрные магнитные стрелки. Итог эксперимента – полное подтверждение магнитной картины рис. 1г. Отсюда следует, что магнитное поле создается не только над проводником, по которому протекает ток, но и в области, огражденной током (внутренняя полость трубы).

Известно, что если проводник сплошного сечения (жилу) расположить внутри трубчатого (он может восприниматься как оболочка), то получится коаксиальный кабель. Принято считать, что за оболочкой коаксиального кабеля магнитного поля нет. И доказывают это путем обращения к формуле закона полного тока. Однако наличие магнитного поля над оболочкой коаксиального кабеля фиксируют и магнитная стрелка, и железные опилки, и датчик Холла. Причем значения магнитной индукции в любой конкретной точке этого поля практически не изменятся, если коаксиальный кабель разобрать, а затем из его элементов, включенных последовательно, создать двухпроводную линию и пропустить по ним тот же ток. Эксперимент фиксирует также наличие в диэлектрической среде коаксиального кабеля зоны магнитного «вакуума», наличие которой вызвано отталкиванием магнитных полей жилы и оболочки.

Последнее явление имеет место и между проводами двухпроводной линии. Оказалось, что, при больших расстояниях между проводами отталкивание магнитных полей может сформировать между проводами зону обширного магнитного «вакуума». При этом магнитное поле за проводами будет близко к полю одиночного проводника. При сближении проводов магнитное поле между ними усиливается, и зона магнитного «вакуума» исчезает. Зато при малых расстояниях и больших токах она может возникнуть непосредственно за проводами,

благодаря силам упругости, приобретенных магнитными силовыми линиями. Таким образом, картина магнитного поля двухпроводной линии не имеет однозначности, она динамично меняется в зависимости от значений протекающего тока и избранной геометрии.

Рассматривая поведение проводников при протекании по ним переменного тока, всегда подчеркивают наличие здесь поверхностного эффекта. Объясняют его тем, что элементарные проводники центра окружены более сильным магнитным полем, чем проводники периферии, поэтому их индуктивное сопротивление велико, и ток вытесняется к поверхности. Но выше показано, что магнитного поля внутри провода нет, следовательно, принятая трактовка физической сущности описываемого явления не имеет реальной базы.

Однако возможны и такие суждения, что пусть магнитного поля нет, но эффект вытеснения тока все равно будет, например, по другой физической причине. Поэтому пришлось поставить следующий эксперимент. Два медных канатика из 60 элементарных проводников через систему штекерных разъемов были соединены друг с другом так, что можно было измерить ток проводника в центре, на периферии и в промежуточных слоях. В качестве измерительных приборов использовались электронные вольтметры и осциллограф. Избранные источники питания позволяли выполнить установку следующих значений частот: 0; 100; 1000;  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  Гц. Однако явной разницы в токах различных проводников установить не удалось. И, тем не менее, термин «Поверхностный эффект» имеет полное право на существование, но, разумеется, при изменении физического смысла. Действительно, нет принципиальной разницы в том, какой показатель работы устройства проявляется лишь на поверхности проводника. Выполненное выше исследование показало, что таким показателем является магнитная напряженность. Поэтому возможна следующая трактовка поверхностного эффекта: «Поверхностный эффект – это способность проводника создавать собственное внешнее магнитное поле, которое начинается с его поверхности».

Приведем описание еще одного эксперимента, где также наблюдается явление поверхностного эффекта, но другого рода. В зазор сердечника электромагнита переменного тока была вставлена алюминиевая пластина. Одна из внешних поверхностей пластины имела масляный слой. Оказалось, что при включении устройства масляный слой выгорает так, что на пластине явно вырисовывается линейный контур, точно воспроизводящий периметр сердечника (см. рис.2).

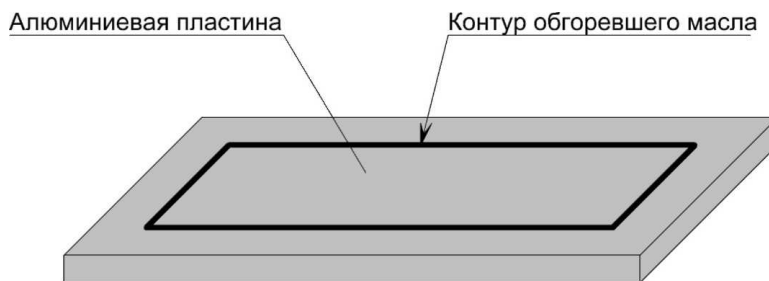


Рис.2 Алюминиевая пластина с контуром обгоревшего масла.

Это означает, что индукционный ток, наведенный в пластине, не растекается по ней в виде кольцевых окружностей, а сосредоточен в форме к.з. витка, охватывающего сердечник. Поэтому замена пластины на такой виток практически ничего не изменит в поведении устройства.

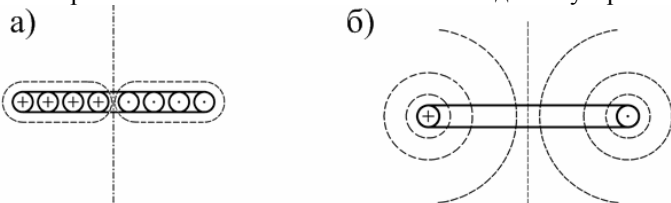


Рис.3 Магнитное поле пластины при изображении протекающих в ней токов в виде концентрических окружностей и в виде к.з. витка.

Аналитическое исследование результаты эксперимента также подтверждает, поскольку известно, что токи пластины оказывают на поле сердечника сильное размагничивающее действие. А токи растекающиеся в виде концентрических окружностей на такой эффект не способны, поскольку формируют в основном поперечное поле (см. рис.3а), направленное от периферии к центру. В то же время магнитное поле к.з. витка, действительно, является продольным и размагничивающим (см. рис.3б).

Следовательно, если в воздушный зазор электромагнита вставлена медная или алюминиевая пластина, размеры которой повторяют размеры сердечника, то ее индукционный ток будет сосредоточен вдоль кромок, представляя еще одну разновидность поверхностного эффекта.

#### Выводы

1. Установлено, что внутри проводника магнитного поля нет, а если проводник имеет трубчатое исполнение, то во внутренней полости будет сформировано магнитное поле.
2. Показано, что в условиях объективной реальности нет явления поверхностного эффекта в принятом понимании этого термина.
3. Термин «поверхностный эффект» в учебной и технической литературе может быть сохранен, но с изменением вкладываемой в него физической сути.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. –М.: Энергия, 1975. -705 с.
2. Демирчян К.С. др. Теоретические основы электротехники. –СПГ.: Питер, 2004. -377 с.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. –М.:Энергия, 1972.-240 с.