

РАССЕЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ФЕРРИТОВЫХ КОЛЬЦАХ

Аннотация. Показано, что вопреки сложившемуся мнению, рассеяние магнитного потока даже в ферритах с большой магнитной проницаемостью весьма велико. Сильно сказывается влияние размагничивающего фактора. Дано описание методики измерения параметров ферритов и катушек индуктивности на ферритовых кольцах. Приведены результаты экспериментальных измерений параметров для различных марок ферритов и различных значений магнитной проницаемости. Даны рекомендации по конструированию высокочастотных трансформаторов и катушек индуктивности на ферритовых кольцах.

1. Введение

Оптимальное конструирование узлов радиоаппаратуры невозможно без ясного понимания физических явлений и процессов. В частности понимание физических процессов при использовании ферромагнетиков затруднено тем, что теория «перегружена» сложными моментами математического характера. Только для несколько простейших задач было найдено строгое решение. Приложения теории для практических задач фактически отсутствуют. В данной работе сделана попытка экспериментального исследования явлений с целью дать ясное понимание особенностей при использовании ферритовых колец. Полученные качественные выводы будут полезны тем, кто конструирует элементы радиотехнических схем с использованием ферритовых колец, опираясь на опыт и интуицию.

Обычно считается, что весь магнитный поток сосредоточен в сечении ферритового кольца и практически рассеяние магнитного потока невелико. Поводом к такому подходу служит то обстоятельство, что относительная магнитная проницаемость ферритов, используемых в радиотехнических устройствах, составляет величины от десятков до тысяч. Например, формула справедлива, если относительная магнитная проницаемость кольцевого ферритового сердечника $\mu > 2000$.

$$L = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} hN^2 \ln \frac{D}{d} \quad (1.1)$$

где: μ - относительная магнитная проницаемость; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; N - число витков обмотки. Обозначения других величин, входящих в выражение (1.1) показаны на рис. 1.

На высоких радиочастотах (более 10 МГц) используются ферритовые кольца с низкой магнитной проницаемостью $\mu < 500$ и однослойной намоткой индуктивности. Рассеяние магнитного потока при малых значениях магнитной проницаемости может быть значительным.

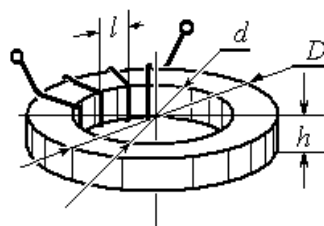


Рис.1

Рассеяние магнитного потока обусловлено размагничивающим фактором. Ферромагнетик имеет доменную структуру со спонтанной намагниченностью доменов. При воздействии внешнего магнитного поля происходит изменение ориентации вектора намагниченности в домене и изменению структуры магнитного потока вблизи домена и «выталкиванию» части магнитного потока из феррита («размагничивание») [1], [2], [3] и др.

Размагничивающий фактор — это безразмерная *тензорная* величина, которая зависит от формы и геометрии устройства. Теория расчета размагничивающего фактора является сложной. Строгие решения были получены только для нескольких частных случаев (эллипсоид, овоид и др.) [5]. Поэтому в инженерной практике даже приближенные результаты используются редко.

В данной работе мы предлагаем другой подход к описанию потока рассеяния в устройствах на ферритовых кольцах. В статье приводится описание методики измерений потока рассеяния, результаты экспериментальных исследований и некоторые практические рекомендации.

2. Метод измерения коэффициента магнитной связи

Исходные соотношения. Рассмотрим идеальный трансформатор без потерь на ферритовом кольце. Один из вариантов такого трансформатора, его эквивалентная схема и обозначения приведены на Рис. 2.

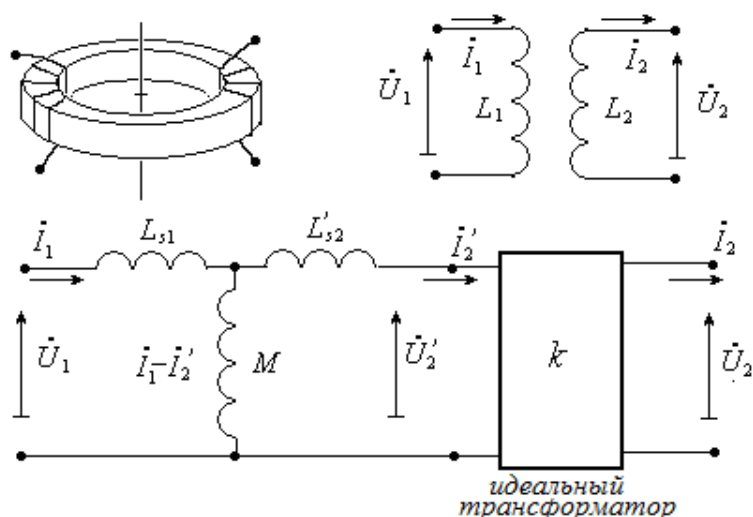


Рис. 2. Обозначения: L_1 и L_2 - индуктивности первичной и вторичной обмоток; L_{s1} и L'_{s2} - индуктивности рассеяния обмоток; M - коэффициент взаимной индукции; I_1 и I_2 - токи первичной и вторичной обмоток; U_1 и U_2 - напряжения на обмотках трансформатора; $L'_{s2} = L_{s2}/k^2$; $I'_1 = I_1/k$; $U'_1 = U_1/k$; $k = \sqrt{L_1/L_2}$.

Теперь мы записываем уравнения для комплексных амплитуд.

$$U_1 = j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 ; \quad U_2 = -j\omega M I_1 + j\omega L_2 I_2 \quad (2.1)$$

Ведем следующие обозначения:

1. Коэффициент трансформации $k = \sqrt{L_1/L_2}$
2. Коэффициент магнитной связи трансформации $\eta = M/\sqrt{L_1/L_2}$.

С учетом введенных обозначений уравнения примут вид

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1[\dot{I}_1 - \dot{I}_2 \frac{\eta}{k}] ; \dot{U}_2 = j\omega L_1[-\dot{I}_1 \eta + \dot{I}_2/k] \quad (2.2)$$

Для идеального трансформатора справедливы следующие соотношения

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2/k; \quad \dot{U}'_2 = \dot{U}_2 k \quad (2.3)$$

Учитывая эти соотношения, мы можем привести эквивалентную схему замещения к первичной обмотке и выделить в схеме идеальный трансформатор, как показано на нижней схеме Рис. 2. Теперь можно записать следующую систему уравнений для эквивалентной схемы трансформатора с коэффициентом трансформации 1:1.

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1[\dot{I}_1 - \eta \dot{I}'_2] ; \dot{U}_2 = j\omega L_1[-\dot{I}_1 \eta + \dot{I}'_2] \quad (2.4)$$

Теперь необходимо привести полученные уравнения к окончательному виду.

$$\dot{U}_1 = j\omega L_1[(1 - \eta)\dot{I}_1 + \eta(\dot{I}_1 - \dot{I}'_2)] ; \dot{U}_2 = j\omega L_1[-\eta(\dot{I}_1 - \dot{I}'_2)I_1 + (1 - \eta)\dot{I}'_2] \quad (2.5)$$

Система уравнений полностью отвечает эквивалентной схеме трансформатора (1:1), изображенной на Рис. 2. Теперь можно расшифровать удобство обозначений.

1. Индуктивность первичной обмотки трансформатора L_1 .
2. Индуктивность вторичной обмотки трансформатора $L'_2 = L_1 = L_2 / k^2$.
3. Взаимная индуктивность $M = L_1 \eta$.
4. Индуктивности рассеяния $L_{s1} = L_{s2} = L_1(1 - \eta)$.

Основные параметры. Как видно из полученных уравнений для определения параметров трансформатора (не имеющего потерь и не содержащего емкостей) достаточно знать три параметра:

1. Идеальный коэффициент трансформации k .
2. Коэффициент магнитной связи η .
3. Индуктивность первичной обмотки L_1 .

Индуктивность первичной обмотки и коэффициент трансформации измеряются обычными методами. Что касается коэффициента магнитной связи, то здесь наиболее удобно использовать метод «*холостого хода и короткого замыкания*».

Метод холостого хода и короткого замыкания. Мы изложим сущность метода.

1. На холостом ходу (вторичная обмотка трансформатора разомкнута – «*холостой ход*») измеряется индуктивность первичной обмотки $L_{xx} = L_1$.
2. Затем мы измеряем индуктивность первичной обмотки при условии, что вторичная замкнута накоротко («*короткое замыкание*») $L_{кз}$.

Коэффициент магнитной связи мы можем подсчитать по формуле

$$\eta = \sqrt{1 - L_{кз}/L_{xx}} \quad (2.6)$$

Здесь мы привели упрощенный подход. В строгом подходе должны учитываться потери в феррите и потери в проводах. Однако при наличии небольших потерь все соотношения остаются справедливыми.

Итак, достаточно провести два измерения, чтобы вычислить величину коэффициента магнитной связи между обмотками трансформатора.

3 Результаты измерений

Изложенная выше методика измерения коэффициента магнитной связи можно с успехом использовать для измерения рассеяния магнитного потока ферритовых стержней, колец и других изделий.

На ферритовое кольцо наматывается тонким проводом (диаметр 0,06 мм) катушка из 5 витков. Витки накладываются плотно, чтобы уменьшить начальный поток рассеяния магнитного поля. Измеряется индуктивность холостого хода. Затем на ферритовый тор плотно надевается короткозамкнутое кольцо, которое можно перемещать по тору (см. рис. 2). Проводятся измерения индуктивности при наличии короткозамкнутого кольца при различных угловых расстояниях этого кольца от обмотки катушки.

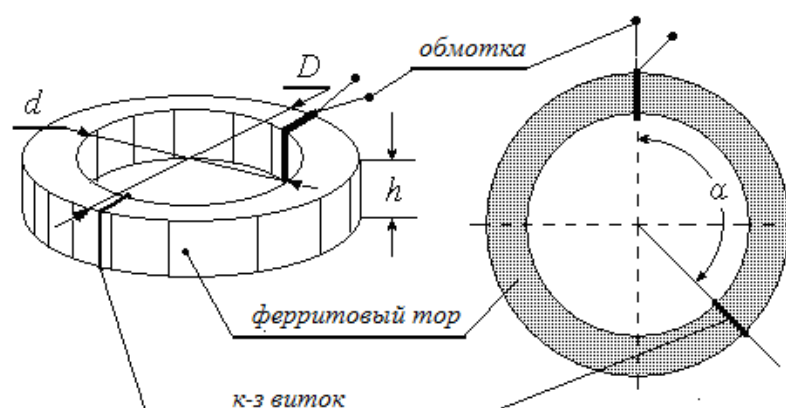


Рис. 3

Мы будем отсчитывать расстояние в угловых единицах (угол α), как показано на рис. 2. Это удобно, поскольку не связано с размерами ферритового тора. Очевидно, что минимальная магнитная связь между катушкой и к.з. витком (рис. 2) будет при угловом расстоянии, равном 180° , а максимальная – при угле, близком к нулю.

Результаты измерений. Измерения проводились на различных типоразмерах ферритов. При проведении измерений учитывались потери. Измерения проводились при угловом перемещении короткозамкнутого кольца на 20° . Типичные результаты представлены на приведенных ниже графиках (рис. 3 и рис. 4).

Марки российских ферритов имеют следующие обозначения (например, 2000 НМ 16x10x45):

1. 2,000 (начальная магнитная проницаемость);
2. НН; НМ; ВЧ и т.д. – марка материала;
3. 16 x 10 x 4.5 – размеры ферритового кольца – $D \times d \times h$ (mm)

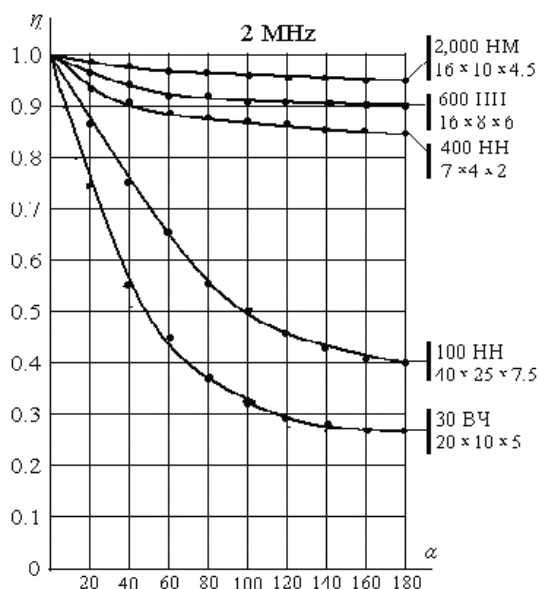


Рис. 4

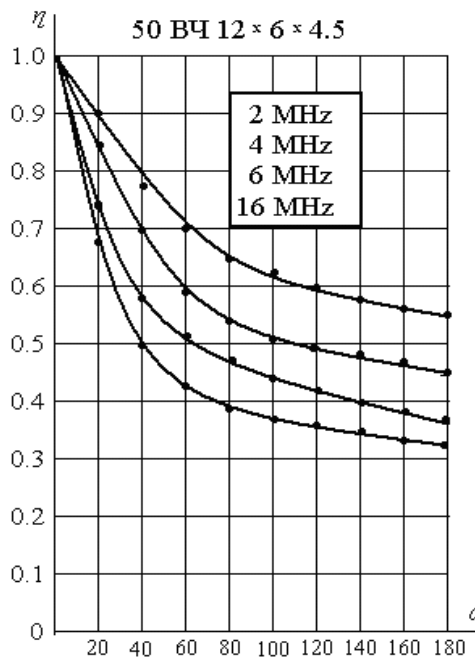


Рис. 5

Из рисунков видно, что

1. Рассеяние магнитного потока растет по мере увеличения угла α , т.е. от расстояния между соседними витками. Это очевидный результат.

Более интересным и важным является увеличения рассеяния с уменьшением величины магнитной проницаемости. Например, на частоте 2 МГц (рис. 4) у ферритов с магнитной проницаемостью менее 400 магнитный поток падает на диаметрально противоположной от катушки стороне до 30 - 50 процентов.

Рассеяние также возрастает с увеличением частоты (рис. 5).

Все это необходимо учитывать при расчетах трансформаторов и катушек на ферромагнитных кольцах.

2. Однослойная катушка индуктивности

Однослойные катушки на ферритовых кольцах используются на высоких частотах. Здесь важными могут оказаться следующие требования: высокая добротность (малые потери), малое рассеяние магнитного потока (трансформаторы и т.д.)

Выше мы приводили формулу (1.1) для расчета индуктивности катушки. Эта формула справедлива, если размагничивающий фактор практически не влияет на рассеяние магнитного потока. При наличии рассеяния магнитного потока эта формула может дать большую ошибку. Мы рассмотрим влияние рассеяния магнитного потока для коротких катушек, занимающих не более $\frac{1}{4}$ длины кольца.

В этом случае зависимость $\eta = f(\alpha)$ мы можем аппроксимировать экспонентой

$$\eta = e^{-b\alpha} \quad (0 < \alpha < 90^\circ) \quad (4.1)$$

где: b – фактор рассеяния.

Данные b для различных марок ферритов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Марка феррита	Фактор рассеяния b (1/град)
2,000 НМ 16 x 10 x 4.5	0.00075
600 НН 16 x 8 x 6	0.0015
400 НН 7 x 4 x 2	0.00275
100 НН 40 x 25 x 7.5	0.00675
30 ВЧ 20 x 10 x 5	0.0175

При наличии рассеяния формула (1.1) требует уточнения. В формулу (1.1) необходимо ввести поправочный множитель $F(N, \eta_0)$

$$L = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} hN^2 \ln \frac{D}{a} F(N; \eta_0) \quad (4.1)$$

где: N – число витков однослойной катушки; η_0 – коэффициент магнитной связи между соседними витками.

Связь между соседними витками определяется формулой

$$\eta_0 = \exp(-2b\alpha_0) \quad (4.2)$$

где $\alpha_0 = 104l/d$ – угловое расстояние между соседними витками, выраженное в градусах.

Если однослойная катушка намотана на небольшой части ферритового тора, то поправочный множитель можно вычислить по формуле (без вывода)

$$F(N; \eta) = \frac{1}{N^2} \left[N + 2\eta \frac{(N-1) - N\eta + \eta^N}{(1-\eta)^2} \right]$$

В этой формуле принято допущение, что взаимная связь между витками уменьшается по экспоненциальному закону. При малых длинах катушки это предположение допустимо. Значения функции $F(N; \eta_0)$ для различных значений N и η_0 приведены в Таблице 2.

Таблица 2 Значения функции $F(N; \eta_0)$ для некоторых N и η_0

$\eta_0 =$ 0,95	$\eta_0 =$ 0,90	$\eta_0 =$ 0,80	$\eta_0 =$ 0,70
0,956	0,913	0,831	0,753
0,939	0,881	0,774	0,678
0,923	0,852	0,724	0,616
0,907	0,824	0,680	0,563
0,893	0,798	0,641	0,518
0,878	0,773	0,605	0,479

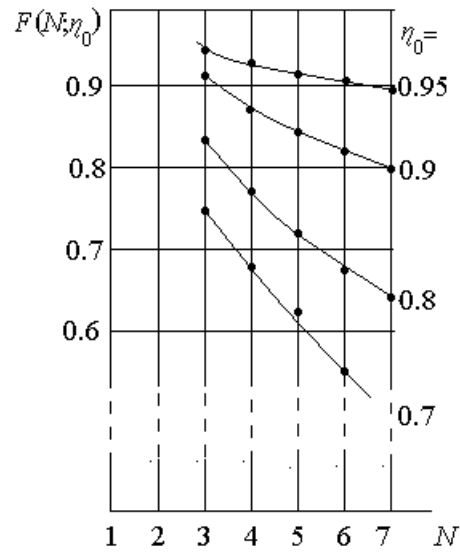


Рис. 6

Графики зависимости изображены на Рис. 6. Этих данных достаточно для некоторых выводов. Например, если нет жестких требований к габаритам устройства, тогда имеет смысл применять ферриты большого поперечного сечения. Это уменьшит число витков, снизит потери в проводах и уменьшит рассеяние магнитного поля.

Трансформатор. Очевидно, что располагать первичную и вторичную обмотки необходимо ближе друг к другу, чтобы минимизировать индуктивность рассеяния. В качестве примера рассмотрим трансформатор с коэффициентом трансформации 1:1 и числом витков первичной и вторичной обмоток, равным 2. Различные варианты расположения витков показаны на рис. 6.

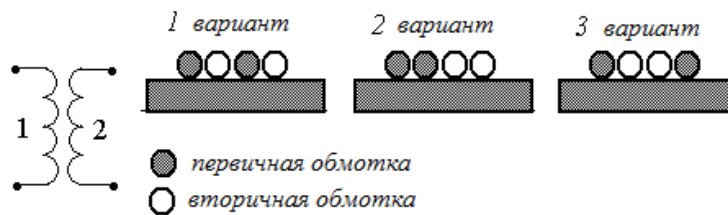


Рис. 6

Запишем выражения для индуктивности первичной обмотки, вторичной обмотки, взаимной индуктивности и коэффициента связи обмоток.

- Первый вариант.

$$L_1 = 2L_0(1 + \eta_0^2); \quad L_2 = 2L_0(1 + \eta_0^2); \quad M = L_0\eta_0(3 + \eta_0^2); \quad \eta = \eta_0(3 + \eta_0^2)/2(1 + \eta_0^2)$$

- Второй вариант

$$L_1 = 2L_0(1 + \eta_0); \quad L_2 = 2L_0(1 + \eta_0); \quad M = L_0\eta_0(1 + \eta_0)^2; \quad \eta = \eta_0(1 + \eta_0)/2$$

- Третий вариант.

$$L_1 = 2L_0(1 + \eta_0); \quad L_2 = 2L_0(1 + \eta_0^3); \quad M = 2L_0\eta_0(1 + 2\eta_0);$$

$$\eta = \eta_0(1 + 2\eta_0) / \sqrt{(1 + \eta_0)(1 + \eta_0^3)}$$

Сравнительная оценка коэффициентов магнитной связи приведена в Таблице 3.

Таблица 3

η_0		0,95	0,9	0,85	0,8	0,7
1 вариант	η	0,961	0,920	0,876	0,829	0,728
2 вариант		0,926	0,855	0,786	0,720	0,595
3 вариант		0,973	0,943	0,910	0,873	0,788

Рассмотренный пример показывает, как важно выбирать правильное распределение витков первичной и вторичной обмоток для минимизации индуктивности рассеяния или увеличения магнитной связи обмоток трансформатора.

5. Методы уменьшения рассеяния магнитного потока

Основной проблемой конструирования ВЧ трансформаторов использованием ферритовых магнитопроводов является проблема минимизации рассеяния магнитного потока. Очевидными способами являются выбор магнитопроводов с максимально возможной относительной магнитной проницаемостью. Однако на высоких частотах большие потери ограничивают использование ферритов с высоким μ . Другим способом является максимально плотная намотка индуктивностей и максимально возможное сближение вторичной и первичной обмоток. Третьей – распределение витков вторичной обмотки относительно первичной таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную магнитную связь между ними.

Есть еще один способ уменьшения потока рассеяния –внутренняя экранировка.

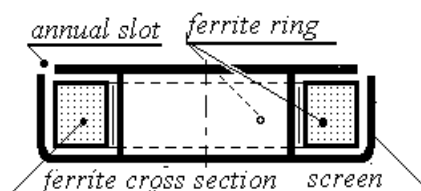


Рис. 7

Как показали экспериментальные исследования, эффективным способом является “экранировка ферритового кольца”. Суть ее проста. Если покрыть феррит проводящим слоем, то весь ВЧ магнитный поток окажется внутри феррита. Токи Фуко не выпустят его за пределы экрана. Однако при таком способе обмотки, намотанные сверху такой системы, не смогут возбудить магнитный поток в феррите.

Выход достаточно простой. В экране по окружности прорезается кольцо, как показано на рис. 7. При таком способе экран уже не представляет собой короткозамкнутый виток.

Экспериментальная зависимость η от угла α для феррита без экрана и для феррита с экраном приведена на рис. 8. Как видно из графиков экран существенно уменьшает рассеяние магнитного потока.

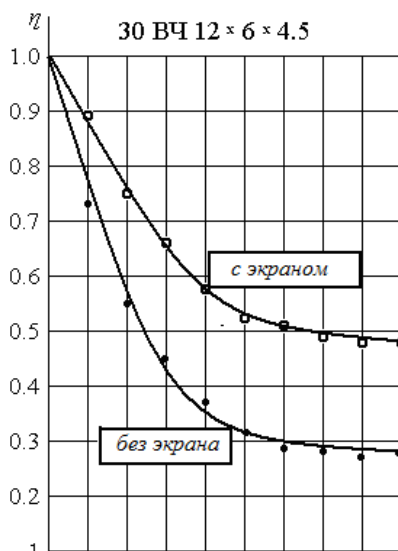


Рис. 8.

Экран (металлическое покрытие поверхности феррита) можно наносить различными способами (химическим, электрохимическим и др.). Металл пластичен. При такой обработке металлизированная поверхность тора не обладает ярко выраженными абразивными свойствами. Это позволяет наматывать витки непосредственно на металлическую поверхность. Для обычной поверхности феррита такой способ непригоден. Поверхность феррита до намотки витков должна быть покрыта каким-либо материалом для защиты изоляции проводов. А это, в свою очередь, увеличивает рассеяние магнитного потока, т.е. уменьшает магнитную связь между витками.

Не менее интересные результаты от экранирования получаются с ферритовыми стержнями, используемыми как ферритовые антенны. На Рис. 9 показана конструкция. На ферритовый стержень наматывается несколько витков алюминиевой фольги с изолирующей бумагой, используемой при производстве бумажных конденсаторов.

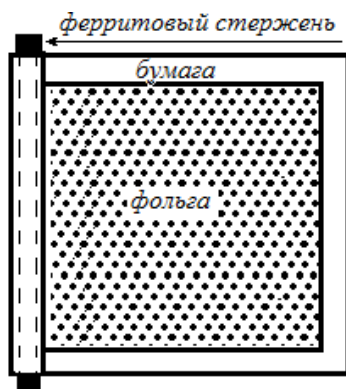


Рис. 9

Бумажная подложка необходима для защиты от короткого замыкания слоев фольги. При замыкании образуется к-з виток и эффект исчезает. Результат в том, что изменяется ширина главного лепестка антенны. Но это специальная тема.

6. Заключение

Итак, мы привели описание методики измерения основных параметров индуктивностей и трансформаторов, использующих ферритовые кольца. Мы привели для иллюстрации результаты экспериментальных измерений, которые позволяют грамотно подходить к решению конструкторских задач. Мы можем сделать следующие выводы.

- Если нет жестких требований к габаритам, можно улучшить качество изделия, применяя ферриты большого размера.
- Целесообразно использовать плотную намотку витков с целью увеличения взаимной связи между витками.
- Экранирование ферритового кольца есть хороший метод уменьшения потока рассеяния магнитного поля и возможность применения ферритов с малыми потерями, имеющими низкое значение μ .

Изложенный метод измерения коэффициента рассеяния магнитного потока можно использовать для цилиндрических ферритовых стержней и т.д. Полученные результаты будут полезны тем, кто конструирует элементы радиотехнических схем с использованием ферритовых колец, опираясь только на опыт и интуицию.

Ссылки:

[1] [A haroni, Amikam](#) (1996). Introduction to the Theory of Ferromagnetism. [Clarendon Press](#). ISBN 0-19-851791-2.

[2] [Brown, Jr., William Fuller](#) (1962). Magnetostatic Principles in Ferromagnetism. [Interscience](#).

[3] [Griffiths, David J.](#) (1999). Introduction to Electrodynamics (third ed.). [Prentice Hall](#). ISBN 978-0-13-805326-0.

[4] Nayfeh, Munir H.; Brussel, Morton K. (1985). Electricity and Magnetism. [John Wiley & Sons](#). ISBN 0-471-87681-X.

[5] Solivérez, C. E. (1981). "Magnetostatics of Anisotropic Ellipsoidal Bodies". *IEEE Transactions on Magnetism*. **17** (3): 1363 – 4. [Bibcode:1981ITM....17.1363S](#), [doi:10.1109/TMAG.1981.1061200](#).