

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКРАНОВ НА ПАРАМЕТРЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

У т в е р ж д е н о
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторной работе
для студентов

Куйбышев 1988

УДК 621.396.69

В методических указаниях рассматриваются вопросы влияния размеров и материалов экрана на параметры катушки индуктивности, производятся экспериментальные исследования этих зависимостей. Методические указания предназначены для студентов специальности 0705.

Составитель Л.М.Капитонова

Рецензенты: И.И.Волков, Б.В.Скворцов

Цель работы — исследование влияния размеров экрана и катушки индуктивности и материала экрана на индуктивность катушки и ее добротность.

З а д а н и я. 1. Изучить принципы экранирования постоянного и медленно изменяющегося магнитного поля.

2. Изучить принципы экранирования высокочастотного магнитного поля.

3. Исследовать влияние относительных размеров экрана и катушки индуктивности на индуктивность и добротность высокочастотной катушки.

4. Исследовать влияние материала экрана на индуктивность и добротность высокочастотной катушки индуктивности.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Принципы экранирования постоянного и медленно изменяющегося переменного магнитного поля

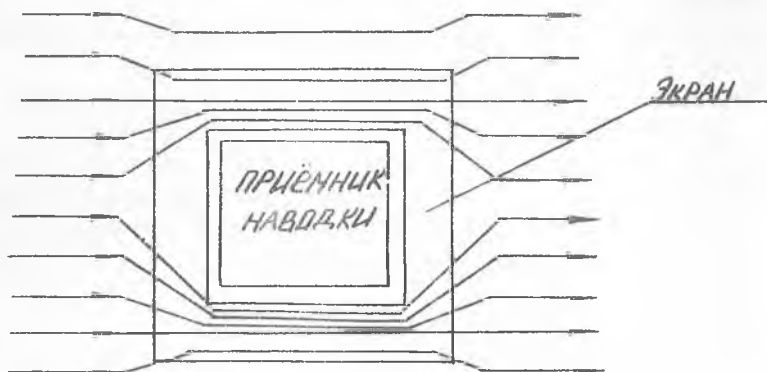
Экранирование как низкочастотного, так и высокочастотного магнитного поля основано на явлении электромагнитной индукции.

Для защиты от постоянного магнитного поля и магнитного поля низкой частоты используются экраны, изготовленные из ферромагнитных материалов (пермаллой или стали) с большой относительной магнитной проницаемостью μ_z . При наличии такого экрана линии магнитной индукции проходят в основном по его стенкам (рис. 1), которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана. Качество экранирования таких полей зависит от магнитной проницаемости экрана и сопротивления магнитопровода, которое будет тем меньше, чем толще экран и чем меньше в нем стыков и швов, идущих поперек направления линий магнитной индукции. Этот вид экранирования называется магнитостатическим и используется при необходимости подавить наводку на частотах 0...1 кГц. Здесь эффективность экранирования не зависит от частоты и ее можно приближенно определить по следующему выражению $[1]$:

$$\mathcal{E} = 1 + \mu_z d_g / D_g, \quad (1)$$

где μ_z — относительная магнитная проницаемость материала экрана;
 d_g — толщина стенок экрана;

d_3 - диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий к длине стенки кубического экрана.



Р и с. 1.

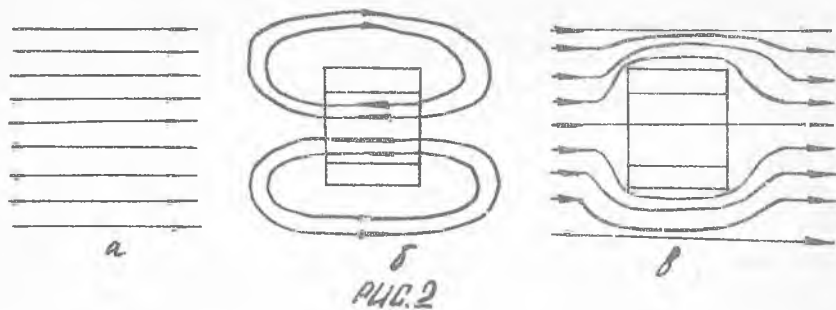
Для уменьшения сопротивления магнитному потоку стенки экрана делают достаточно толстыми (0,5...15 мм). Увеличением толщины стенок добиться значительного повышения эффективности невозможно.

Получить удовлетворительную эффективность удастся только при применении специальных материалов с высокой μ . Так, например, эффективность экрана из стали при $d_3 = 0,8$ мм и $\mu_2 = 100$ составляет 1,8. Если заменить сталь на пермаллой $\mu_2 = 5000$, то при прежней толщине $d_3 = 0,8$ эффективность возрастает до 41.

Принципы экранирования высокочастотного магнитного поля

Экранирование переменного высокочастотного магнитного поля производится с помощью экранов, изготовляемых из немагнитных и ферромагнитных металлов. Оно основано на использовании явления магнитной индукции.

Рассмотрим эффект экранирования более подробно. Если на пути равномерного переменного магнитного поля (рис. 2, а) поставить медный цилиндр, то в нем возбуждаются переменные ЭДС, которые, в свою очередь, создадут индукционные вихревые токи. Магнитное поле этих токов будет



Р и с. 2.

замкнутым (рис. 2,б). Внутри цилиндра оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами – в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным у цилиндра и усиленным вне его, т.е. происходит вытеснение поля из пространства, занимаемого цилиндром, в чем и заключается его экранирующее действие. Оно будет тем больше, чем больше создаваемое цилиндром обратное магнитное поле, и, следовательно, чем больше протекающие по нему вихревые токи. Вихревые токи в экранирующем цилиндре распределяются неравномерно по его сечению вследствие явления поверхностного эффекта. Плотность вихревых токов и напряженность переменного магнитного поля по мере углубления в металл падает по экспоненциальному закону

$$j_{xc} / j_{пов} = e^{-x/\delta}, \quad (2)$$

где j_{xc} – плотность тока по глубине x ;
 $j_{пов}$ – плотность тока на поверхности ;

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}, \quad (3)$$

δ – показатель уменьшения поля и тока, который называют эквивалентной глубиной проникновения ;

σ – удельная проводимость материала экрана ;

$\mu = \mu_0 \mu_z$ - магнитная проницаемость материала $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ г/см;

μ_z - относительная магнитная проницаемость материала.

Величиной эквивалентной глубины проникновения δ вихревых токов удобно характеризовать экранирующий эффект. Чем меньше δ , тем больший ток течет в поверхностных слоях экрана, тем больше создаваемое им магнитное поле, вытесняющее из пространства, занятого экраном, внешнее поле источника наводки. Если экран сделан из немагнитного материала, то в выражении (3) $\mu = 1$, экранирующий эффект определяется только удельным сопротивлением материала и частотой экранируемого поля.

Для характеристики уменьшения плотности вихревого тока и напряженности поля в 10 и 100 раз от их значения на поверхности вводятся еще понятия глубины проникновения $\delta_{0,1}$ и $\delta_{0,01}$, которые соответственно составляют $\delta_{0,01} = \delta \lg 100 = 4,6 \delta$,

$\delta_{0,1} = \delta \lg 10 = 2,3 \delta$.

В таблице приведены значения эквивалентной глубины проникновения δ на различных частотах для различных экранирующих материалов.

Характеристика материала	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь	Сталь	Пермаллой
Удельное сопротивление ρ , Ом·мм ² /м	0,0175	0,06	0,03	0,1	0,1	0,65
Удельная проводимость, σ	$57 \cdot 10^4$	$16,6 \cdot 10^4$	$33 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$1,54 \cdot 10^4$
Относительная магнитная проницаемость μ_z	1	1	1	50	100	12000
Эквивалентная глубина проникновения δ , мм при частоте Цц:						
10 ²	6,7000	12,4000	8,8000	-	1,540	0,38
10 ³	2,1000	3,9000	2,7500	-	0,490	0,12

Характеристика материала	Медь	Латунь	Алюминий	Сталь	Сталь	Пермаллой
10^4	0,6700	1,2400	0,8800	-	1,154	0,038
10^5	0,2100	0,3900	0,2750	-	0,049	0,012
10^6	0,0670	0,1240	0,0880	0,0230	-	-
10^7	0,0210	0,0390	0,0275	0,0070	-	-
10^8	0,0067	0,0124	0,0088	0,0023	-	-

Из формулы (3) следует, что для меди $\delta_{Cu} = \frac{0,67}{\sqrt{f}}$ и при $f = 10$ кГц $\delta_{Cu} = 0,67$ мм, а при $f = 1$ МГц $\frac{0,67}{\sqrt{f}} = 0,067$ мм, т.е. для изготовления экранов на высоких частотах может быть взята весьма тонкий материал. Экраны изготавливаются из алюминия толщиной 0,25...1,0 мм или меди. Однако, медные экраны дороги, что ограничивает их применение. Латунный экран вносит несколько большие потери, чем алюминиевый, и значительно тяжелее его, поэтому применяются редко. Экраны для стабильных катушек изготавливают из материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения, например, инвар.

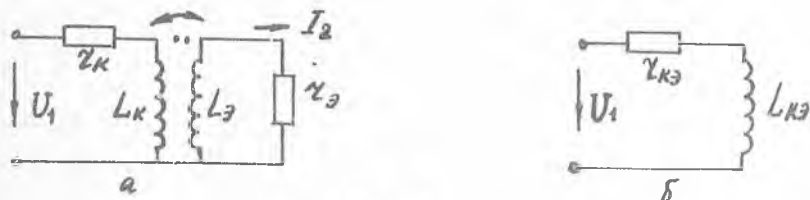
Влияние экрана на электрические параметры катушки индуктивности

Точный расчет действия экрана в большинстве случаев является трудной задачей, так как используемые на практике конструкции экранов весьма разнообразны и часто отличаются от элементарных форм, для которых выведены расчетные формулы. Поэтому обычно проводят ориентировочный расчет, при этом реальная конструкция приводится к эквивалентному цилиндрическому экрану.

При выполнении соотношения $\frac{L_2}{L_K} > \frac{D_2}{D_K}$ цилиндрический экран можно считать короткозамкнутым витком, с которым витки катушки индуктивно связаны. Эквивалентная схема системы катушка - экран может быть представлена в виде, показанном на рис. 3,а.

На рис. 3 даны следующие обозначения: L_K - индуктивность катушки; Z_K - активное сопротивление провода катушки; M - взаимная индуктивность между катушкой и экраном; Z_2 - активное сопротивление экрана; L_2 - индуктивность экрана.

Для токов и напряжений в схеме введены следующие обозначения:
 U_1 - напряжение на зажимах катушки индуктивности; I_1 - ток в катушке индуктивности; I_2 - вихревой ток в экране.



Р и с. 3.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первичного и вторичного контура:

$$Z_K \dot{I}_1 + j x_{L_K} \dot{I}_1 - j \omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1,$$

$$Z_Э \dot{I}_2 + j x_{L_Э} \dot{I}_2 - j \omega M \dot{I}_1 = 0,$$

$$x_{L_K} = \omega L_K; \quad x_{L_Э} = \omega L_Э.$$

Решая уравнения относительно \dot{I}_1 , получим

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{(Z_K + \Delta Z_Э) + j(x_{L_K} + \omega \Delta L_Э)}, \quad (4)$$

где (4)

$$\Delta L_Э = - \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 L_Э^2 + Z_Э^2} L_Э,$$

$$\Delta Z_Э = \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 L_Э^2 + Z_Э^2} Z_Э. \quad (6)$$

Из структуры выражения (4) следует, что со стороны первичной обмотки (катушки индуктивности) вся схема может рассматриваться как двухполюсник с сопротивлением $X_{КЭ} = X_{L_K} + \omega \Delta L_Э$, и $Z_{КЭ} = Z_K + \Delta Z_Э$ (рис. 3, б). Наличие экрана привело к изменению активного и реактивного сопротивлений катушки индуктивности.

Вносимое реактивное сопротивление имеет знак, противоположный знаку χ_{LK} , что соответствует уменьшению эквивалентной индуктивности катушки с экраном.

Индуктивность L_3 может быть найдена как индуктивность витка с соответствующими размерами D_3 и l_3 , причем, активное сечение витка определяется величиной δ . Обычно $\omega L_3 \gg Z_3$ и выражение (5) упрощается: $\Delta L_{K3} = -M^2/L_3$.

Используем выражение для взаимной индуктивности $M = K\sqrt{L_K L_3}$, где K - коэффициент связи, характеризующий степень индуктивной связи катушки индуктивности и экрана. Тогда $\Delta L_{K3} = -K^2 L_K$. Индуктивность катушки с экраном может быть представлена в виде

$$L_{K3} = L_K - K^2 L_K = L_K (1 - K^2). \quad (7a)$$

Из полученного соотношения (7a) следует, что степень уменьшения величины L_{K3} по сравнению с величиной L_K определяется коэффициентом связи K , взаимным расположением катушки и экрана.

Индуктивность экранированной катушки L_{K3} может быть определена из выражения, содержащего относительные размеры катушки и экрана

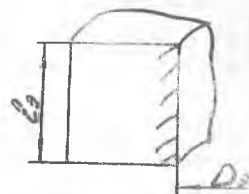
$$L_{K3} = L_K \left[1 - \left(\frac{D_K}{D_3} \right)^3 \right] \left[1 - \left(\frac{l_K}{l_3} \right)^2 \right]. \quad (7b)$$

Из выражения (6) следует, что вносимое активное сопротивление всегда больше нуля. В нем поглощается энергия, которая передается из первичной цепи по вторичную.

С учетом соотношения $\omega L_3 \gg Z_3$, выражение (6) принимает вид

$$\Delta Z_3 = \frac{K^2 L_K}{L_3}.$$

Сопротивление Z_3 находится по формулам (рис. 4) $Z_3 = \rho_3 \frac{\pi D_3}{l_3 \delta}$, окончательно для ΔZ_3 имеем



Р и с. 4.

$$\Delta Z_3 = \frac{K^2 L_K}{L_3} = \rho \frac{\pi D_3}{l_3 \delta}. \quad (8)$$

Очевидно, что величина ΔZ_3 , характеризующая потери на вихревые токи, находится в прямо пропорциональной зависимости от удель-

ного сопротивления материала ρ . Необходимо отметить, что активные потери ΔZ при использовании экранов из ферромагнитных материалов, кроме составляющей $\Delta Z_B = \Delta Z_B$, определяемой с помощью формулы (8), имеет составляющую ΔZ_r , обусловленную гистерезисными свойствами материала экрана (потери на гистерезис): $\Delta Z = \Delta Z_B + \Delta Z_r$.

Дополнительное увеличение потерь за счет потерь на гистерезис приводит к сильному снижению добротности катушки при использовании экранов из магнитных материалов. Это обстоятельство существенным образом влияет на выбор материала экрана. Уменьшение индуктивности и увеличение активного сопротивления катушки с экраном приводит к уменьшению добротности катушки.

Итак, влияние экранов на параметры экранированной катушки склывается в следующем:

1. Уменьшается индуктивность катушки. Чтобы уменьшение индуктивности не было велико, обычно диаметр экрана берут примерно равным удвоенному диаметру катушки. Коэффициент связи при этом небольшой, индуктивность уменьшается не более чем на 20%.

2. Увеличивается активное сопротивление катушки. Чтобы активное сопротивление было незначительным, используют немагнитные материалы с небольшим удельным сопротивлением ($\sigma_{и}, \rho_{в}$).

3. Уменьшается добротность в результате изменения индуктивности и активного сопротивления $Z_{кз}$ катушки.

4. Возрастает собственная емкость катушки вследствие появления дополнительной емкости между витками катушки и экраном. Следует отметить, что влияние экрана на параметры катушки (добротность, индуктивность) аналогично влиянию сердечника в экране и сердечнике при воздействии электромагнитного поля.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить величину индуктивности $L_{к}$ и добротности $Q_{к}$ катушки без применения экрана, измерить основные размеры катушки ($\ell_{к}$, $D_{к}$) и экрана ($\ell_{э}$, $D_{э}$).

2. Исследовать влияние относительных размеров экрана на параметры катушки.

Снять зависимость индуктивности $L_{кз}$ и добротности $Q_{кз}$ экранированной катушки от соотношения диаметра катушки и экрана. Полученные данные свести в табл. I и построить соответствующие графики.

Т а б л и ц а I

D_3/D_K	L_K	L_{K3}	$\Delta L =$ $= L_K -$ $- L_{K3}$	$\Delta L/L_K$	Q_{K3}	$\Delta Q = Q_K -$ $- Q_{K3}$	$\Delta Q/Q_K$

Снять зависимость индуктивности L_{K3} и добротности Q_{K3} экранированной катушки индуктивности от соотношения высоты катушки и экрана. Полученные данные свести в табл. 2 и построить соответствующие графики.

Т а б л и ц а 2

h_3/h_K	L_K	L_{K3}	ΔL	$\Delta L/L_K$	Q_{K3}	$\Delta Q = Q_K -$ $- Q_{K3}$	$\Delta Q/Q_K$

3. Определить влияние расположения щели в экране на параметры экранирующей катушки. Полученные данные свести в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Тип щели	L_{K3}	Q_{K3}
Щели нет		
Щель горизонтальная		
Щель вертикальная		

4. Снять зависимость L_{K3} и Q_{K3} от материала экрана. Данные свести в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Материал экрана	Удельное сопротивление ρ , $\frac{\text{ОМ ММ}^2}{\text{М}}$	Относительная магнитная проницаемость μ
Медь	0,017	I
Алюминий	0,028	I

Материал экрана	Удельное сопротивление $\rho, \frac{\text{ОМ}\cdot\text{мм}^2}{\text{М}}$	Относительная магнитная проницаемость μ
Латунь	0,03-0,06	I
Сталь Электротехническая сталь Э31	0,098	5500

5. Проанализировать полученные экспериментальные данные и сделать вывод об оптимальном соотношении между размерами катушки и экрана.

Библиографический список

- Попов В.П. Основы теории цепей. - М.: Высшая школа, 1985.
 Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. - М.: Радио и связь, 1981.

Составитель Лилия Михайловна Капитонова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКРАНОВ НА ПАРАМЕТРЫ
 ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Редактор Е.Д.Антонова
 Техн.редактор Н.М.Каленюк
 Корректор О.Ю.Ненашева

Подписано в печать 17.03.88 г. Формат 60x84^I/16
 Бумага оберточная. Печать оперативная.
 Уч.-изд.л. 0,6. Усл.п.л. 0,5. Т. 500 экз.
 Заказ № 3688. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
 авиационный институт имени академика С.П.Королева,
 г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип.им.В.П.Мяги Куйбышевского полиграфического
 объединения. 443099, г. Куйбышев, ул.Венцека, 60.