

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И.Кузевных

**Исследование высокочастотных
катушек индуктивности**

*Методические указания по выполнению
лабораторной работы для студентов специальности 210201
Проектирование и технология радиоэлектронных средств*

2011

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	3
2	Основные теоретические положения	4
2.1	Физическая сущность индуктивности	4
2.2	Индуктивность ВКИ	6
2.3	Добротность ВКИ	7
2.4	Собственная ёмкость ВКИ	8
2.5	Схема замещения катушки индуктивности	9
2.6	Влияние экранов на параметры ВКИ	9
3	Описание лабораторной установки	10
4	Задание и методические указания	10
4.1	Программа исследований	10
4.2	Методические указания	12
5	Контрольные вопросы	13
	Список литературы	13
	Приложение А. Краткая инструкция по использованию прибора Е9-4	14
	Приложение Б. Расчётные соотношения	17

1 ВВЕДЕНИЕ

Под высокочастотной катушкой индуктивности (ВКИ) понимается свернутый в спираль проводник, обладающий в области высоких частот значительным индуктивным и относительно малым активным сопротивлением. В соответствии с ГОСТ 19880-74 катушка индуктивности – это элемент электрической цепи, предназначенный для использования его индуктивности.

Конструктивно катушки индуктивности выполняются цилиндрическими, плоскими, печатными, микроминиатюрными в виде чип-элементов для поверхностного монтажа и т. д. По типу намотки они разделяются на однослойные, многослойные, печатные, на секционированные и несекционированные. В свою очередь однослойные ВКИ бывают со сплошной, шаговой и прогрессивной намоткой, а также с вожженной в каркас обмоткой, каркасные и бескаркасные. Многослойные могут быть выполнены простой рядовой намоткой или “внавал”, универсальной намоткой типа “универсаль”, универсальной перекрестной и другими типами намоток. Плоские и печатные катушки выполняются: односторонними и двусторонними; со спиральными, прямоугольными и произвольной формы витками. Все типы катушек могут быть выполнены без сердечников, с ферромагнитными и немагнитными сердечниками, с экранами и без экранов.

В зависимости от назначения ВКИ делятся на катушки контуров, катушки связи и дроссели высокой частоты.

Катушки контуров используются для реализации электрических колебательных контуров, фильтров и линий задержки на сосредоточенных LC – элементах. К ним предъявляются наиболее жесткие требования по точности, добротности и стабильности. От последних в прямой зависимости находятся точность и стабильность резонансной частоты контуров, добротность контуров, точность и стабильность времени задержки, частотные свойства фильтров и другие показатели качества. Конструктивно катушки контуров, в зависимости от конкретных требований, исполняются весьма разнообразно: каркасные и бескаркасные, секционированные и несекционированные, с однослойной (сплошной, шаговой и прогрессивной) и многослойной (простой и специальной) намотками, а также с вожженной обмоткой, с магнитными и немагнитными сердечниками и т.д.

К **катушкам связи** относятся ВКИ, предназначенные для передачи высокочастотных колебаний из одной цепи в другую. Они применяются для связи и согласования входной цепи радиоприемника с антенной или выходной цепи радиопередатчика с антенной, для согласования усилительных устройств, в связанных колебательных контурах и т.д. В последнее время катушки связи нашли широкое применение в качестве элементов согласования различных устройств функциональной электроники с источниками сигналов и нагрузкой. Во многих случаях к катушкам связи требования в отношении точности, стабильности и добротности менее

жесткие, чем к контурным катушкам, что позволяет упростить технологию изготовления их и уменьшить габаритные размеры.

Высокочастотные дроссели применяются как элементы фильтрации высокочастотных составляющих тока в цепях питания и в корректирующих устройствах для формирования необходимых частотных характеристик различных радиоэлектронных устройств. Основным требованием к высокочастотным дросселям является обеспечение требуемой индуктивности в заданном диапазоне частот. Как правило, оговаривается лишь нижний предел индуктивности, а к стабильности и добротности особых требований не предъявляется. Дроссели высокой частоты должны обладать достаточно большим индуктивным сопротивлением ($x_L = \omega \cdot L$). Для получения большой индуктивности дроссели выполняются многослойными, а для уменьшения габаритных размеров используются сердечники из высокочастотных магнитных материалов (ферриты, магнитодиэлектрики). Для повышения частотного диапазона принимаются специальные конструктивные меры, позволяющие снизить собственную (паразитную) ёмкость. В частности, уменьшается диаметр и длина намотки, катушка разделяется на секции, применяются специальные типы намоток (универсальная, пирамидальная, внавал), выбираются изоляционные материалы с малой диэлектрической проницаемостью и т.д.

Большое разнообразие конструктивных исполнений ВКИ объясняется весьма широкой областью применения их и, соответственно, широким диапазоном требований, а также простотой конструкции и технологии изготовления. Эти особенности ВКИ и предопределили их роль и место в элементной базе РЭА. При проектировании и реализации фильтров, линий задержки и других LC – цепей конденсатор выбирается типовой, а для обеспечения требуемой индуктивности и добротности проектируется и изготавливается нетиповая катушка. В промышленности типовые ВКИ практически не выпускаются, отсутствуют, соответственно, и справочные данные по ним. Поэтому радиоконструкторы должны:

- знать зависимость основных параметров ВКИ (индуктивности, добротности, стабильности, собственной емкости) от геометрических параметров, свойств материалов и конструкции катушки;
- уметь проектировать нетиповые катушки индуктивности;
- уметь измерять параметры ВКИ и оценивать их качество.

Приобретение и закрепление указанных выше знаний и умений и ставиться в основную задачу данной лабораторной работы.

2 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Физическая сущность индуктивности

Согласно определению (ГОСТ 20718-75) *индуктивность L – скалярная величина, равная отношению потокосцепления самоиндукции катушки Ψ к*

току I , протекающему через неё,

$$\psi = L \cdot I \quad (2.1)$$

Это выражение справедливо для установившегося режима в цепи переменного тока.

В общем случае индуктивность является коэффициентом пропорциональности между изменяющимся током и потокосцеплением

$$\psi = L \cdot i \quad (2.2)$$

где ψ и i – мгновенные значения потокосцепления катушки и тока, протекающего через неё.

Если через отрезок проводника пропустить электрический ток I , то вокруг него образуется магнитное поле, магнитные силовые линии которого будут образовывать концентрические окружности вокруг проводника, а направление магнитного потока Φ будет определяться по правилу буравчика. Магнитная энергия этого проводника будет равна

$$W_M = \Phi \cdot I / 2. \quad (2.3)$$

Если этот проводник свернуть в спираль, то общий магнитный поток будет равен сумме магнитных потоков каждого витка, т. е. потокосцеплению самоиндукции

$$\Psi = \Phi \cdot N, \quad (2.4)$$

где N – число витков катушки.

Энергия магнитного поля катушки будет равна

$$W_M = \Psi \cdot I / 2. \quad (2.5)$$

С учетом (2.1) выражение (2.5) принимает вид

$$W_M = L \cdot I^2 / 2. \quad (2.6)$$

Следовательно, индуктивность является количественной характеристикой магнитной энергии катушки с током.

Если через проводник или катушку пропустить переменный ток, например, синусоидальный, то в них возникает э.д.с. самоиндукции e , вектор которого направлен против напряжения, вызвавшего электрический ток, а величина равна скорости изменения потокосцепления

$$e = - d\psi / dt. \quad (2.7)$$

С учетом (2.2)

$$e = - L \cdot di / dt. \quad (2.8)$$

Если взять производную от синусоидального тока

$$I = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.9)$$

и провести несложные преобразования, то получим

$$e = - j\omega L \cdot i = jx_L \cdot i, \quad (2.10)$$

где j – символ мнимого числа;

ω – круговая частота переменного тока;

I_m и φ – амплитуда и фаза тока в катушке;

x_L – индуктивное сопротивление катушки.

Следовательно, для переменного тока катушка (или проводник) будет создавать кроме *активного* ещё дополнительное сопротивление, связанное с образованием магнитного поля. Это сопротивление не связано с поглощением энергии и получило название *реактивного*. При переменном токе катушка в положительный полупериод запасает магнитную энергию, а в отрицательный возвращает её обратно источнику.

2.2 Индуктивность ВКИ

Индуктивность является основным параметром ВКИ. Её величина определяется конструкцией и геометрическими параметрами катушки, а также свойствами основных материалов. Для установления этой взаимосвязи воспользуемся выражениями (2.2) и (2.4), а магнитный поток Φ выразим из схемы замещения магнитной цепи как отношение ампервитков (магнитодвижущей силы) к магнитному сопротивлению R_M

$$\Phi = i \cdot N / R_M. \quad (2.11)$$

Совместное решение уравнений (2.2), (2.4) и (2.11) позволяет получить выражение для индуктивности, справедливое для любых типов катушек

$$L = N^2 / R_M. \quad (2.12)$$

Здесь магнитное сопротивление R_M магнитной цепи катушки находится в сложной зависимости от геометрических параметров её и, как правило, не поддается строгому математическому описанию. Так, для цилиндрической многослойной катушки без сердечника

$$R_M = \frac{l_C}{\mu_0 \cdot Q_C} = \frac{4 \cdot l_C}{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_0^2} = \frac{K_l \cdot l}{\mu_0 \cdot D_0^2}, \quad (2.13)$$

где l_C – длина средней силовой линии магнитного поля катушки;

$Q_C = \pi D_0^2 / 4$ – площадь сечения среднего витка;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума (воздуха);

D_0 – диаметр среднего витка катушки;

l – длина намотки катушки;

K_l – коэффициент пропорциональности между длиной средней силовой линии и длиной намотки.

Подставив (2.13) в (2.12), получим

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot D_0^2}{K_l \cdot l}. \quad (2.14)$$

Таким образом, для цилиндрической ВКИ *индуктивность пропорциональна квадрату числа витков, квадрату диаметра намотки и обратно пропорциональна длине намотки.*

Коэффициент пропорциональности K_l находится в сложной зависимости от конструкции и геометрических параметров катушки. Поэтому в инженерной практике обычно используются приближенные эмпирические зависимости. Так для цилиндрических катушек индуктивность определяется по формуле

$$L = L_0 \cdot N^2 \cdot D_0, \quad (2.15)$$

где $L_0 = f(l/D; h/D)$ – вспомогательный коэффициент, зависящий от соотношения длины l и глубины h катушки к среднему диаметру катушки D_0 .

Для ВКИ с ферромагнитным сердечником индуктивность катушки увеличивается на величину *действующей магнитной проницаемости сердечника* μ_c

$$L_{KC} = L \cdot \mu_c. \quad (2.16)$$

μ_c зависит от начальной магнитной проницаемости материала μ_H и конструкции сердечника, частоты тока, соотношений диаметра катушки к диаметру сердечника, длины катушки и длины сердечника. Эффективность использования магнитных свойств материала сердечника оценивается коэффициентом

$$k_\mu = \mu_c / \mu_H. \quad (2.17)$$

Расчетные соотношения индуктивности для различных конструкций ВКИ приводятся в справочной литературе [1-4].

2.3 Добротность ВКИ

Согласно определению *добротность ВКИ равна отношению реактивного сопротивления x_L к активному r_L*

$$Q = \omega L / r_L. \quad (2.18)$$

Активное сопротивление катушки в общем случае складывается из сопротивления провода току высокой частоты r_f , сопротивления, вносимого потерями в диэлектрике Δr_δ , в сердечнике Δr_c , в экране Δr_ε и т. д.

$$R_L = r_f + \Delta r_\delta + \Delta r_c + \Delta r_\varepsilon. \quad (2.19)$$

В области относительно низких частот преобладают потери в проводе. Причем сопротивление провода высокой частоты существенно выше сопротивления постоянному току за счет эффектов вытеснения тока

$$r_f = r_0 \cdot \left[F(z) + \left(\frac{K \cdot N \cdot d}{2D} \right)^2 \cdot G(z) \right], \quad (2.20)$$

где r_0 – сопротивление провода постоянному току;

$F(z)$, $G(z)$ – коэффициенты, учитывающие поверхностный эффект и эффект близости;

z – вспомогательный параметр, пропорциональный диаметру провода d и частоте;

K – коэффициент, учитывающий влияние параметров катушки на эффект близости;

d – диаметр провода без изоляции;

D – диаметр однослойной катушки или наружный диаметр многослойной катушки.

Исследования показывают, что с увеличением диаметра провода влияние поверхностного эффекта ослабляется, а эффекта близости

усиливается, в связи с чем существует такой *оптимальный диаметр провода*, при котором *сопротивление оказывается минимальным, а добротность максимальна*.

В области высоких частот существенные потери вносят диэлектрик, экран и особенно ферромагнитный сердечник.

2.4 Собственная ёмкость ВКИ

Собственная ёмкость катушки индуктивности обусловлена наличием разности потенциалов электрического поля между витками и слоями обмотки, между обмоткой и металлическими элементами конструкции катушки (экранами, шасси), между обмоткой и ферромагнитным сердечником и т.д. Её величина зависит от размеров катушки, конструкции обмотки, расстояния между витками со значительной разностью потенциалов, удаленности обмотки от экрана и сердечника и других факторов.

Собственная ёмкость катушки носит распределенный характер и достаточно точный аналитический расчет её величины весьма сложен. В инженерной практике её рассчитывают по упрощенным эмпирическим зависимостям. Так для однослойной неэкранированной катушки с удовлетворительной точностью её можно рассчитать по формуле

$$C_0 \approx \frac{\pi \cdot D}{8.31 \cdot \lg(a + \sqrt{a^2 - 1})} , \quad (2.21)$$

где D – диаметр намотки катушки;

$a = \tau/d$ - отношение шага намотки к диаметру провода без изоляции.

К существенному снижению собственной ёмкости приводит секционирование катушек. Ёмкость секционированной катушки может быть определена по приближенной формуле

$$C_0 \approx C_{0c} \cdot (0,33 n + 0,67) / n. \quad (2.22)$$

где C_{0c} - собственная ёмкость секции;

n - число секций.

Из-за наличия собственной емкости в катушке при высоких частотах проявляются дисперсионные свойства – зависимость эффективной индуктивности от частоты

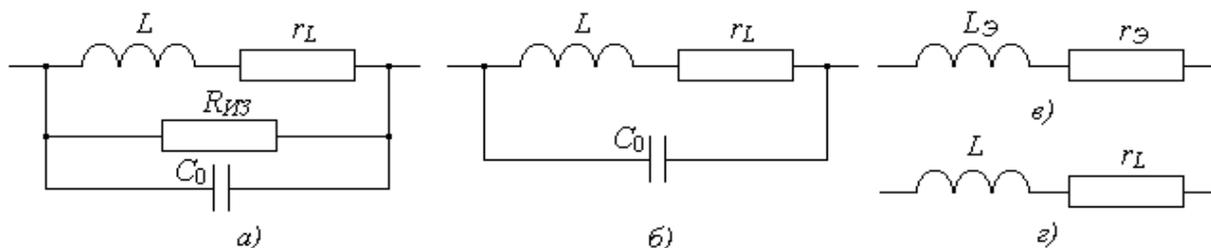
$$L_{\text{эф}} = \frac{L}{1 - \omega^2 LC_0} . \quad (2-23)$$

Это свойство снижает стабильность индуктивности катушки и существенно ограничивает применение ВКИ в области высоких частот.

2.5 Схема замещения катушки индуктивности

Схема замещения должна достаточно точно отображать электромагнитные процессы в катушке и её свойства. Полная схема

замещения, учитывающая все частичные элементы, представляет схему с распределёнными параметрами. Она сложна и неудобна для анализа. В инженерной практике обычно используется упрощённые схемы (рисунок 2.1), в которых распределённые параметры представлены в виде сосредоточенных.



а – полная схема; б – схема без учета потерь в изоляции; в – эквивалентная схема в области высоких частот; г – эквивалентная схема в области низких частот. L – индуктивность; r_L – сопротивление потерь; C_0 – собственная емкость; $R_{из}$ – сопротивление изоляции; $L_э$ и $r_э$ – эквивалентные индуктивность и сопротивление потерь

Рисунок 2.1 – Эквивалентные схемы замещения ВКИ

2.6 Влияние экранов на параметры ВКИ

Экранирование ВКИ осуществляется для обеспечения электромагнитной совместимости катушки с другими электроэлементами радиоэлектронной аппаратуры. Экран локализует собственное магнитное поле катушки и существенно ослабляет влияние внешних магнитных полей на катушку. Экранирующее действие характеризуется отношением напряжённости магнитного поля при наличии экрана к напряжённости поля при его отсутствии.

Применение экранов снижает индуктивность и добротность катушки. Индуктивность снижается вследствие того, что под действием внешнего поля катушки в экране возникает ток, который в свою очередь создаёт магнитный поток, направленный встречно основному потоку. То есть, происходит ослабление магнитного потока катушки. Величина снижения индуктивности зависит от коэффициента связи катушки с экраном K_{CB}

$$\alpha_{\text{э}} = K_{CB}^2 \cdot L \quad (2.24)$$

В свою очередь коэффициент связи зависит от соотношений геометрических параметров катушки и экрана

$$K_{CB}^2 = \eta (D/D_{\text{э}})^3, \quad (2.25)$$

где η – коэффициент, определяемый отношением длины и диаметра намотки катушки l/D ; $D_{\text{э}}$ – внутренний диаметр экрана.

На добротность экран влияет двояко. Во-первых, за счёт возникновения тока в экране будут иметь место *активные потери* в нем. Вносимое сопротивление, эквивалентное потерям в экране, определяется выражением

$$\Delta r'_3 = 2\pi \cdot K_{CB}^2 \cdot N^2 \cdot \frac{D}{D_3} \cdot \frac{D_3}{l_3} \cdot \sqrt{\rho \cdot f} \quad , \quad (2.26)$$

где ρ – удельное сопротивление материала экрана, Ом·м; f - частота, МГц; l_3 – длина экрана.

Во-вторых, из-за уменьшения напряжённости магнитного поля экранированной катушки *ослабляется поверхностный эффект*, что приводит к уменьшению сопротивления провода катушки току высокой частоты на величину

$$\Delta r''_3 = r_0 \cdot (2K_{CB}^2 - K_{CB}^4) \cdot \left(\frac{K \cdot N \cdot d}{2D} \right)^2 \cdot G(z) \quad , \quad (2.27)$$

Общее эквивалентное сопротивление, вносимое экраном, будет составлять

$$\Delta r_3 = \Delta r'_3 + \Delta r''_3 \quad . \quad (2.28)$$

Для ослабления влияния экрана на катушку увеличивают отношение D_3/D , а экран изготавливают из материалов с малым удельным сопротивлением и шлифуют или покрывают внутреннюю часть благородным металлом (серебро, золото).

3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает: лабораторный макет, состоящий из набора различных конструкций контурных катушек индуктивности и дросселей высокой частоты, технические характеристики которых приведены в таблице 4.1; набор экранов; измерительный прибор Е9-4.

4 ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

4.1 Программа исследований

4.1.1 Ознакомиться с правилами пользования прибором Е9-4 (приложение А).

4.1.2 Ознакомиться с физическими основами функционирования и методикой расчета высокочастотных катушек индуктивности (см. раздел 2 и приложение Б), а также [1 или 2, раздел 4].

4.1.3 Изучить и описать особенности конструкций ВКИ, представленных на макете. Заготовить таблицу для внесения данных (см. таблицу 4.1).

4.1.4 Получить у преподавателя допуск на проведение экспериментальных исследований и задание по аналитическому расчету параметров конкретной ВКИ.

4.1.5 Подготовить прибор к работе (см. приложение А).

4.1.6 Измерить индуктивность L и добротность Q указанных преподавателем ВКИ.

4.1.7 Измерить собственную ёмкость C_0 указанных преподавателем ВКИ.

4.1.8 Полученные экспериментальные данные внести в заготовленную таблицу.

Таблица 4.1 – Технические характеристики и результаты исследований высокочастотных катушек индуктивности

Номер ВКИ	Технические характеристики катушек							Результаты исследований				
	D_0 , мм	l , мм	N	d , мм	τ , мм	l/D	Материал экр. – $D_э$	f , МГц	L , мкГн	Q	C_0 , пФ	
9	30	30	37	0,67	0,83	1,0	–	2,4				
1	30	54	37	0,67	1,50	1,8	–	2,4				
1 _{э1}	30	54	37	0,67	1,50	1,8	Ст.–75	2,4				
1 _{э2}	30	54	37	0,67	1,50	1,8	Бр.–75	2,4				
1 _{э3}	30	54	37	0,67	1,50	1,8	Al–75	2,4				
1 _{э4}	30	54	37	0,67	1,50	1,8	Al–55	2,4				
1 _{э5}	30	54	37	0,67	1,50	1,8	Al–35	7,6				
6	23	12	12	0,67	1,10	0,53	–	7,6				
8	16	13	13	0,67	0,93	0,81	–	7,6				
5	12	9,5	16	0,62	0,64	0,79	–	7,6				
7 без серд.	Многослойная, секционированная ($n=3$), намотка “кучей”								0,24			
7 с сердеч.	Сердечник СБ-34 из карбонильного железа ($\mu_n \approx 20$)								0,24			

4.1.9 Проанализировать влияние шага намотки τ (или соотношения l/D) катушки на индуктивность L , добротность Q и собственную ёмкость C_0 (сравнить параметры ВКИ-9 и ВКИ-1 без экрана).

4.1.10 Проанализировать влияние диаметра намотки D_0 катушки на индуктивность L , добротность Q и собственную ёмкость C_0 (сравнить параметры ВКИ-9, ВКИ-6 и ВКИ-8). Так как число витков у катушек различное, а индуктивность пропорциональна квадрату числа витков, то для сравнения катушек нужно взять удельную индуктивность $L_{уд} = L/N$. Построить графики зависимостей $L_{уд}(D_0)$, $Q(D_0)$ и $C_0(D_0)$ в одних осях координат.

4.1.11 Проанализировать влияние материала экрана на индуктивность L и добротность Q ВКИ (сравнить параметры ВКИ-1 с экранами 1-3). Построить зависимости L и Q от удельного сопротивления материала экрана ρ ($\rho_{ст} \approx 10 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\rho_{бр} \approx 5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\rho_{al} \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). Объяснить причину столь существенного влияния на добротность катушки стального экрана по сравнению с бронзовым и алюминиевым экранами.

4.1.12 Проанализировать влияние диаметра экрана $D_Э$ на индуктивность L , добротность Q и собственную емкость C_0 ВКИ (сравнить параметры ВКИ-1 без экрана и с экранами 3-5). Построить зависимости L , Q и C_0 от $D_Э$, полагая, что у ВКИ без экрана $D_Э \gg 75$ мм.

4.1.13 Проанализировать влияние ферромагнитного сердечника на индуктивность и добротность ВКИ-7. По экспериментальным данным рассчитать действующую магнитную проницаемость μ_C и добротность Q_C сердечника, учитывая, что

$$L_{KC} = \mu_C \cdot L_K, \quad Q_{KC} = \mu_C \cdot Q_K \cdot Q_C / (\mu_C Q_K + Q_C),$$

где L_{KC} и L_K – индуктивность катушки с сердечником и без него;

Q_{KC} и Q_K – добротность катушки с сердечником и без сердечника.

Определить коэффициент использования магнитных свойств материала сердечника по формуле

$$k_\mu = \mu_C / \mu_H,$$

где $\mu_H \approx 20$ – начальная проницаемость материала сердечника.

4.1.14 Для указанной преподавателем ВКИ по методике, приведенной в приложении Б, рассчитать индуктивность L , добротность Q и собственную ёмкость C_0 . Сравнить полученные результаты с экспериментальными данными и объяснить причины расхождения их.

4.1.15 Сделать подробные выводы по результатам исследований (по пунктам 4.1.9 ... 4.1.14).

4.2 Методические указания

4.2.1 При подготовке к выполнению работы необходимо изучить раздел “Высокочастотные катушки индуктивности”, воспользовавшись литературой [1 или 2, раздел 4] и конспектом лекций.

4.2.2 Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии установленным требованиям и должен содержать:

- 1) введение (цель работы);
- 2) описание лабораторной установки и конструктивных особенностей исследуемых катушек индуктивности;
- 3) программу исследований и результаты экспериментальных исследований в виде таблиц и графиков;
- 4) результаты теоретических расчётов;
- 5) заключение – анализ полученных результатов и выводы по работе.

4.2.3 Все зависимости от одного параметра построить в одних осях координат, отложив по оси абсцисс переменный параметр, а по оси ординат исследуемые параметры, построив для каждой из них свою ось (свой масштаб).

4.2.4 **Выводы по результатам исследований сделать для каждого пункта в отдельности, соответственно пронумеровав их, например, 5.1, 5.2**

*и т.д. В выводах необходимо **отразить физическую сущность** исследуемых процессов, т.е. аналитически или логически доказать закономерность полученных зависимостей.*

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 Из каких основных конструктивных элементов состоит ВКИ?

5.2 Типы намоток и влияние их на добротность, стабильность, индуктивность, собственную ёмкость, массогабаритные показатели?

5.3 Какова физическая сущность индуктивности катушки?

5.4 Какими геометрическими параметрами и свойствами материалов определяется индуктивность катушки?

5.5 Каковы пути повышения добротности и стабильности индуктивности ВКИ и их взаимосвязь?

5.6 От каких параметров катушки и от каких свойств материалов конструкции катушки в основном зависит ее собственная емкость.

5.7 Из каких ферромагнитных материалов изготавливаются сердечники для катушек индуктивности и каково влияние сердечников на основные параметры ВКИ?

5.8 Для чего экранируют ВКИ, каково влияние их на основные параметры катушки и каковы требования к качеству экранов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

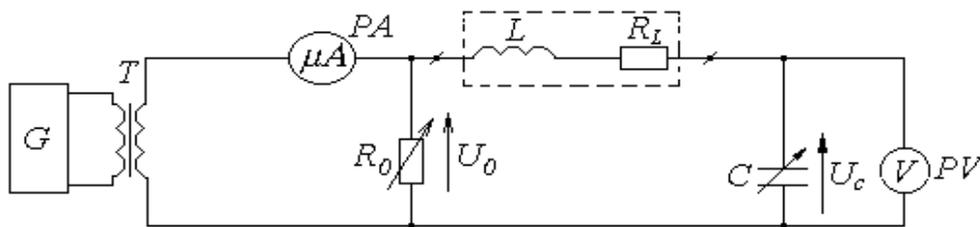
- 1 Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база РЭС. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие для студентов специальности 210201 – «Проектирование и технология РЭС». – Томск: ТУСУР, 2007. – 263 с.
- 2 Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база радиоэлектронных средств. Ч.1. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие для студентов специальности 210201. – Томск: ТУСУР, 2005. – 180 с.
- 3 Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
- 4 Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчёт индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
- 5 Немцев М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 192 с.
- 6 Сидоров И.Н., Биннатов М.Ф., Шведова Л.Г. Индуктивные элементы РЭА: Справочник. – М.: Радио и связь, 1992. – 288 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

КРАТКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИБОРА Е9-4

1 ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Прибор Е9-4 предназначен для измерения параметров катушек индуктивности: индуктивности, добротности и собственной ёмкости. Принцип работы его основан на использовании свойств последовательного колебательного контура. Упрощённая принципиальная схема прибора приведена на рисунке 1.



G – высокочастотный генератор синусоидальных сигналов; *T* – согласующий трансформатор; *PA* – микроамперметр контроля уровня сигнала; *PV* – ламповый вольтметр с высоким входным сопротивлением; *R*₀ – эталонное сопротивление; *L* и *R*_L – индуктивность и активное сопротивление исследуемой катушки индуктивности; *C* – образцовый конденсатор переменной емкости.

Рисунок А.1 - Упрощенная принципиальная схема прибора Е9-4

С помощью сопротивления *R*₀ устанавливается калиброванное напряжение *U*₀ на выводах колебательного контура *LC* (установка уровня). Изменением образцовой ёмкости *C* добиваются резонанса напряжений. При этом ток, проходящий по контуру, будет максимальным $I = U_0/R_0$, а напряжение на конденсаторе *U*_с – максимальное $U_c = I/\omega C$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сигнала генератора. Но при резонансе $U_L = U_c = I\omega L$. В свою очередь добротность катушки $Q = \omega L/R_L = U_c/U_0$. Откалибровав шкалу вольтметра в относительных единицах и удерживая неизменным напряжение *U*₀, по шкале вольтметра можно сразу же определить добротность измеряемой ВКИ.

При резонансе соблюдается условие $\omega L = 1/\omega C$. Отсюда следует $L = 1/\omega^2 C$. При калиброванной частоте ω шкала образцового конденсатора может быть отградуирована в единицах измерения индуктивности *L*. Тогда с лимба конденсатора можно сразу же считать величину индуктивности катушки.

Строго говоря, считанная величина индуктивности является эквивалентной, так как катушка обладает собственной (паразитной) ёмкостью

C_0 , которая при частотах, близких к резонансной $\omega \approx 1/\sqrt{LC_0}$, оказывает существенное влияние на величину индуктивности катушки

$$L_{\omega} = L / (1 - \omega^2 LC_0) .$$

2 ПОДГОТОВКА ПРИБОРА К РАБОТЕ

Включить прибор и дать прогреться не менее 15 минут.

Установить переключатель РОД РАБОТЫ в положение УСТ. НУЛЯ, выставить нули приборов (ламповых вольтметров).

Установить переключатель РОД РАБОТЫ в положение КАЛИБРОВКА, ручкой УСТ. УРОВНЯ установить стрелку прибора УРОВЕНЬ на красную риску и, последовательно устанавливая переключатель ДИАПАЗОН Q в положение “60”, “200” и “600”, соответствующими потенциометрами, выведенными под шлиц, подстроить Q -вольтметр на уровень 60, 200 и 600, соответственно.

Переключатель РОД РАБОТЫ установить в положение ИЗМЕРЕНИЕ.

3 ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ДОБРОТНОСТИ

Подключить измеряемую катушку к клеммам “ L_X ”, установить образцовый (нониусный) конденсатор в нулевое положение (нижняя шкала), а частоту задающего генератора установить в соответствии с предлагаемой величиной индуктивности, указанной в табличке (на лицевой панели). Плавно вращая лимб конденсатора, добиться максимального отклонения стрелки Q -вольтметра. Проверить положение стрелки на приборе УРОВЕНЬ – она должна быть на красной риске, считать и завизировать значения добротности и индуктивности. Шкала индуктивности – средняя, обратная.

Если используется некалиброванная частота, то считывается величина ёмкости C , а индуктивность определяется по формуле

$$L = 2,53 \cdot 10^{10} / f^2 C_0 ,$$

где f – частота генератора, Гц;

$$C_0 = 10^4 C / (10^4 + C) .$$

4 ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЁМКОСТИ КАТУШКИ

Собственная ёмкость катушки определяется косвенным способом, для чего проводятся два измерения (метод двух частот). Устанавливается образцовый конденсатор на величину 50 нФ и настраивается контур в резонанс генератором частоты. Фиксируется значение ёмкости C и частоты f_1 . Теперь устанавливается частота $f_2 = f_1/2$ и настраивается контур в резонанс лимбом конденсатора. Визируются значения f_2 и C_2 .

Собственная ёмкость катушки рассчитывается по формуле

$$C_0 = \frac{C_{2Э} - 4C_{1Э}}{3},$$

где $C_{2Э} = 10^4 \cdot C_2 / (10^4 + C_2)$, $C_{1Э} = 10^4 \cdot C_1 / (10^4 + C_1)$.

С учётом рекомендованного значения ёмкости $C_1 = 50$ пФ расчётное выражение упрощается

$$C_0 = (C_{2Э} - 199) / 3.$$

Все ёмкости в приведенных расчетных соотношениях в пикофарадах.

Для удобства измерения и расчета собственной ёмкости катушек рекомендуется построить таблицу

Таблица А.1 – Результаты измерения собственной ёмкости катушек

Номер ВКИ	$f_1, \text{МГц}$	$f_2, \text{МГц}$	$C_2, \text{пФ}$	$C_{2Э}, \text{пФ}$	$C_0, \text{пФ}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)

РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ
(Все физические величины представлены в системе СИ)

1 РАСЧЁТ ИНДУКТИВНОСТИ

Для однослойной цилиндрической катушки со сплошной намоткой индуктивность рассчитывается по формуле

$$L = L_0 \cdot N^2 \cdot D \cdot 10^{-7}, \quad (\text{Б.1})$$

где L_0 - расчётный коэффициент, зависящий от соотношения длины к диаметру намотки, определяется по таблице 1 или по рисунку 1 при $t/D = 0$;

N - число витков катушки; D - диаметр намотки (диаметр каркаса).

Таблица Б.1 - Значения коэффициентов L_0 для однослойных катушек

l/D	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
L_0	24,4	20,1	17,6	15,8	14,4	13,3	12,4	11,6
l/D	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
L_0	10,4	9,37	8,55	7,87	7,29	6,79	6,36	5,97
l/D	1,5	2	2,5	3,0	4,0	5,0	7,0	10
L_0	5,07	4,04	3,36	2,87	2,23	1,82	1,33	0,95

Для однослойной катушки с шаговой намоткой (рисунок 2) индуктивность приближённо может быть определена по формуле

$$L = L' - 2\pi N \cdot D \cdot (A + B) \cdot 10^{-7}, \quad (\text{Б.2})$$

где L' - индуктивность катушки, рассчитанная по формуле (1);

A и B - поправочные коэффициенты, учитывающие разницу в индуктивности и взаимной индуктивности действительной катушки (намотанной круглым проводом) и катушки из тонкой, узкой ленты со сплошной намоткой. Значения коэффициентов A и B представлены на рисунке 3.

Более точно индуктивность катушки с шаговой намоткой может быть рассчитана по формуле из [4]

$$L = L' - \Delta L_1 - \Delta L_2, \quad (\text{Б.3})$$

где ΔL_1 - поправка, учитывающая различия между собственными индуктивностями действительных и расчётных витков;

ΔL_2 - поправка, учитывающая различие между взаимными индуктивностями действительных и расчётных витков;

$$\Delta L_1 = \mu_0 \cdot N \cdot D \cdot [\ln(1 + \tau/d) - 0,555] / 2, \quad (\text{Б.4})$$

$$\Delta L_2 = \mu_0 D \left[(N-1) \ln \frac{0,2236(2\tau+d)^2}{\tau(\tau+d)} + (N-2) \ln \frac{0,2236(3\tau+d)^{4,5}(\tau+d)^{0,5}}{2\tau(2\tau+d)^4} \right] \quad (\text{Б.5})$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная проницаемость вакуума; τ - шаг намотки; d - диаметр провода без изоляции.

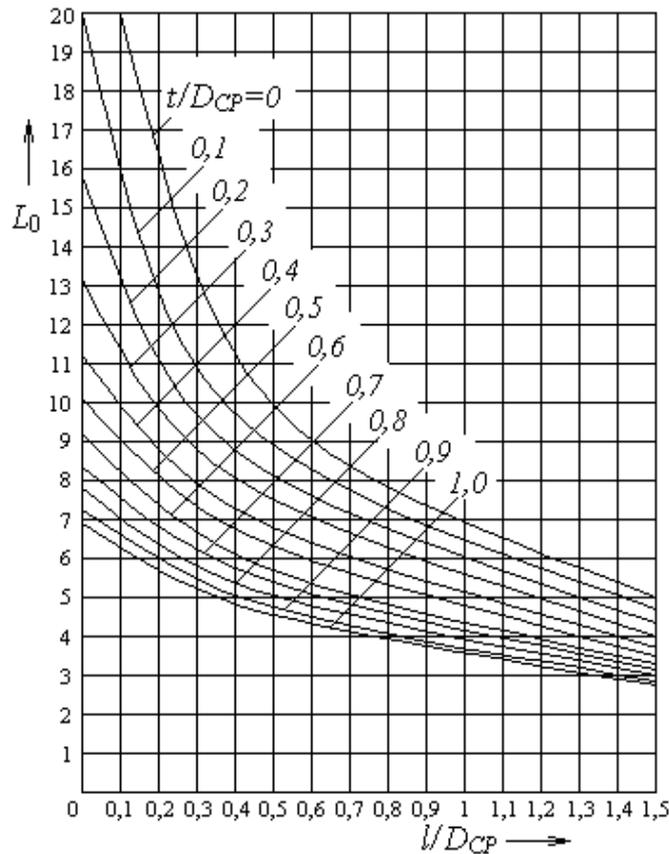


Рисунок Б.1 – Зависимость L_0 от соотношений l/D_{cp} и t/D_{cp} для многослойных цилиндрических катушек

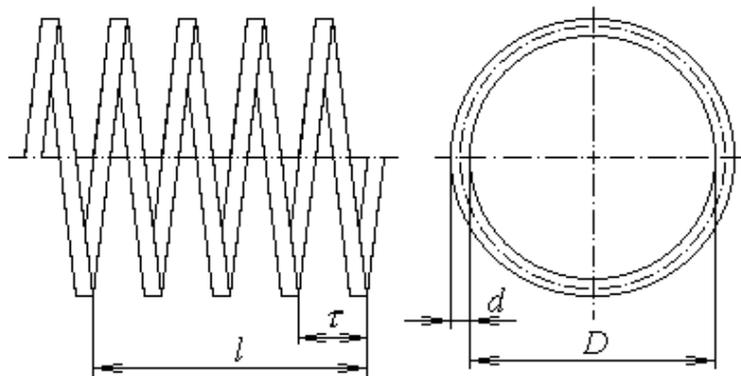


Рисунок Б.2 – Конструктивные размеры однослойной катушки

Для многослойной катушки (рисунок 4) с простой намоткой (рядовая, “внавал”) индуктивность определяется по формуле (1), а расчётный коэффициент L_0 находится по рисунку 1.

Для многослойной секционированной катушки с одинаковыми секциями индуктивность может быть рассчитана по формуле

$$L = L_C [n + 2K_{CB}(n-1)] \quad , \quad (\text{Б.6})$$

где L_C - индуктивность одной секции; n - число секций;

K_{CB} - коэффициент связи между смежными секциями, может быть найден из рисунка 5.

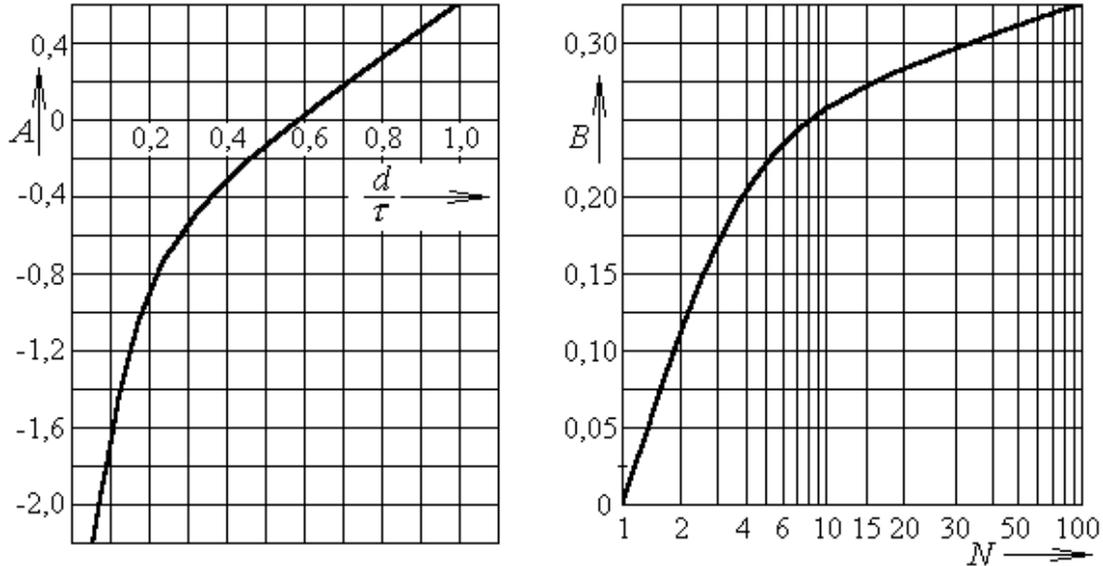


Рисунок Б.3 – Коэффициенты А и В для однослойной катушки с шаговой намоткой

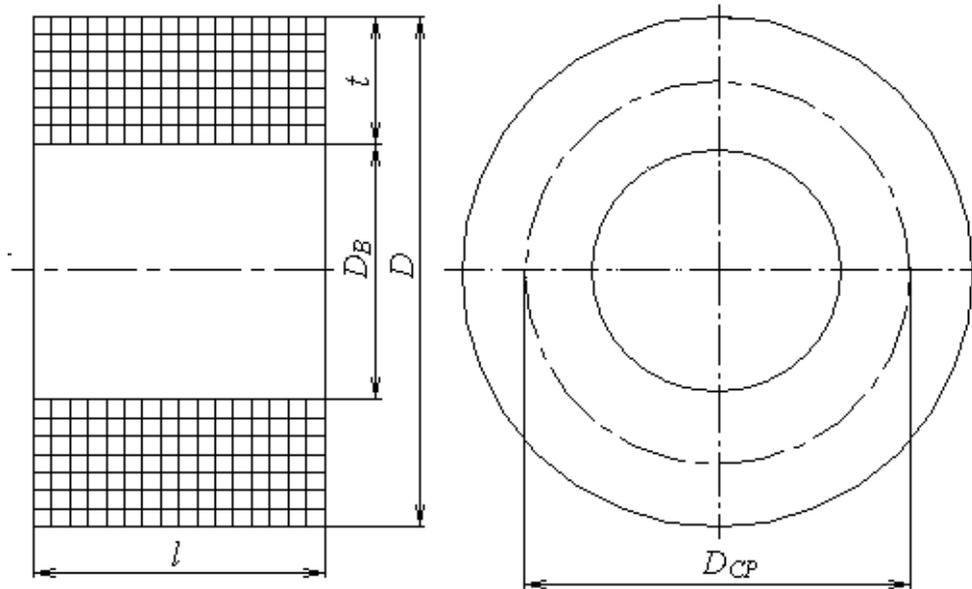


Рисунок Б.4 – Конструктивные размеры многослойной катушки

Индуктивность плоской печатной катушки со спиральными витками (рисунок 6,а) с погрешностью до 5 % может быть определена по формуле (7), а индуктивность плоской печатной катушки с квадратными витками (рисунок 6,б) по формуле (8)

$$L = 24,75 \cdot D_{CP} \cdot N^{5/3} \cdot \lg\left(\frac{4D_{CP}}{t}\right) \cdot 10^{-7} \quad , \quad (\text{Б.7})$$

$$L = 5,55 \cdot A_{CP} \cdot N^{5/3} \cdot \lg\left(\frac{8A_{CP}}{t}\right) \cdot 10^{-7} \quad , \quad (\text{Б.8})$$

где

$$D_{CP} = \frac{D_H + D_{BH}}{2}, \quad A_{CP} = \frac{A_H + A_{BH}}{2} \quad .$$

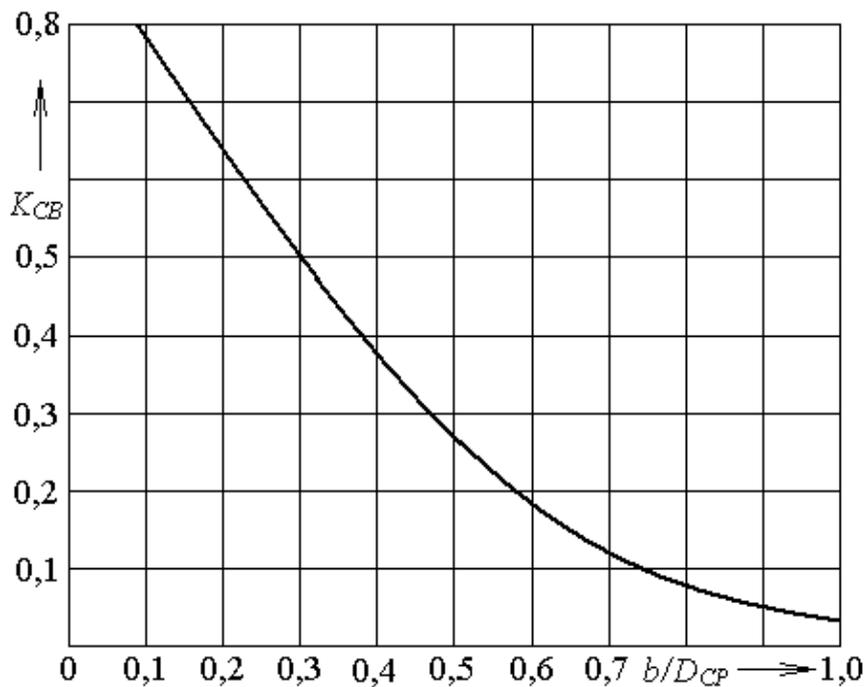


Рисунок Б.5 – Зависимость коэффициента связи от соотношения b/D_{CP} для многослойных секционированных катушек

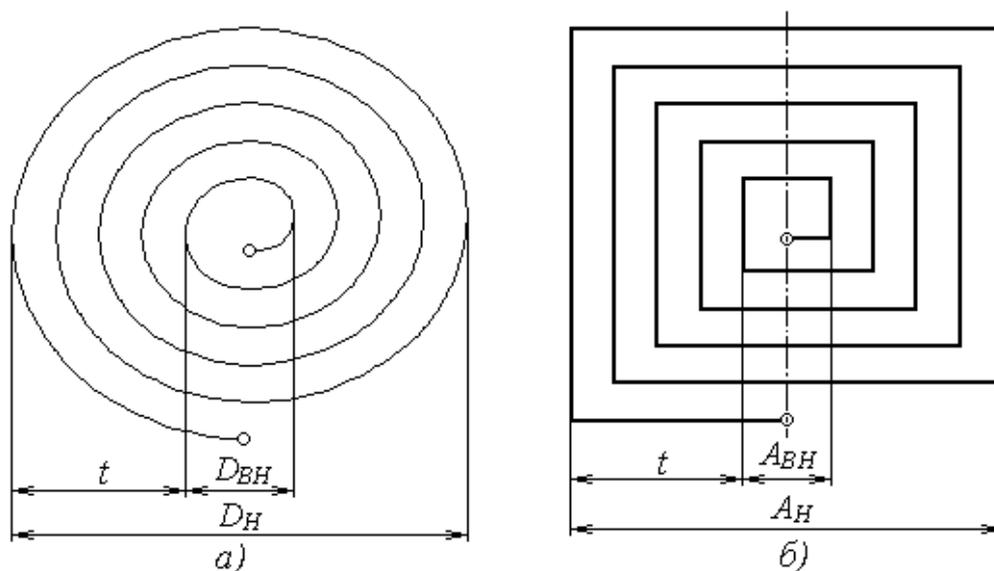


Рисунок Б.6 – Конструкции плоских печатных катушек

Индуктивность цилиндрической катушки с экраном равна

$$L_{КЭ} = L_K(1 - K_{CB}^2), \quad (\text{Б.9})$$

где L_K - индуктивность катушки без экрана; K_{CB} - коэффициент связи катушки с экраном.

Для однослойных и тонких многослойных катушек коэффициент связи может быть определён по эмпирической формуле

$$K_{CB}^2 \approx \eta \cdot (D/D_{Э})^3, \quad (\text{Б.10})$$

где η - коэффициент, зависящий от конструктивных размеров катушки, определяется по рисунку 7; $D/D_{Э}$ - отношение внешнего диаметра катушки к внутреннему диаметру экрана.

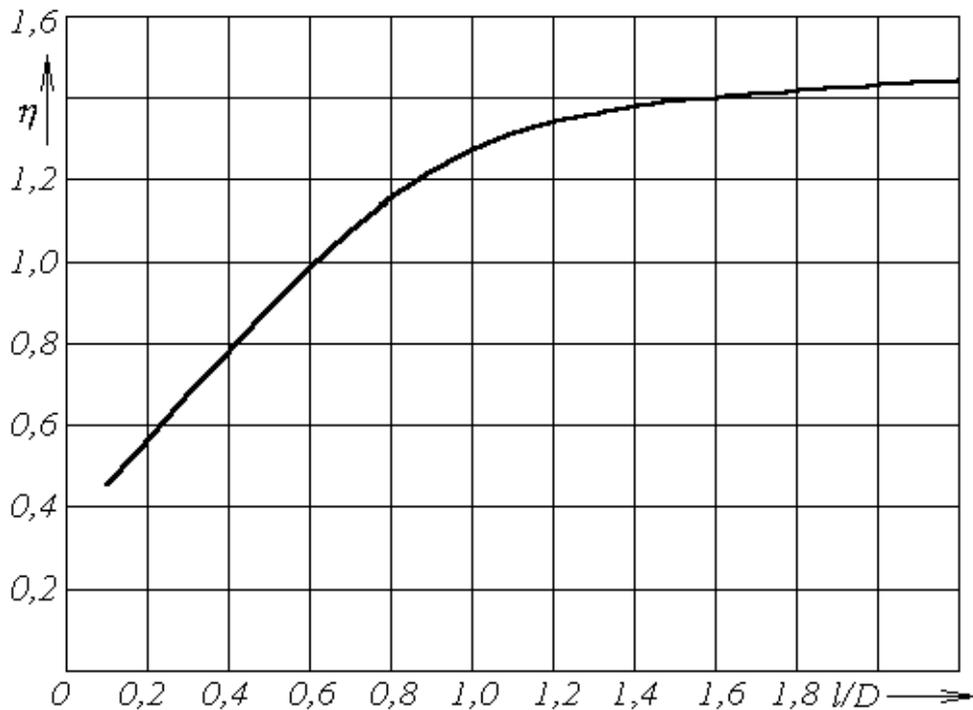


Рисунок Б.7 – Зависимость коэффициента η от соотношения D/D

Для многослойных катушек со значительной глубиной намотки коэффициент связи равен

$$K_{CB} = \frac{(D'/D)^3}{L_0 \cdot L_{0Э} \cdot [1 + (l_Э/D_{Э})^2]}, \quad (\text{Б.11})$$

где L_0 и $L_{0Э}$ - соответствующие коэффициенты для катушки и экрана, определяемые по рисунку 1 и по таблице 1; $l_Э$ и $D_{Э}$ - длина и внутренний диаметр экрана; D' - приведённый диаметр катушки с экраном, равный

$$D' = \sqrt[3]{(D^3 + D_{Э}^3)/2}. \quad (\text{Б.12})$$

Индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником увеличивается в μ_C раз

$$L_{KC} = \mu_C \cdot L, \quad (\text{Б.13})$$

где μ_C - действующая магнитная проницаемость сердечника (справочная величина).

2 РАСЧЁТ ДОБРОТНОСТИ

Добротность ВКИ определяется соотношением

$$Q = \omega L / r_L, \quad (\text{Б.14})$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; r_L – сопротивление, эквивалентное полным активным потерям в катушке

$$R_L = r_f + \Delta r_D + \Delta r_C + \Delta r_{\text{Э}}. \quad (\text{Б.15})$$

Здесь Δr_D , Δr_C , $\Delta r_{\text{Э}}$ – эквивалентные сопротивления потерь, вносимые диэлектриком, экраном и сердечником, соответственно.

Для цилиндрических катушек на частотах до 10 МГц

$$r_f = r_0 \cdot \left[F(z) + \left(\frac{K \cdot N \cdot d}{2D} \right)^2 \cdot G(z) \right], \quad (\text{Б.16})$$

где r_0 – сопротивление провода постоянному току; $F(z)$ и $G(z)$ – коэффициенты, учитывающие влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на увеличение активного сопротивления, находится из таблицы 2; K – коэффициент, учитывающий влияние размеров катушки на эффект близости, определяется по графикам рисунка 8; d – диаметр провода без изоляции; D – диаметр однослойной катушки или наружный диаметр многослойной катушки; z – вспомогательный расчётный параметр

$$z = \frac{2\pi \cdot d \cdot \sqrt{f}}{c} \quad (\text{Б.17})$$

Таблица Б.2 – Значения коэффициентов $F(z)$ и $G(z)$

z	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$F(z)$	1	1,005	1,026	1,078	1,175	1,318	1,492	1,678
$G(z)$	0,001	0,015	0,069	0,0172	0,295	0,405	0,499	0,584
z	4,5	5	6	7	8	9	10	11
$F(z)$	1,863	2,043	2,394	2,743	3,094	3,446	3,799	4,151
$G(z)$	0,669	0,755	0,932	1,109	1,287	1,464	1,641	1,818
z	12	13	14	15	16	17	18	19
$F(z)$	4,504	4,856	5,209	5,562	5,915	6,268	6,621	6,974
$G(z)$	1,995	2,171	2,384	2,525	2,702	2,879	3,056	3,232
z	20	21	22	23	24	25	30	40
$F(z)$	7,328	7,681	8,034	8,388	8,741	9,094	10,86	14,4
$G(z)$	3,409	3,586	3,763	3,936	4,117	4,317	5,177	6,946
z	50	60	70	80	90	100	$z > 100$	
$F(z)$	17,93	21,46	25,0	28,54	32,07	35,61	$0,354 \cdot z + 0,25$	
$G(z)$	8,173	10,48	12,25	14,02	15,78	17,75	$0,177 \cdot z - 0,125$	

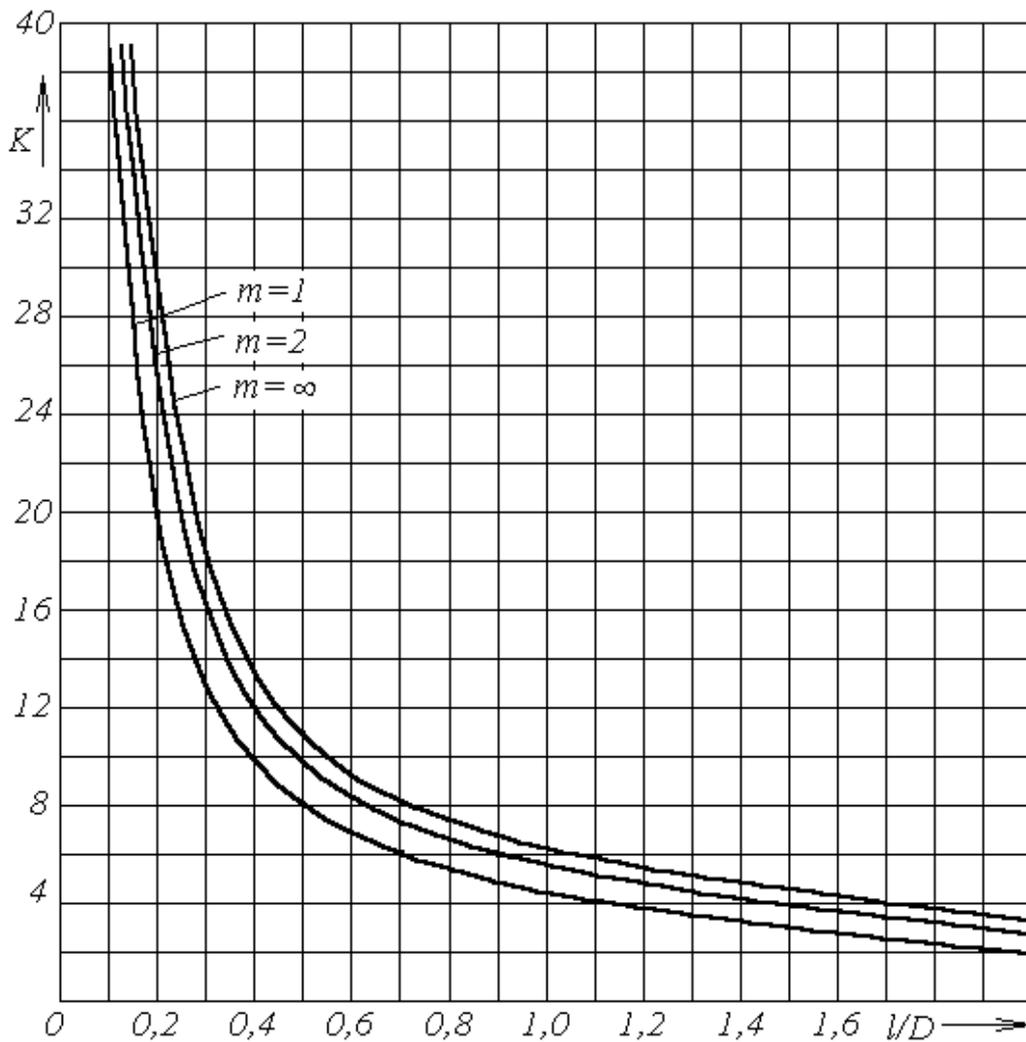


Рисунок Б.8 – Зависимости коэффициента K от соотношения l/D для однослойных и тонких многослойных катушек с числом слоёв m

Для катушек КВ и УКВ с шаговой намоткой в диапазоне частот свыше 10 МГц сопротивление провода току высокой частоты можно определить по приближительной формуле

$$r_f = 0,525 \cdot N \cdot D \cdot \sqrt{f} \cdot 10^{-6} / d \quad (Б.18)$$

Сопротивление круглого провода постоянному току для цилиндрических катушек равно

$$r_0 = 4 \cdot \rho \cdot N \cdot D_{CP} / d^2 \quad (Б.19)$$

где D_{CP} – средний диаметр обмотки катушки.

Удельное сопротивление медного провода $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, тогда

$$r_0 = 7 \cdot N \cdot D_{CP} \cdot 10^{-8} / d^2 \quad (Б.20)$$

Оптимальный диаметр провода, соответствующий минимуму сопротивления r , может быть рассчитан по следующей простой методике:

- 1) определяется вспомогательный параметр

$$z = 10,6 \sqrt{f} ; \quad (\text{Б.21})$$

2) рассчитывается вспомогательный коэффициент

$$\psi = \left(\frac{K \cdot N}{2 \cdot z' \cdot D} \right)^2 ; \quad (\text{Б.22})$$

3) по графику (рисунок 9) находится оптимальная величина параметра $z_{\text{опт}}$;

4) определяется оптимальный диаметр провода

$$d_{\text{опт}} = z_{\text{опт}} / z' . \quad (\text{Б.23})$$

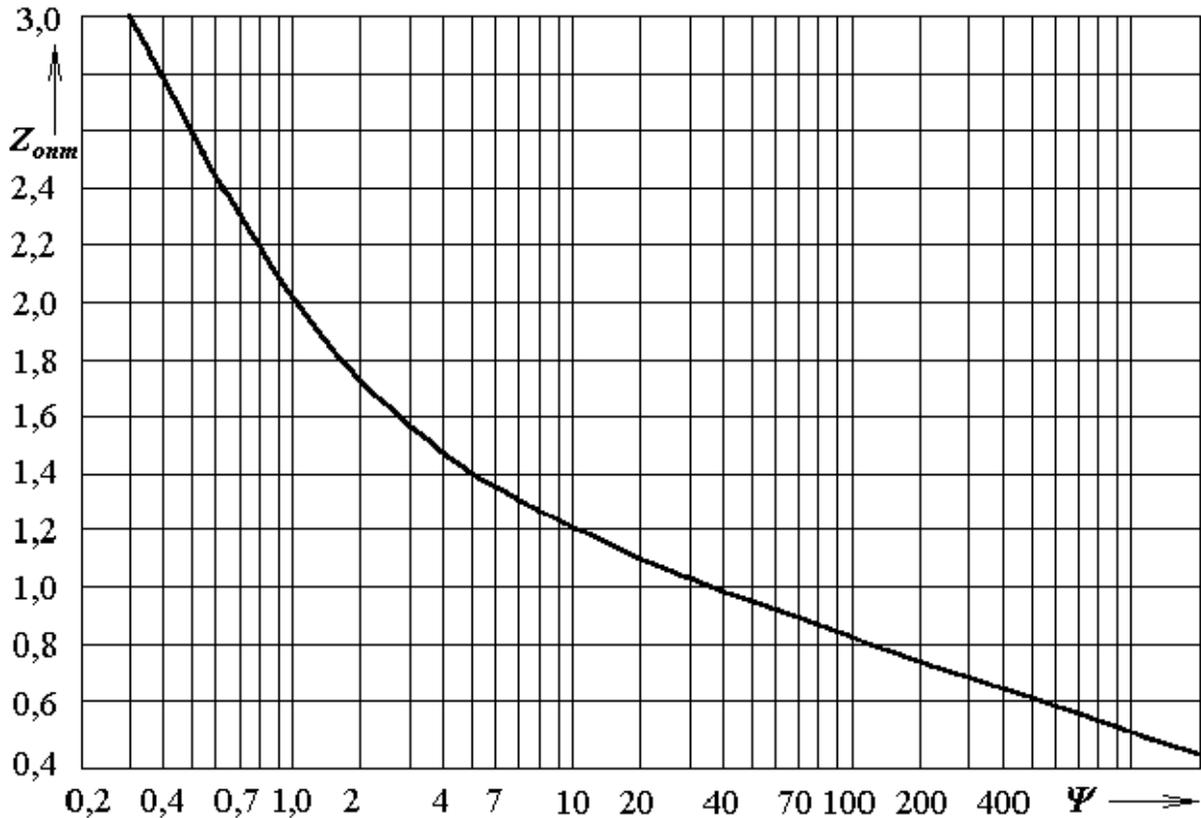


Рисунок Б.9 – Зависимость $z_{\text{опт}}$ от коэффициента ψ

Сопротивление, вносимое потерями в диэлектрике, может быть ориентировочно рассчитано по формуле

$$\Delta r_{\text{д}} = 0,25 \cdot C_{0\text{д}} \cdot \text{tg} \delta \cdot L^2 \cdot f^3 \cdot 10^3 , \quad (\text{Б.24})$$

где $C_{0\text{д}}$ – собственная ёмкость катушки через диэлектрик, приближённо равна полной величине собственной ёмкости; $\text{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в диэлектрике, справочная величина (3, таблица П-1).

Сопротивление, вносимое экраном, определяется сопротивлением потерь в экране $\Delta r'_{\text{э}}$ и ослаблением влияния эффекта близости на сопротивление обмотки $\Delta r''_{\text{э}}$

$$\Delta r_{\text{э}} = \Delta r'_{\text{э}} - \Delta r''_{\text{э}} , \quad (\text{Б.25})$$

где

$$\Delta r'_{\text{э}} = K_{\text{св}}^2 \cdot N^2 \cdot r_{\text{э}} \cdot (D / D_{\text{э}}) ; \quad (\text{Б.26})$$

$$\Delta r_{\text{э}}^{\text{с}} = r_0 \cdot (2 - K_{\text{св}}^2) \cdot K_{\text{св}}^2 \cdot \left(\frac{K \cdot N \cdot d}{2 \cdot D} \right)^2 \cdot G(z) . \quad (\text{Б.27})$$

Здесь $r_{\text{э}}$ – сопротивление внутренней поверхности экрана; $D_{\text{э}}$ – внутренний диаметр экрана.

$$r_{\text{э}} \approx \pi \cdot \rho_{\text{э}} \cdot D_{\text{э}} / (l_{\text{э}} \cdot x_{\text{э}}), \quad (\text{Б.28})$$

где $\rho_{\text{э}}$ – удельное сопротивление материала экрана или материала покрытия внутренней части экрана; $l_{\text{э}}$ – длина (высота) экрана; $x_{\text{э}}$ – глубина проникновения вихревых токов в экране

$$x_{\text{э}} \approx 0,5 \cdot \sqrt{\rho_{\text{э}} / f} . \quad (\text{Б.29})$$

С учетом (28) и (29) вносимое сопротивление экрана будет равно

$$\Delta r_{\text{э}}^{\text{с}} = 2 \cdot \pi \cdot K_{\text{св}}^2 \cdot N^2 \frac{D}{l_{\text{э}}} \cdot \sqrt{\rho_{\text{э}} \cdot f} \cdot 10^{-3} . \quad (\text{Б.30})$$

Сопротивление потерь, вносимое ферромагнитным сердечником, обусловлено активными потерями на гистерезис, вихревые токи и последствие и может быть определено через общий угол потерь в сердечнике $\delta_{\text{с}}$

$$\Delta r_{\text{с}} = 2\pi f \cdot L_{\text{кс}} \cdot \text{tg} \delta_{\text{с}} , \quad (\text{Б.31})$$

где $L_{\text{кс}}$ – индуктивность катушки с сердечником.

3 РАСЧЁТ СОБСТВЕННОЙ ЁМКОСТИ

Собственную ёмкость однослойной катушки, с удовлетворительной точностью можно рассчитать по формуле

$$C_0 \approx \frac{\pi \cdot D \cdot 10^{-10}}{8,31 \cdot \lg(a + \sqrt{a^2 - 1})} , \quad (\text{Б.32})$$

где $a = \tau / d$ - отношение шага намотки к диаметру провода без изоляции.

Ёмкость однослойной катушки, намотанной на гладкий каркас, диэлектрическая проницаемость которого лежит в пределах $\varepsilon = 4 \dots 6$, может быть рассчитана приближенно по формуле

$$C_0 \approx K_1 \cdot K_2 \cdot D \cdot 10^{-10}, \quad (\text{Б.33})$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты, зависящие от шага намотки τ и соотношения l/D , определяются по графикам из рисунка 10.

Если материал каркаса отличается от указанной выше величины, то собственную ёмкость следует пропорционально увеличить или уменьшить.

Для катушек с нарезным каркасом ёмкость увеличивается на 20-25 % в зависимости от глубины нарезки, а у катушек с ребристым каркасом C_0 меньше на 15-20 %. Пропитка и обволакивание катушек приводят к увеличению ёмкости на 20-30 %.

Собственная ёмкость многослойных катушек с простой намоткой

$$C_0 \approx \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot (8,45 \cdot \varepsilon + 8,23) \cdot 10^{-12}, \quad (\text{Б.34})$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр намотки; ε – диэлектрическая проницаемость изоляции провода.

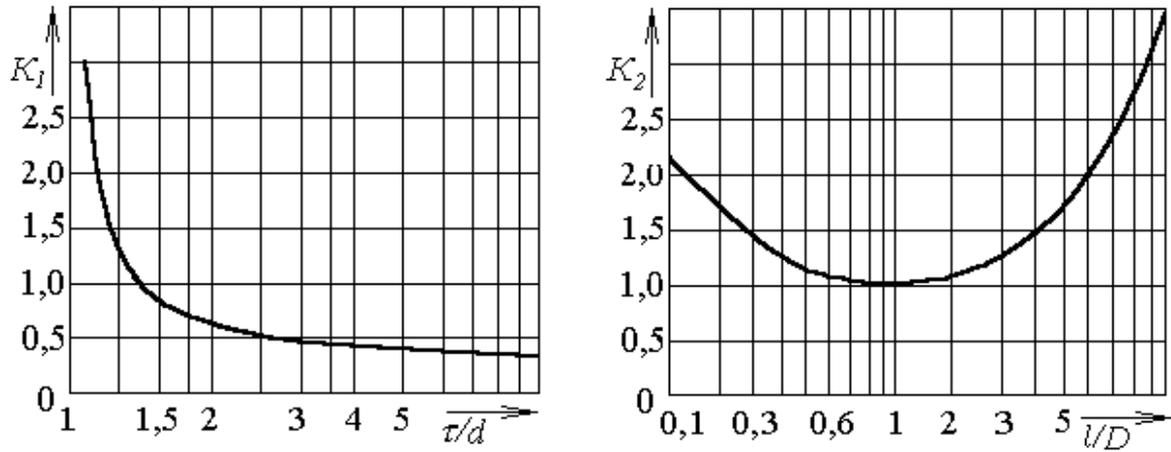


Рисунок Б.10 – Коэффициенты K_1 и K_2 для расчета собственной емкости однослойных катушек

Для секционированных катушек

$$C_0 \approx C_{0c} \cdot (0,33 \cdot n + 0,67) / n, \quad (\text{Б.35})$$

где C_{0c} – ёмкость секции; n – число секций.