

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Т.В. Шиленок, А.Е. Здрок

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Методические указания к лабораторному занятию
по дисциплинам «Материаловедение и технология
материалов», «Материалы и компоненты электронных
средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты»

Томск
2022

УДК 538.956
ББК 22.379

Рецензент

Еханин С.Г., доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

Здрок Анна Ефимовна, Шиленок Татьяна Владимировна,

Исследование высокочастотных катушек индуктивности: методические указания к лабораторному занятию по дисциплинам «Материаловедение и технология материалов», «Материалы и компоненты электронных средств», «Радиоматериалы и радиокомпоненты» / Т.В. Шиленок, А.Е. Здрок. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 32 с.

В методических указаниях кратко изложены принципы расчета и измерений параметров катушек индуктивности. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.956
ББК 22.379

© Здрок А.Е., 2022
© Шиленок Т.В., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2022

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 4 |
| 1 Основные теоретические положения | 6 |
| 1.1 Физическая сущность индуктивности | 6 |
| 1.2 Индуктивность ВКИ | 7 |
| 1.3 Добротность ВКИ | 9 |
| 1.4 Собственная ёмкость ВКИ | 10 |
| 1.5 Схема замещения катушки индуктивности | 10 |
| 1.6 Влияние экранов на параметры ВКИ | 11 |
| 2 Описание лабораторной установки | 12 |
| 3 Задание и методические указания | 12 |
| 3.1 Программа исследований | 12 |
| 3.2 Методические указания | 14 |
| 4 Контрольные вопросы | 15 |
| 5 Список рекомендуемой литературы | 16 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)..... | 17 |
| А.1 Принцип работы прибора | 17 |
| А.2 Подготовка прибора к работе..... | 18 |
| А.3 Измерение индуктивности и добротности | 18 |
| А.4 Измерение собственной ёмкости катушки..... | 19 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) | 20 |
| Б.1 Расчёт индуктивности | 20 |
| Б.2 Расчёт добротности..... | 26 |
| Б.3 Расчёт собственной ёмкости | 31 |

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.

1 Основные теоретические положения

1.1 Физическая сущность индуктивности

Согласно определению (ГОСТ 20718-75) *индуктивность L – скалярная величина, равная отношению потокосцепления самоиндукции катушки ψ к току I , протекающему через неё,*

$$L = \psi / I \quad (1.1)$$

Это выражение справедливо для установившегося режима в цепи переменного тока.

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

$$L = d\psi / di, \quad (1.2)$$

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

$$W_M = \Phi \cdot I / 2. \quad (1.3)$$

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

$$\Psi = \Phi \cdot N, \quad (1.4)$$

где N – число витков катушки.

Энергия магнитного поля катушки будет равна

$$W_M = \Psi \cdot I / 2. \quad (1.5)$$

С учетом (1.1) выражение (1.5) принимает вид

$$W_M = L \cdot I^2 / 2. \quad (1.6)$$

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 потокоцепления

$$e = - d\psi / dt. \quad (1.7)$$

С учетом (1.2)

$$e = - L \cdot di / dt. \quad (1.8)$$

Если взять производную от синусоидального тока

$$I = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.9)$$

и провести несложные преобразования, то получим

$$e = - j\omega L \cdot i = jx_L \cdot i, \quad (1.10)$$

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.

1.2 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 (1.2) и (1.4), а магнитный поток Φ выразим из схемы замещения магнитной цепи как отношение ампервитков (магнитодвижущей силы) к магнитному сопротивлению R_M

$$\Phi = i \cdot N / R_M. \quad (1.11)$$

Совместное решение уравнений (1.2), (1.4) и (1.11) позволяет получить выражение для индуктивности, справедливое для любых типов катушек

$$L = N^2/R_M. \quad (1.12)$$

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

$$R_M = \frac{l_c}{\mu_0 \cdot Q_c} = \frac{4 \cdot l_c}{\mu_0 \cdot \pi \cdot D_0^2} = \frac{K_l \cdot l}{\mu_0 \cdot D_0^2}, \quad (1.13)$$

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 (1.13) в (1.12), получим

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot D_0^2}{K_l \cdot l}. \quad (1.14)$$

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

$$L = L_0 \cdot N^2 \cdot D_0, \quad (1.15)$$

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

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

$$L_{kc} = L \cdot \mu_c. \quad (1.16)$$

μ_c зависит от начальной магнитной проницаемости материала μ_n и конструкции сердечника, частоты тока, соотношений диаметра намотки к диаметру сердечника, длины намотки и длины сердечника.

Эффективность использования магнитных свойств материала сердечника оценивается коэффициентом

$$k_{\mu} = \mu_c / \mu_n. \quad (1.17)$$

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

1.3 Добротность ВКИ

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

$$Q = \omega L / r_L. \quad (1.18)$$

Активное сопротивление катушки в общем случае складывается из сопротивления провода току высокой частоты r_f , сопротивления, вносимого потерями в диэлектрике Δr_d , в сердечнике Δr_c , в экране Δr_3 и т. д.

$$R_L = r_f + \Delta r_d + \Delta r_c + \Delta r_3. \quad (1.19)$$

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

$$r_f = r_0 \cdot \left[F(z) + \left(\frac{K \cdot N \cdot d}{2D} \right)^2 \cdot G(z) \right], \quad (1.20)$$

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.

1.4 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

$$C_0 \approx \frac{\pi \cdot D}{8.31 \cdot \lg(a + \sqrt{a^2 - 1})}, \quad (1.21)$$

где D – диаметр намотки катушки;

$a = \pi d$ - 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

$$C_0 \approx C_{0c} (0,33 n + 0,67) / n. \quad (1.22)$$

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

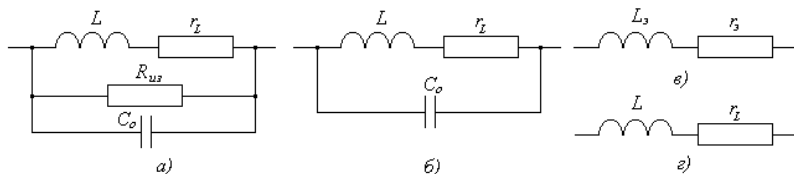
$$L_{эф} = \frac{L}{1 - \omega^2 LC_0}. \quad (1.23)$$

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

1.5 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 1.1), в которых распределённые параметры представлены в виде сосредоточенных.



а) - полная схема; б) - 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 1.1 – Эквивалентные схемы замещения ВКИ

1.6 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 $K_{св}$

$$\Delta L_э = K_{св}^2 \cdot L. \quad (1.24)$$

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

$$K_{св}^2 = \eta \cdot (D/D_э)^3, \quad (1.25)$$

где η – коэффициент, определяемый отношением длины и диаметра катушки l/D ;

$D_э$ – 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

$$\Delta r_3' = 2\pi \cdot K_{ce}^2 \cdot N^2 \cdot \frac{D}{D_3} \cdot \frac{D_3}{l_3} \sqrt{\rho \cdot f}, \quad (1.26)$$

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

$$\Delta r_3'' = r_0 \cdot (2K_{ce}^2 - K_{ce}^4) \cdot \left(\frac{KNd}{2D}\right)^2 \cdot G(z), \quad (1.27)$$

Общее эквивалентное сопротивление, вносимое экраном, будет составлять

$$\Delta r_3 = \Delta r_3' - \Delta r_3'' \quad (1.28)$$

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).

2 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 3.1; набор экранов; измерительный прибор Е9-4.

3 Задание и методические указания

3.1 Программа исследований

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

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

3.1.3 Изучить и описать особенности конструкций ВКИ, представленных на макете. Заготовить таблицу для внесения данных (см. таблицу 3.1).

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

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

3.1.6 Измерить индуктивность L и добротность Q указанных преподавателем ВКИ.

3.1.7 Измерить собственную ёмкость C_0 указанных преподавателем ВКИ.

3.1.8 Полученные экспериментальные данные внести в заготовленную таблицу (таблица 3.1).

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

3.1.10 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.

3.1.11 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.

Таблица 3.1 – Технические характеристики и результаты исследований высокочастотных катушек индуктивности

| Но- мер ВКИ | Технические характеристики катушек | | | | | | | Результаты исследований | | | |
|-------------------|------------------------------------|-------------|-----|-------------|----------------|-------|--------------------------|-------------------------|---------------|-----|---------------|
| | D_0 , мм | l , мм | N | d , мм | τ , мм | l/D | Материал экр. – D_3 | 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 | 0,5 3 | – | 7,6 | | | | |
| 8 | 16 | 13 | 13 | 0,67 | 0,93 | 0,8 1 | – | 7,6 | | | | |
| 5 | 12 | 9,5 | 16 | 0,62 | 0,64 | 0,7 9 | – | 7,6 | | | | |
| 7 без серд. | Многослойная, секционированная (n=3), намотка “кучей” | | | | | | | | 0,24 | | | |
| 7 с серде ч. | Сердечник СБ-34 из карбонильного железа ($\mu_n \approx 20$) | | | | | | | | 0,24 | | | |

3.1.12 Проанализировать влияние диаметра экрана D_3 на индуктивность L , добротность Q и собственную ёмкость C_0 ВКИ (сравнить параметры ВКИ-1 без экрана и с экранами 3-5). Построить зависимости L , Q и C_0 от D_3 , полагая, что у ВКИ без экрана $D_3 \gg 75$ мм.

3.1.13 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

$$L_{kc} = \mu_c \cdot L_k, \quad Q_{kc} = \mu_c \cdot Q_k \cdot Q_c / (\mu Q_k + Q_c),$$

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

$$k_\mu = \mu_c / \mu_n,$$

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

3.1.14 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.

3.1.15 Сделать подробные выводы по результатам исследований (по пунктам 3.1.9-3.1.14).

3.2 Методические указания

3.2.1 При подготовке к выполнению работы необходимо изучить раздел “Высокочастотные катушки индуктивности”, воспользовавшись литературой [1, с. 205-240, 250-287] и конспектом лекций.

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

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

3.2.3 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).

3.2.4 Выводы по результатам исследований сделать для каждого пункта в отдельности, соответственно пронумеровав их, например, 4.1, 4.2 и т.д. В выводах необходимо отразить физическую сущность исследуемых процессов, т.е. аналитически или логически доказать закономерность полученных зависимостей.

4 Контрольные вопросы

4.1 Из каких основных конструктивных элементов состоит ВКИ?

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

4.3 Какова физическая сущность индуктивности катушки?

4.4 Какими геометрическими параметрами и свойствами материалов определяется индуктивность катушки?

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

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

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

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

5 Список рекомендуемой литературы

1. 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.
2. Волгов В. А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
3. Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. – М.: Выс. шк. , 1975. – 440 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.
7. Н.И. Кузбных. Исследование высокочастотных катушек индуктивности: Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». – Томск: ТУСУР, 2006.– 25 с.

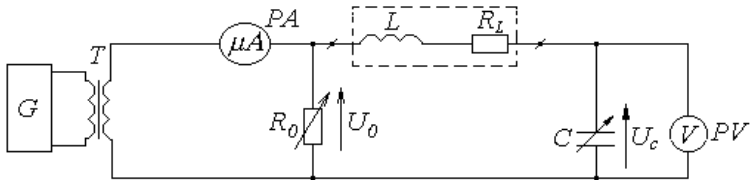
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

КРАТКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИБОРА Е9-4

А.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 А.1.



G – высокочастотный генератор синусоидальных сигналов; T – согласующий трансформатор; PA – микроамперметр контроля уровня сигнала; R₀ – эталонное сопротивление; L и R_L – индуктивность и активное сопротивление исследуемой катушки индуктивности; C – образцовый конденсатор переменной ёмкости; PV – ламповый вольтметр с высоким входным сопротивлением.

Рисунок А.1 – Упрощённая 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_c – 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 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_0}$, оказывает существенное влияние на величину индуктивности катушки $L_s = L/(1 - \omega^2 LC_0)$.

А.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.

А.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

$$L = 2,53 \cdot 10^{10} / f^2 C_s, \quad (\text{А.1})$$

где f – частота генератора, Гц;

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

А.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

$$C_0 = \frac{C_{2Э} - 4C_{1Э}}{3}, \quad (\text{A.2})$$

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 $C_1 = 50 \text{ нФ}$ 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 | $f_1, \text{ МГц}$ | $f_2, \text{ МГц}$ | $C_2, \text{ нФ}$ | $C_{2Э}, \text{ нФ}$ | $C_0, \text{ нФ}$ |
|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)

РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

(Все физические величины представлены в системе СИ)

Б.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 Б.1 или по рисунку Б.1 при $l/D = 0$;

N – число витков катушки;

D – диаметр намотки (диаметр каркаса).

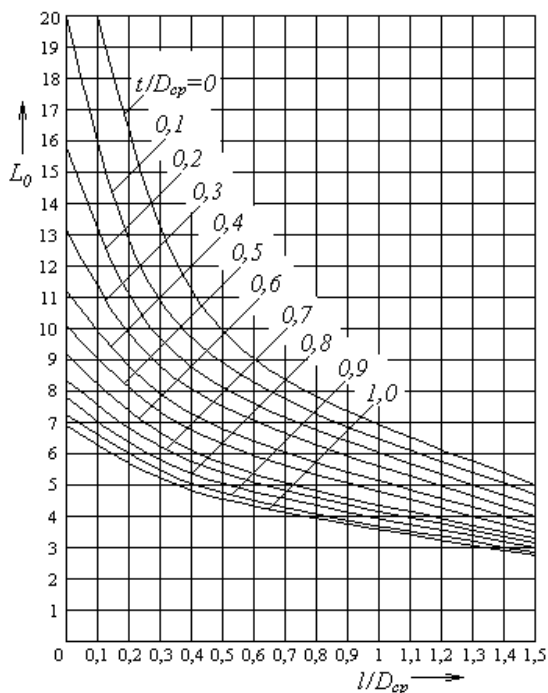


Рисунок Б.1 - Зависимость L_0 от соотношений l/D_{cp} и t/D_{cp} для многослойных цилиндрических катушек

Таблица Б.1 – Значение 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 Б.2) индуктивность приближённо может быть определена по формуле

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

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 Б.3.

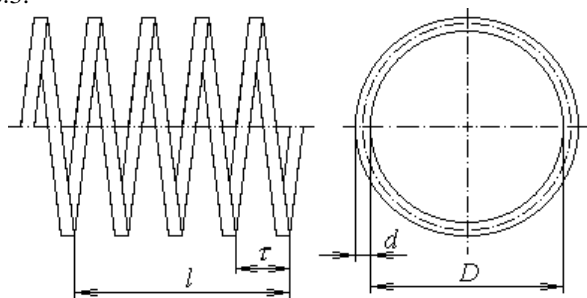


Рисунок Б.2 - Конструктивные размеры однослойной катушки

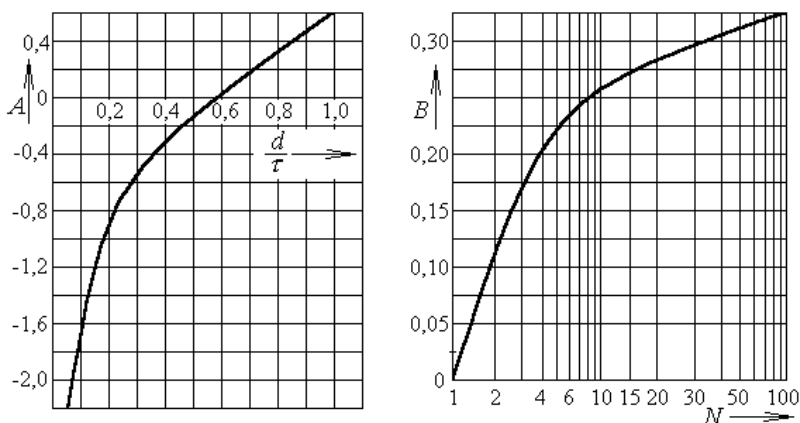


Рисунок Б.3 - Коэффициенты A и B для однослойной катушки с шаговой намоткой

Более точно индуктивность катушки с шаговой намоткой может быть рассчитана по формуле

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

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.

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

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

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;

τ – шаг намотки; d – диаметр провода без изоляции.

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

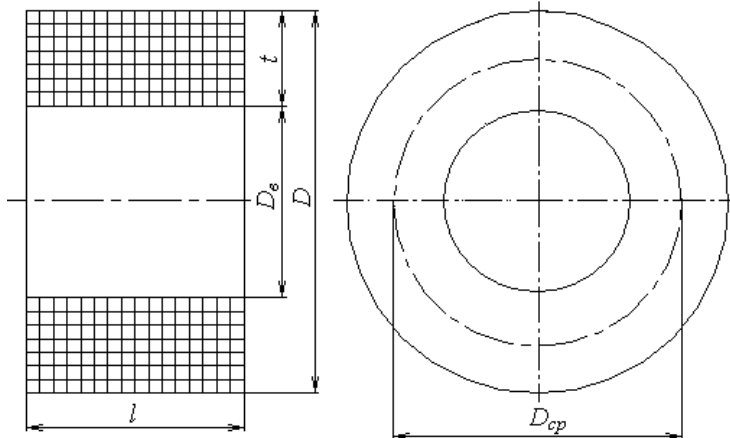


Рисунок Б.4 - Конструктивные размеры многослойной катушки

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

$$L = L_c [n + 2k_{св}(n - 1)], \quad (\text{Б.6})$$

где L_c – индуктивность одной секции; n – число секций;

$k_{св}$ – коэффициент связи между смежными секциями, может быть найден из рисунка Б.5.

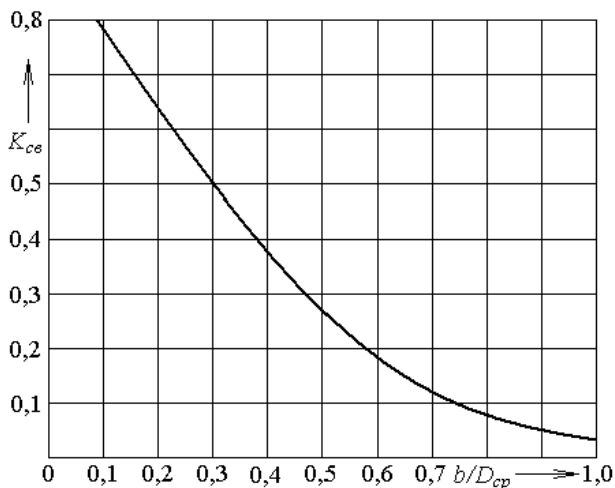


Рисунок Б.5 - Зависимость коэффициента связи от соотношения b/D_{cp} для многослойных секционированных катушек

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

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

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

где $D_{cp} = \frac{D_n + D_{вн}}{2}$;

$$A_{cp} = \frac{A_n + A_{вн}}{2}.$$

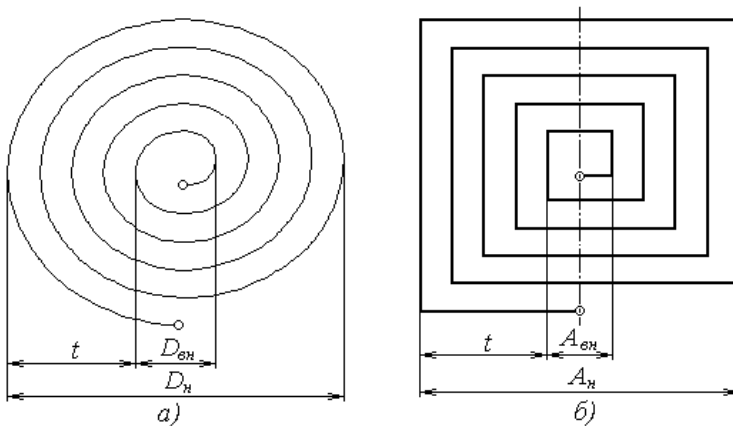


Рисунок Б.6 - Конструкции плоских печатных катушек

Индуктивность цилиндрической катушки с экраном равна

$$L_{кэ} = L_k(1 - k_{св}^2), \quad (\text{Б.9})$$

где L_k – индуктивность катушки без экрана;

$k_{св}$ – коэффициент связи катушки с экраном.

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

$$k_{св}^2 \approx \eta \cdot (D/D_э)^3, \quad (\text{Б.10})$$

где η – коэффициент, зависящий от конструктивных размеров катушки, определяется по рисунку Б.7;

$D/D_э$ – отношение внешнего диаметра катушки к внутреннему диаметру экрана.

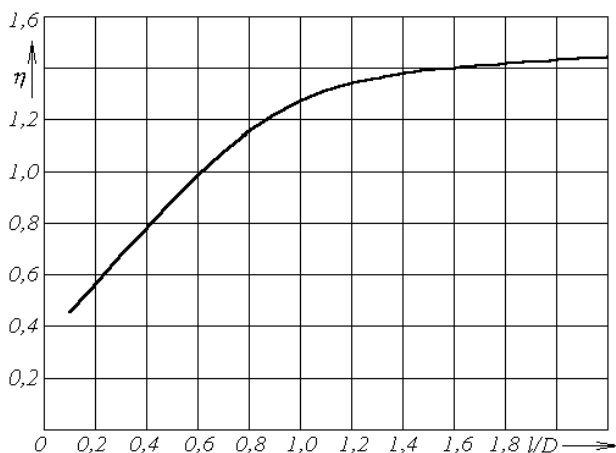


Рисунок Б.7- Зависимость коэффициента η от соотношения l/D

Для многослойных катушек со значительной глубиной намотки коэффициент связи равен

$$k_{св} = (D'/D)^3 \{L_0 \cdot L_0' \cdot [1 + (l_0/D_0)^2]\}, \quad (\text{Б.11})$$

где L_0 и L_0' – соответствующие коэффициенты для катушки и экрана, определяемые по рисунку Б.1 и по таблице Б.1;

l_0 и D_0 – длина и внутренний диаметр экрана;

D' – приведённый диаметр катушки с экраном, равный

$$D' = \sqrt[3]{(D^3 + D_0^3)/2}. \quad (\text{Б.12})$$

Индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником увеличивается в μ_c раз

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

где μ_c – действующая магнитная проницаемость сердечника (справочная величина).

Б.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

$$R_L = r_f + \Delta r_d + \Delta r_c + \Delta r_s, \quad (\text{Б.15})$$

где Δr_∂ , Δr_ε , Δr_c – 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 Б.2;

K – коэффициент, учитывающий влияние размеров катушки на эффект близости, определяется по графикам рисунка Б.8;

d – диаметр провода без изоляции;

D – диаметр однослойной катушки или наружный диаметр многослойной катушки;

z – вспомогательный расчётный параметр

$$z = 10,6 \cdot d \cdot \sqrt{f}. \quad (\text{Б.17})$$

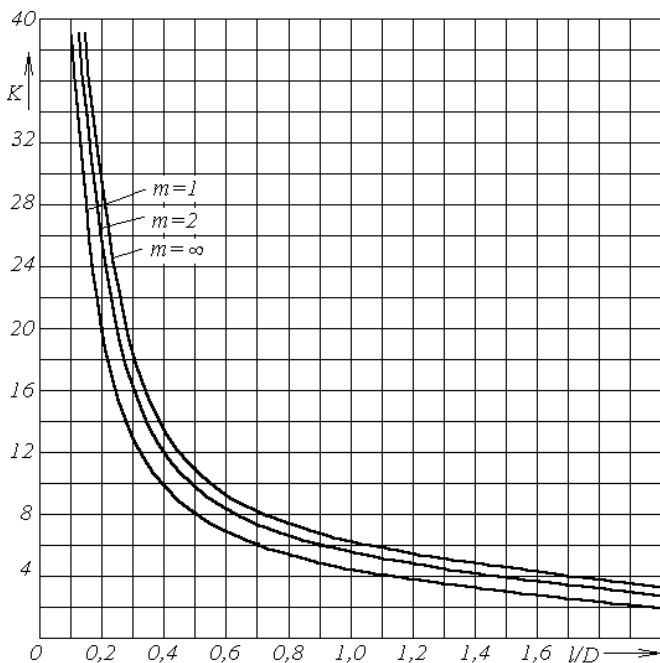


Рисунок Б.8 - Зависимости коэффициента K для расчета сопротивления однослойных и тонких многослойных катушек с числом слоев m

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

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

Сопротивление круглого провода постоянному току для цилиндрических катушек равно

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

где D_{cp} – средний диаметр обмотки катушки.

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

$$r_0 = 7 \cdot N \cdot D_{cp} \cdot 10^{-3} / d^2. \quad (\text{Б.20})$$

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

| z | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $F(z)$ | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 | 0,9999 |
| $G(z)$ | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |

| | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------------------|-------|
| $F(z)$ | 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 | $0,177 \cdot z - 0,125$ | |

Оптимальный диаметр провода, соответствующий минимуму сопротивления R_f , 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 рисунка Б.9 находится оптимальная величина параметра z_0 ;

- 4) определяется оптимальный диаметр провода

$$d_{opt} = z_0 / z'; \quad (\text{Б.23})$$

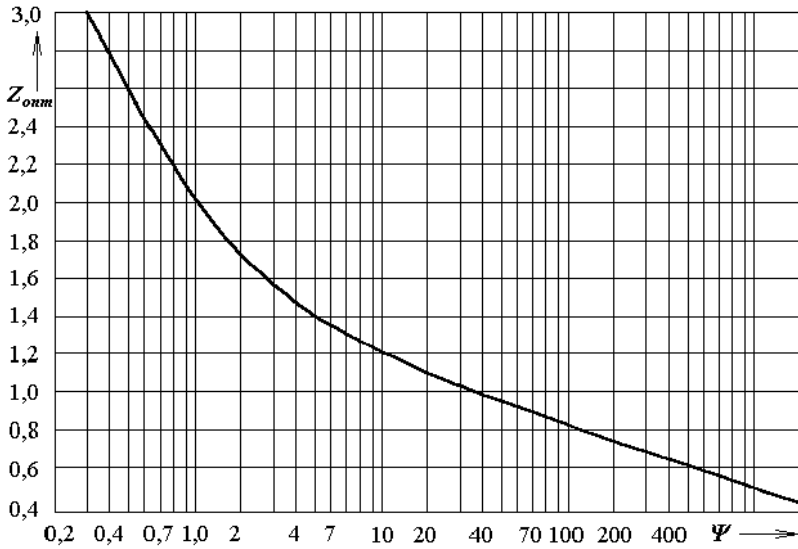


Рисунок Б.9 - Зависимость Z_{omn} от коэффициента Ψ

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

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

где $C_{0\delta}$ – собственная ёмкость катушки через диэлектрик, приближённо равна полной величине собственной ёмкости;

$tg \delta$ – тангенс угла потерь в диэлектрике, справочная величина (1, таблица П-1).

Сопротивление, вносимое экраном, определяется сопротивлением потерь в экране $\Delta r'_3$ и ослаблением влияния эффекта близости на сопротивление обмотки $\Delta r''_3$,

$$\Delta r_3 = \Delta r'_3 - \Delta r''_3, \quad (Б.25)$$

где

$$\Delta r'_3 = K_{ce}^2 \cdot N^2 \cdot r_3 \cdot (D/D_3); \quad (Б.26)$$

$$\Delta r''_3 = r_0 \cdot (2 - K_{ce}^2) \cdot K_{ce}^2 \cdot \left(\frac{K \cdot N \cdot d}{2 \cdot D}\right)^2 \cdot G(z). \quad (Б.27)$$

где r_3 – сопротивление внутренней поверхности экрана;

D_3 – внутренний диаметр экрана.

$$r_3 \approx \pi \cdot \rho_3 \cdot D_3 / (l_3 \cdot x_3), \quad (Б.28)$$

где ρ_3 – удельное сопротивление материала экрана или материала покрытия внутренней части экрана;

l_3 – длина (высота) экрана;

x_3 – глубина проникновения вихревых токов в экране

$$x_3 = 0,5 \cdot \sqrt{\rho_3 / f}. \quad (\text{Б.29})$$

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

$$\Delta r'_3 = 2 \cdot \pi \cdot K_{св}^2 \cdot N^2 \frac{D}{l_3} \cdot \sqrt{\rho_3 \cdot f} \cdot 10^{-3}. \quad (\text{Б.30})$$

Сопротивление потерь, вносимое ферромагнитным сердечником, обусловлено активными потерями на гистерезис, вихревыми токами и последствием и может быть определено через общий угол потерь в сердечнике δ_c

$$\Delta r_c = 2\pi f \cdot L_{кв} \cdot \text{tg} \delta_c. \quad (\text{Б.31})$$

Б.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 Б.10.

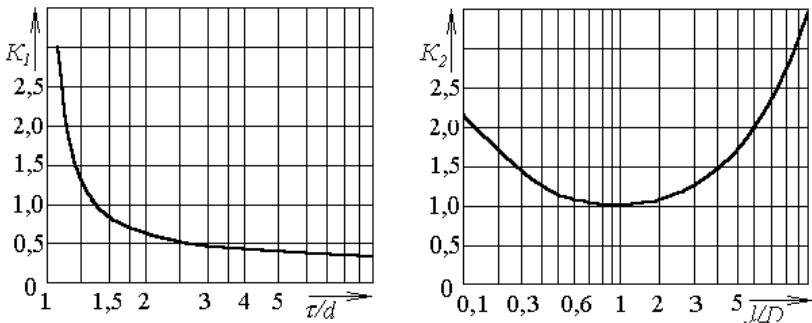


Рисунок Б.10 - Коэффициенты K_1 и K_2 для расчета собственной ёмкости однослойных катушек

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

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

где D_{cp} – средний диаметр намотки; ε – диэлектрическая проницаемость изоляции провода.

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.