

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)  
*Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)*

**Н.И.Кузбных**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ**

*Методические указания по выполнению контрольной работы по  
дисциплине “Перспективная элементная база РЭС” для студентов  
заочного факультета специальности 210201 Проектирование  
и технология радиоэлектронных средств*

**2012**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Основные теоретические положения .....</b>	<b>5</b>
2.1 Физическая сущность индуктивности .....	5
2.2 Индуктивность ВКИ.....	6
2.3 Добротность ВКИ.....	7
2.4 Собственная ёмкость ВКИ.....	7
2.5 Схема замещения катушки индуктивности.....	8
2.6 Влияние экранов на параметры ВКИ.....	9
2.7 Влияние ферромагнитного сердечника на параметры ВКИ.....	10
2.8 Стабильность индуктивности ВКИ.....	11
<b>3 Методика проектирования ВКИ.....</b>	<b>14</b>
3.1 Постановка задачи .....	14
3.2 Методика расчёта однослойной цилиндрической катушки.....	14
3.3 Особенности расчёта ВКИ с немагнитным экраном .....	18
3.4 Особенности расчёта ВКИ с ферромагнитными сердечниками .....	19
<b>4 Методические указания по выполнению контрольной работы.....</b>	<b>20</b>
4.1 анализ технического задания.....	20
4.2 Оформление текстовой части контрольной работы.....	21
4.3 Разработка и оформление графической части .....	21
<b>Список рекомендуемых источников.....</b>	<b>22</b>
<b>Приложение А Задания контрольных работ на проектирование высокочастотных катушек индуктивности.....</b>	<b>22</b>

## 1 ВВЕДЕНИЕ

*Под высокочастотной катушкой индуктивности (ВКИ) понимается свернутый в спираль проводник, обладающий в области высоких частот значительным индуктивным и относительно малым активным сопротивлением [3]. В соответствии с ГОСТ 19880-74 катушка индуктивности - это элемент электрической цепи, предназначенный для использования его индуктивности.*

Конструктивно катушки индуктивности выполняются цилиндрическими, кольцевыми (тороидальными), плоскими, печатными, микроминиатюрными в виде микромодулей и т. д. По типу намотки они разделяются на однослойные, многослойные, печатные, секционированные, не секционированные. В свою очередь, однослойные цилиндрические ВКИ бывают со сплошной, шаговой и прогрессивной намоткой, а также с вожженной в каркас обмоткой, каркасные и бескаркасные. Многослойные катушки могут быть выполнены простой рядовой намоткой или “внавал”, универсальной намоткой типа “универсаль” или перекрестной и другими типами намоток. Плоские и печатные катушки могут выполняться односторонними и двухсторонними, со спиральными, прямоугольными и произвольной формы витками. Все типы ВКИ могут быть реализованы без сердечников, с ферромагнитными и немагнитными сердечниками, с экранами и без экранов и т. д. более подробно с конструкциями ВКИ можно ознакомиться в [2,3].

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, так как от последних в прямой зависимости находятся добротность, точность и стабильность резонансной частоты контуров, точность и стабильность времени задержки линий задержки, частотные свойства фильтров и другие показатели качества колебательных контуров, линий задержки и резонансных фильтров.

К *катушкам связи* относятся ВКИ, предназначенные для передачи высокочастотных сигналов 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 с нагрузкой. Во многих случаях к катушкам связи требования в отношении точности, стабильности и добротности менее жесткие, чем к контурным катушкам, что позволяет упростить конструкцию и 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 радиоэлектронной аппаратуры. 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. Для получения большой индуктивности дроссели выполняются многослойными, а для уменьшения габаритных размеров используются сердечники из высокочастотных магнитных материалов (ферритов, магнитоэлектриков). Для повышения частотного диапазона применяются специальные конструктивные меры, позволяющие снизить собственную (паразитную) ёмкость. В частности, уменьшается диаметр катушки, катушка разделяется на секции, применяются специальные типы катушки (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 РЭС. 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 выпускаются в очень ограниченной номенклатуре. Весьма ограничены и справочные данные по ним. Поэтому радиоконструкторы должны уметь проектировать нестандартные катушки индуктивности по заданным параметрам, для чего необходимо знать зависимости основных параметров ВКИ (индуктивности, добротности, стабильности, собственной ёмкости) от геометрических параметров, свойств материалов и конструкции катушки.

Выполнение контрольной работы по проектированию нестандартных ВКИ будет способствовать приобретению наиболее твердых знаний и умений по высокочастотным катушкам индуктивности. Данные методические указания являются путеводителем при проектировании ВКИ и содержат:

- основные теоретические положения;
- методику проектирования ВКИ ручным методом;
- алгоритм проектирования ВКИ машинным методом;
- методические указания по выполнению контрольной работы;
- список рекомендуемой технической, справочной и нормативной литературы и необходимые ссылки на нее;
- исходные данные к контрольным работам.

## 2 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 2.1 Физическая сущность индуктивности

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

$$L = \Psi/I. \quad (2.1)$$

Это выражение справедливо для установившегося режима в цепи переменного тока.

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

$$L = d\Psi/di, \quad (2.2)$$

где  $\Psi$  и  $i$  – мгновенные значения потокосцепления катушки и тока, протекающего через неё.

Если через проводник пропустить электрический ток  $I$ , то вокруг него образуется магнитное поле, силовые линии которого будут образовывать концентрические окружности вокруг проводника, а направление магнитного потока  $\Phi$  будет определяться по правилу буравчика.

Если проводник свернуть в спираль, то общий магнитный поток будет равен сумме магнитных потоков каждого витка. Этот общий магнитный поток катушки назвали потокосцеплением самоиндукции  $\Psi$

$$\Psi = \Phi \cdot N, \quad (2.3)$$

где  $N$  – число витков катушки.

Соответственно, энергия магнитного поля катушки будет равна

$$W_M = \Psi \cdot I/2. \quad (2.4)$$

С учетом (2.1) выражение (2.4) примет вид

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

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

Если через проводник или катушку пропустить переменный ток, например, синусоидальный,

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.6)$$

то в них возникнет э. д. с. самоиндукции  $e$ , вектор которой направлен против напряжения, вызвавшего электрический ток, а величина её 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  $i$  и провести несложные преобразования, то получим

$$e = -j\omega L \cdot i = -jx_L \cdot i \quad (2.9)$$

Здесь  $I_m$  и  $\varphi$  – амплитуда и фаза тока в катушке;  $\omega$  – круговая частота пере-

менного тока;  $j$  – символ мнимого числа;  $x_L$  – индуктивное сопротивление катушки.

Следовательно, для переменного тока катушка 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 материалов основных элементов конструкции (провода обмотки, каркаса, сердечника, экрана и др.) Для установления этой взаимосвязи воспользуемся выражением (2.2), которое с учетом (2.3) принимает вид

$$L = d\Phi \cdot N / di. \quad (2.10)$$

В свою очередь, из схемы замещения магнитной цепи ВКИ (см. рисунок 2.1, б) следует, что магнитный поток

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

где  $i \cdot N$  – магнитодвижущая сила (ампервитки);  $R_M$  – магнитное сопротивление цепи ВКИ.

Подставив (2.11) в (2.10), получим 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 поддаётся строгому математическому описанию. Так, для цилиндрической, многослойной катушки без сердечника

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

где  $l_C$  – длина средней силовой линии магнитного поля катушки;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума (воздуха);  $Q_C = \pi D_C^2 / 4$  – площадь среднего витка катушки;  $K_l = l_C / l$  – коэффициент пропорциональности между длиной средней силовой линии и длиной намотки;  $l$  – длина намотки катушки.

Подставив (2.13) в (2.12), получим

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

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 зависимо-

сти от конструкции и геометрических параметров катушки. Поэтому в инженерной практике обычно используются приближенные зависимости. Так для цилиндрических катушек индуктивность определяется по формуле

$$L = L_0 \cdot N^2 \cdot D_{CP}, \quad (2.15)$$

где  $L_0 = f(l/D_{CP}; h/D_{CP})$  – вспомогательный коэффициент, зависящий от соотношений длины  $l$  и глубины  $h$  катушки к среднему диаметру катушки  $D_{CP}$ .

Расчетные соотношения индуктивности для различных конструкций ВКИ приводятся в технической и справочной литературе [1-7].

### 2.3 Добротность ВКИ

Согласно определению добротность ВКИ равна отношению реактивного сопротивления к активному  $r_L$

$$Q_K = x_L / r_L = \omega L / r_L. \quad (2.16)$$

Активное сопротивление катушки в общем случае складывается из сопротивления провода току высокой частоты  $r_f$  и сопротивлений, вносимых потерями в диэлектрике  $\Delta r_D$ , в сердечнике  $\Delta r_C$ , в экране  $\Delta r_{Э}$ , то есть

$$r_L = r_f + \Delta r_D + \Delta r_C + \Delta r_{Э}. \quad (2.17)$$

В области низких и средних частот преобладают потери в проводе. Причем сопротивление провода высокой частоты существенно выше сопротивления постоянному току за счет эффектов вытеснения тока – поверхностного эффекта и эффекта близости

$$r_f = r_0 \cdot \left[ F(z) + \left( \frac{K \cdot N \cdot d}{2 \cdot D} \right)^2 \cdot G(z) \right] \quad (2.18)$$

где  $r_0$  – сопротивление провода постоянному току;  $F(z)$ ,  $G(z)$  – коэффициенты, учитывающие поверхностный эффект и эффект близости;  $z$  – вспомогательный параметр;  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние параметров катушки на эффект близости;  $d$  – диаметр провода без изоляции;  $D$  – диаметр однослойной 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  $r_f$  оказывается минимальным, а добротность катушки максимальной [1, рисунок 4.13].

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 (экраном, 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, сердечника и других токопроводящих элементов конструкции, а также от диэлектрической проницаемости изоляции провода и каркаса и других факторов.

Собственная емкость катушки носит распределённый характер и точный аналитический расчет её величины весьма сложен, а в большинстве случаев не возможен. В инженерной практике её рассчитывают по упрощенным эмпирическим зависимостям. Так для однослойной незранированной катушки, намотанной на гладкий каркас, с удовлетворительной точностью её можно рассчитать по формуле

$$C_0 = \frac{\pi \cdot D}{8.31 \cdot \lg(a + \sqrt{a^2 - 1})}, \quad (2.19)$$

где  $D$  – диаметр намотки катушки;  $a = \tau/d$  – отношение шага намотки к диаметру провода без изоляции.

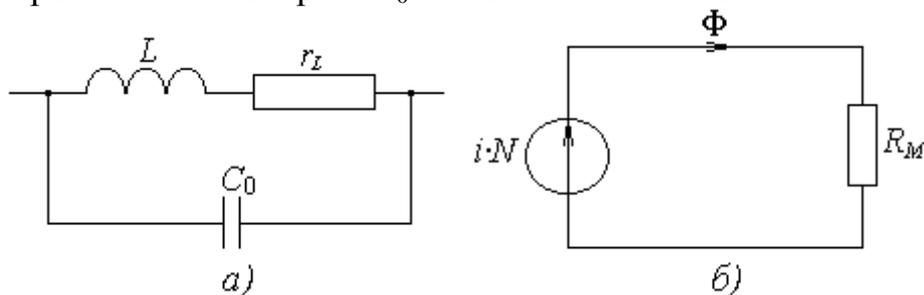
К существенному снижению собственной ёмкости приводит секционирование катушек

$$C_0 \approx C_{0C}(0,33 \cdot n + 0,67)/n, \quad (2.20)$$

где  $C_{0C}$  – собственная емкость секции;  $n$  – число секций.

## 2.5 Схемы 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 упрощенная схема (рисунок 2.1, а), в которой распределенные параметры представлены в виде сосредоточенных:  $L$  – индуктивности,  $r_L$  – сопротивления потерь и  $C_0$  – собственной емкости.



**Рисунок 2.1 – Схемы замещения ВКИ электрической (а) и магнитной (б) цепей**

Магнитная цепь катушки без ферромагнитного сердечника может быть представлена простейшей линейной схемой (рисунок 2.1, б), в которой:  $i \cdot N$  –

магнитодвижущая сила (ампервитки);  $R_M$  – магнитное сопротивление цепи,  $\Phi$  – магнитный поток 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 напряженности магнитного поля катушки снаружи экрана к напряженности поля в той же точке при отсутствии экрана.

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 создает магнитный поток, направленный встречно основному потоку. То есть, происходит ослабление магнитного потока катушки. Величина снижения индуктивности зависит от коэффициента связи катушки с экраном  $K_{CB}$

$$\Delta L_{\mathcal{E}} = K_{CB}^2 \cdot L. \quad (2.21)$$

$K_{CB}$  определяется соотношением геометрических параметров катушки и экрана

$$K_{CB}^2 = \eta \cdot (D/D_{\mathcal{E}})^3, \quad (2.22)$$

где  $\eta$  – коэффициент, зависящий от соотношения длины и диаметра намотки катушки  $l/D$ ;  $D_{\mathcal{E}}$  – внутренний диаметр экрана.

Снижение добротности катушки обусловлено уменьшением индуктивности на величину  $\Delta L$  и увеличением активных потерь на величину  $\Delta r_{\mathcal{E}}$ .

На активные потери экран влияет двояко. Во-первых, будут иметь место прямые потери в экране, обусловленные током экрана. Вносимое сопротивление, эквивалентное этим потерям, определяется зависимостью

$$\Delta r'_{\mathcal{E}} = 2\pi \cdot K_{CB}^2 \cdot N^2 \cdot (D/D_{\mathcal{E}}) \cdot (D_{\mathcal{E}}/l_{\mathcal{E}}) \cdot \sqrt{\rho_{\mathcal{E}} \cdot f}, \quad (2.23)$$

где  $\rho_{\mathcal{E}}$  – удельное сопротивление материала экрана, Ом·м;  $f$  – частота, Гц;  $l_{\mathcal{E}}$  – длина экрана.

Во-вторых, из-за уменьшения напряженности магнитного поля катушки ослабляется эффект близости, что приводит к уменьшению сопротивления провода катушки току высокой частоты на величину

$$\Delta r''_{\mathcal{E}} = r_0 \cdot K_{CB}^2 \cdot (2 - K_{CB}^2) \cdot \left( \frac{K \cdot N \cdot d}{2 \cdot D} \right)^2 \cdot G(z). \quad (2.24)$$

Общее эквивалентное сопротивление, вносимое экраном, будет определяться разностью этих сопротивлений

$$\Delta r_{\mathcal{E}} = \Delta r'_{\mathcal{E}} - \Delta r''_{\mathcal{E}}. \quad (2.25)$$

Для ослабления влияния экрана на катушку увеличивают отношение  $D_э/D$ , экран изготавливают из материалов с малым удельным сопротивлением (медь, алюминий), а внутреннюю поверхность шлифуют и покрывают благородными металлами (серебро, золото).

## 2.7 Влияние ферромагнитного сердечника на параметры ВКИ

Применение ферромагнитных сердечников позволяет существенно снизить массогабаритные показатели ВКИ, но при этом значительно снижается стабильность индуктивности и добротности и увеличивается собственная емкость катушки. Соответственно снижается диапазон рабочих частот ВКИ. В качестве материалов сердечников преимущественное применение находят магнитомягкие ферриты (марганцево-цинковые, никель-цинковые, литий-цинковые и др.) и магнитодиэлектрики (карбонильное железо, альсифер, МО-пермаллой).

Введение ферромагнитного сердечника в магнитную цепь ВКИ приводит к существенному снижению магнитного сопротивления  $R_M$ , а, следовательно, согласно выражению (2.12), к увеличению индуктивности катушки. Индуктивность катушки увеличивается в  $\mu_C$  раз

$$L_{KC} = L \cdot \mu_C, \quad (2.26)$$

где  $\mu_C$  – действующая магнитная проницаемость сердечника.

Действующая магнитная проницаемость  $\mu_C$  зависит от магнитной проницаемости материала  $\mu_H$  и конструкции сердечника, частоты тока, отношений диаметра намотки к диаметру сердечника и длины намотки к длине сердечника. Она всегда меньше магнитной проницаемости материала сердечника  $\mu_H$ . Эффективность использования магнитных свойств материала сердечника оценивается коэффициентом использования  $K_\mu$

$$K_\mu = \mu_C / \mu_H. \quad (2.27)$$

На добротность ВКИ введение ферромагнитного сердечника оказывает двоякое воздействие. Очевидно, что увеличение индуктивности в  $\mu_C$  раз приводит к соответствующему увеличению добротности катушки с сердечником. С другой стороны, в сердечнике будут иметь место активные потери. Следовательно, сопротивление потерь катушки с сердечником увеличивается на величину  $\Delta r_C$  (см. выражение (2.17)). Однако точный расчёт  $\Delta r_C$  весьма затруднителен. Поэтому в инженерной практике используется приближенная зависимость, учитывающая общее влияние ферромагнитного сердечника на добротность катушки

$$Q_{KC} = \frac{\mu_C \cdot Q_K \cdot Q_C}{\mu_C \cdot Q_K + Q_C}, \quad (2.28)$$

где  $Q_C$  – добротность сердечника, которая определяется как обратная величина тангенса угла потерь в сердечнике  $\delta_C$ ,

$$Q_C = 1/\operatorname{tg} \delta_C. \quad (2.29)$$

## 2.8 Стабильность индуктивности ВКИ

Стабильность (нестабильность) ВКИ характеризуется изменением параметров катушки под влиянием внешних воздействий: температуры, влажности, времени, механических и других воздействий. Под воздействием температуры изменяются геометрические параметры катушки и свойства материалов, а, следовательно, изменяются все параметры ВКИ. Влажность вызывает увеличение собственной емкости и диэлектрических потерь, со временем происходят изменения магнитной проницаемости ферромагнитных сердечников и диэлектрической проницаемости изоляции и каркаса. Все эти факторы приводят к изменениям индуктивности и добротности.

Наиболее важным и существенным из всех параметров, характеризующих нестабильность ВКИ, являются температурный коэффициент изменения индуктивности (ТКИ)  $\alpha_L$ . По определению *ТКИ есть относительное изменение индуктивности катушки  $\Delta L/L$  при изменении температуры  $\Delta t$*

$$\alpha_L = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta t} \approx \frac{1}{L \cdot \Delta t} \sum_i \left( \frac{\partial L}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial t} \cdot \Delta t \right) = \sum_i \alpha_{Li}, \quad (2.30)$$

где  $X_i$  – параметры катушки, влияющие на величину индуктивности;  $\alpha_{Li}$  – температурные коэффициенты изменения параметров катушки, влияющих на индуктивность.

В частности, изменение индуктивности под влиянием температуры вызывается: изменением геометрических размеров катушки (диаметра и длины намотки)  $\alpha_{LG}$ , изменением действующего диаметра намотки вследствие перераспределения тока по сечению провода  $\alpha_{LB}$ , изменением собственной ёмкости  $\alpha_{LC}$ , изменением параметров экрана  $\alpha_{LЭ}$ , изменением магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника  $\alpha_{L\mu}$ , то есть

$$\alpha_L = \alpha_{LG} + \alpha_{LB} + \alpha_{LC} + \alpha_{LЭ} + \alpha_{L\mu}. \quad (2.31)$$

Геометрическая составляющая ТКИ  $\alpha_{LG}$  может быть определена по формуле

$$\alpha_{LG} = \alpha_{LD} + (\alpha_{LD} - \alpha_{LI}) / (1 + kD/l), \quad (2.32)$$

где  $\alpha_{LD}$  – коэффициент линейного расширения диаметра намотки;  $\alpha_{LI}$  – коэффициент линейного расширения длины намотки катушки;  $k = 0,37...0,45$  – коэффициент, зависящий от отношения  $l/D$ . Чем меньше отношение  $l/D$ , тем меньше значение  $k$ .

Для уменьшения  $\alpha_{LG}$  производится либо горячая намотка провода на каркас, либо обмотка выполняется методом вжигания серебра на каркас с последующим наращиванием, а каркас выполняется из высокостабильных материалов, например, радиокерамики типа **В**, плавленного кварца и др. В этом случае  $\alpha_{LG}$  равняется коэффициенту линейного расширения каркаса  $\alpha_{LK}$ . Для высокостабильных ВКИ  $\alpha_{LG}$  не превышает  $(5..8) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Наиболее нестабильными являются катушки с холодной намоткой и бескаркасные катушки.

Вторая составляющая ТКИ в (2.31)  $\alpha_{LB}$  обусловлена увеличением действующего диаметра катушки с увеличением температуры, что приводит к увеличению удельного сопротивления провода. Для однослойных цилиндрических катушек, намотанных круглым медным проводом,

$$\alpha_{LB} \approx (2/Q_K) \cdot 10^{-3} K^{-1}, \quad (2.33)$$

где  $Q_K$  – добротность катушки.

Для уменьшения этой составляющей следует увеличить шаг намотки и уменьшить диаметр провода, чтобы ослабить эффект близости, либо обмотку выполнить методом вжигания на ребро нарезного каркаса.

Третья составляющая ТКИ катушки  $\alpha_{LC}$  обусловлена изменением собственной ёмкости, которая определяется изменением диаметра каркаса (намотки), шага намотки, диэлектрической проницаемости каркаса и других факторов. Но определяющим среди них является изменение диэлектрической проницаемости каркаса. С учётом последнего замечания

$$\alpha_{LC} \approx \alpha_\epsilon C_{0д}/C_0, \quad (2.34)$$

где  $\alpha_\epsilon$  – температурный коэффициент изменения диэлектрической проницаемости каркаса;  $C_{0д}$  – собственная ёмкость катушки, обусловленная диэлектриком;  $C_0$  – полная собственная ёмкость ВКИ или контура.

Для уменьшения этой составляющей применяют намотку, нанесённую на ребро нарезанного каркаса. При намотке круглым проводом применяют гладкие каркасы из диэлектриков с малыми диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и её температурным коэффициентом  $\alpha_\epsilon$ , например, из стеатита, ультрафарфора, плавленого кварца. В случае использования ВКИ в колебательном контуре увеличивают его ёмкость.

Воздействие температуры на экранированную катушку вызывает изменение размеров экрана и катушки, а также изменение влияния экрана на распределение тока по сечению провода. Составляющая ТКИ, обусловленная непосредственным влиянием экрана на индуктивность, может быть определена приближенно по формуле

$$\alpha_{LЭ} \approx 3(\sigma_\mathcal{E} - \sigma_D) \cdot \eta \cdot D^3 / (D_\mathcal{E}^3 - \eta \cdot D^3), \quad (2.35)$$

где  $\sigma_\mathcal{E}$  и  $\sigma_D$  – коэффициенты линейного расширения экрана и диаметра катушки  $D$ ;  $\eta$  – коэффициент, зависящий от соотношения  $l/D$ , определяется по [1, рисунок 4.18];  $D_\mathcal{E}$  – внутренний диаметр экрана.

Для ВКИ с обычным медным или алюминиевым экраном  $\alpha_{LЭ}$  может достигать  $(20...40) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Для уменьшения влияния экрана на ТКИ катушки увеличивают соотношение  $D_\mathcal{E}/D \geq 2,5...3$ , или делают экран из высокостабильных материалов (инвар, металлизированная керамика).

Катушки с магнитными сердечниками относятся к самым нестабильным. Это обусловлено, прежде всего, низкой стабильностью используемых в катушках индуктивности высокочастотных материалов: ферритов, альсифера, карбонильного железа. Кроме того, в ВКИ с магнитными сердечниками

обычно используются многослойные типы намотки, которые также отличаются низкой температурной стабильностью.

Составляющая ТКИ  $\alpha_{L\mu}$ , обусловленная магнитным сердечником, пропорциональна коэффициенту использования магнитных свойств материала  $k_\mu$

$$\alpha_{L\mu} = k_\mu \cdot \alpha_\mu, \quad (2.36)$$

где  $\alpha_\mu$  – температурный коэффициент изменения магнитной проницаемости материала сердечника.

Очевидно, что ВКИ с замкнутыми сердечниками имеют наиболее низкую стабильность. Катушки с кольцевыми и броневыми сердечниками из карбонильного железа имеют ТКИ порядка  $(60 \dots 100) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , а из ферритов – до  $(250 \dots 300) \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Катушки с разомкнутыми сердечниками, в том числе и с зазором, имеют ТКИ в несколько раз меньше. При относительно малых зазорах

$$\alpha_{L\mu} \approx \frac{k_\mu \cdot \alpha_\mu}{1 + \delta'_C (\mu_{отн} - 1)}, \quad (2.37)$$

где  $k_\mu$  и  $\mu_{отн}$  – коэффициент использования магнитных свойств материала и относительная магнитная проницаемость для данного сердечника без зазора;  $\delta'_C = \delta_C / l_C$  – относительный немагнитный зазор сердечника;  $\delta_C$  – величина немагнитного зазора;  $l_C$  – средняя длина магнитной силовой линии.

## 3 МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВКИ

### 3.1 Постановка задачи

Обычно в техническом задании оговариваются:

- тип катушки (тип намотки, каркаса, экрана сердечника и другие особенности конструкции);

- индуктивность номинальная  $L_H$ , мкГн;
- добротность минимально допустимая (заданная)  $Q_3$ ;
- частота рабочая  $f$ , МГц;
- назначение катушки;
- условия эксплуатации.

Возможны также ограничения по технико-экономическим показателям.

В задачи проектирования ставится:

- определение геометрических параметров катушки (диаметра каркаса, длины намотки и др.);

- расчет числа витков, оптимального диаметра провода, добротности, собственной емкости, температурного коэффициента измерения индуктивности;

- разработка конструкции ВКИ – выбор и обоснование конструктивных решений, выполнение сборочного чертежа и спецификаций.

В общем случае методика расчета катушек индуктивности будет несколько различной в зависимости от их конструкций. В данных методических указаниях ограничимся проектированием лишь цилиндрических катушек. Поэтому в основу проектирования их можно положить методику расчета однослойной ВКИ без экрана и без сердечника, которую условно можно разделить на следующие этапы:

- расчет числа витков;
- расчет оптимального диаметра провода;
- расчет добротности;
- расчет геометрических параметров и технико-экономических показателей.

### 3.2 Методика расчета однослойной цилиндрической катушки

3.2.1 Воспользовавшись рекомендациями из [1, с.207, таблица 4.1], выбирают диаметр каркаса  $D_0$ , см.

3.2.2 Задаются диаметром провода  $d$ , мм. В первом приложении можно принять  $d = 0,2..0,6$  мм [2, с.237]. Чем меньше индуктивность  $L_H$  и чем больше добротность  $Q_3$ , тем больше  $d$ .

3.2.3 Рассчитывают удельное число витков, приходящееся на единицу длины намотки катушки  $N_0$ , см<sup>-1</sup>

$$N_0 = N/l = 10/(\alpha \cdot d), \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент неплотности намотки;  $d$  – диаметр провода, см.

Если выбран сплошной тип намотки, то  $\alpha$  определяется из [1, с.219, таблица 4.3]. Если используется шаговая намотка, то принимается  $\alpha = \tau/d$  и выбирается в пределах 1,5..2,0 в зависимости от требуемой величины добротности – чем больше добротность, тем больше  $\alpha$ . Здесь  $\tau$  – шаг намотки.

3.2.4 Рассчитывают вспомогательный параметр – удельную индуктивность катушки  $P_0$ , мкГн/см

$$P_0 = \frac{L_H}{N_0^2 \cdot D_0^3}. \quad (3.2)$$

Здесь  $L_H$  в мкГн,  $N_0$  в 1/см и  $D_0$  в см.

3.2.5 По графику [1, с.217, рисунок, 4.11] находят соотношение ( $l/D$ ).

3.2.6 Определяют длину намотки катушки  $l$ , см

$$l = (l/D) \cdot D_0. \quad (3.3)$$

3.2.7 Рассчитывают в первом приближении число витков катушки

$$N^{(1)} = N_0 \cdot l. \quad (3.4)$$

3.2.8 Из таблицы [1, с.213, таблица 4.2] по соотношению ( $l/D$ ) находят ближайшую величину вспомогательного коэффициента  $L_0$ . При необходимости  $L_0$  уточняется с использованием метода линейной аппроксимации.

3.2.9 Проводят проверочный расчет индуктивности при принятых выше условиях (в первом приближении). Сначала рассчитывается индуктивность для идеализированной катушки  $L_{PAC}^{(1)}$ , мкГн

$$L_{PAC}^{(1)} = L_0 \left( N^{(1)} \right)^2 \cdot D_0. \quad (3.5)$$

Здесь  $D_0$  в см.

Но формула (3.5) справедлива для идеализированной однослойной катушки со сплошной намоткой. Для реальной катушки индуктивность необходимо уточнить по формуле

$$L_{PAC}^{(1)} = L_{PAC}^{(1)} - 2\pi \cdot N^{(1)} \cdot D_0 \cdot (A + B), \quad (3.6)$$

где  $A$  и  $B$  – поправочные коэффициенты, зависящие от отношения диаметра провода без изоляции к шагу намотки  $d/\tau$  и числа витков  $N$ , соответственно, определяются из [1, с.214, рисунок, 4.8].

3.2.10 Проверяется отличие расчетной величины индуктивности  $L_{PAC}$  от заданной  $L_H$

$$\delta L = \frac{L_{PAC}^{(1)} - L_H}{L_H} \cdot 100\%. \quad (3.7)$$

Если  $|\delta L|$  по модулю не более 10 %, то производится уточнение числа витков (второе приближение) по формуле

$$N^{(2)} = N^{(1)} \cdot \sqrt{L_H / L_{PAC}^{(1)}} \quad (3.8)$$

и проверяется условие  $N^{(2)} - N^{(1)} \leq 0,5$ .

3.2.11 Если число витков в первом и втором приближениях больше, чем полвитка, то методом последовательных приближений по формулам (3.5)-(3.8) уточняется число витков до тех пор, пока не будет выполняться условие

$$N^{(n)} - N^{(n-1)} \leq 0,5, \quad (3.9)$$

где  $N^{(n)}$  и  $N^{(n-1)}$  – число витков в  $n$ -ом и  $(n-1)$ -м приближениях.

3.2.12 Рассчитанное по приведённой выше методике число витков  $N$  округляется до целого или половины витка и уточняется  $L_{PAC}$  по формулам (3.5) и (3.6).

3.2.13 Рассчитывается вспомогательный параметр  $z'$  по формуле

$$z' = 106 \cdot \sqrt{f}. \quad (3.10)$$

Здесь  $f$  – частота, МГц.

3.2.14 По графику [1, с. 223, рисунок 4.12] определяется коэффициент  $K$  при  $m=1$  (для однослойной катушки) и соответствующем значении  $(l/D)$ .

3.2.15 Рассчитывается вспомогательный параметр  $\psi$

$$\psi = \left( \frac{K \cdot N}{2 \cdot z' \cdot D_0} \right)^2. \quad (3.11)$$

3.2.16 Определяется оптимальное значение параметра  $z_{onm}$ .

а) Если выполняется условие  $(0,3 \leq \psi \leq 2000)$ , то оптимальный параметр  $z_{onm}$  определяется по графику [1, с. 227, рисунок 4.14].

б) Если  $(\psi < 0,3)$ , то  $z_{onm}$  рассчитывается по формуле (3.12)

$$z_{onm} \approx \sqrt{2/\Psi} + 0,71. \quad (3.12)$$

в) Если  $(\psi > 2000)$ , то  $z_{onm}$  рассчитывается по формуле (3.13)

$$z_{onm} \approx \frac{2}{\sqrt[6]{2 \cdot \Psi}}. \quad (3.13)$$

3.2.17 Рассчитывается оптимальный диаметр провода  $d_{onm}$ , см

$$d_{onm} = z_{onm}/z'. \quad (3.14)$$

3.2.18 По таблице 3.1 выбирается ближайший стандартный диаметр провода  $d_{CT}$ .

Таблица 3.1 – Стандартные диаметры проводов, мм

0,05	0,11	0,17	0,25	0,38	0,53	0,67	0,83	1,04	1,30	1,62
0,06	0,12	0,18	0,27	0,41	0,55	0,69	0,86	1,08	1,35	1,68
0,07	0,13	0,19	0,29	0,44	0,57	0,72	0,90	1,12	1,40	1,74
0,08	0,14	0,20	0,31	0,47	0,59	0,74	0,93	1,16	1,45	1,81
0,09	0,15	0,21	0,33	0,49	0,62	0,77	0,96	1,20	1,50	1,88
0,10	0,16	0,23	0,35	0,51	0,64	0,80	1,00	1,25	1,56	1,95

3.2.19 Если  $|d_{CT} - d| > \Delta d/2$ , где  $d$  – диаметр провода, выбранный в пункте 3.2.2;  $\Delta d$  – дискретность проводов согласно таблице 3.1, то принимается  $d = d_{CT}$  и расчёт повторяется, начиная с пункта 3.2.3.

3.2.20 Рассчитывается сопротивление провода постоянному току  $r_0$ , Ом

$$r_0 = \frac{4\rho \cdot N \cdot (D_0 + d_{CT})}{d_{CT}^2}, \quad (3.15)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода при рабочей температуре,  $\text{Ом}\cdot\text{см}$ ;  $D_0, d_{CT}$  – диаметр намотки и диаметр стандартного провода,  $\text{см}$ .

$$\rho = \rho_{20}[1 + \alpha_T \cdot (t_P - 20)], \quad (3.16)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное сопротивление материала провода при температуре  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент изменения удельного сопротивления материала провода;  $t_P$  – максимальная рабочая температура катушки. Для медного провода  $\rho_{20} = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и  $\alpha_T \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$ .

3.2.21 Рассчитывается вспомогательный параметр  $z$  по формуле

$$z' = 106 \cdot d_{CT} \sqrt{f}, \quad (3.17)$$

где  $d_{CT}$  в  $\text{см}$ , а  $f$  в  $\text{МГц}$ .

3.2.22 По [1, с.224, таблица 4.5] определяются значения коэффициентов  $F(z)$  и  $G(z)$ , учитывающих увеличение сопротивления провода току высокой частоты, обусловленное поверхностным эффектом и эффектом близости, соответственно. Для повышения точности расчета рекомендуется уточнить коэффициенты, использовать метод линейной аппроксимации.

3.2.23 Рассчитывается сопротивление провода катушки току высокой частоты с учетом рабочей температуры  $r_f$ .

а) Если заданная рабочая частота  $f < 10 \text{ МГц}$ , то сопротивление  $r_f$  рассчитывается по формуле

$$r_f = r_0 \cdot \left[ F(z) + \left( \frac{K \cdot N \cdot d_{CT}}{2 \cdot z \cdot D_0} \right)^2 \cdot G(z) \right]. \quad (3.18)$$

б) Если рабочая частота  $f > 10 \text{ МГц}$ , то сопротивление провода катушки току высокой частоты  $r_f$  рассчитывается по формуле

$$r_f \approx \frac{0,525 \cdot D_0 \cdot N \cdot 10^{-3}}{d_{CT}} \cdot \sqrt{f} \cdot [1 + \alpha_T \cdot (t_P - 20)], \quad (3.19)$$

где  $D_0$  и  $d_{CT}$  – диаметры намотки и провода,  $\text{см}$ ;  $f$  – частота,  $\text{МГц}$ .

3.2.25 При достаточно высоких частотах (свыше  $10 \text{ МГц}$ ) необходимо учитывать потери, вносимые диэлектриком. Сопротивление  $\Delta r_D$ , эквивалентное диэлектрическим потерям, может быть рассчитано по формуле

$$\Delta r_D \approx 0,25 \cdot C_{0D} \cdot \text{tg}\delta \cdot L^2 \cdot f^3 \cdot 10^{-3}, \quad (3.20)$$

где  $C_{0D}$  – собственная емкость катушки, обусловленная диэлектриком,  $n\Phi$ ;  $\text{tg}\delta$  – тангенс угла потерь в диэлектрике каркаса;  $L$  – индуктивность катушки,  $\text{мкГн}$ ;  $f$  – частота,  $\text{МГц}$ .

$$C_{0D} \approx C_0 \cdot b \cdot \varepsilon \cdot (1 + b \cdot \varepsilon), \quad (3.21)$$

где  $C_0$  – собственная емкость катушки,  $n\Phi$ ;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала каркаса;  $b$  – коэффициент, зависящий от конструкции намотки: при осажженной намотке по ребру нарезного каркаса  $b = 0,06$ ; при намотке круглым проводом на гладкий каркас  $b = 0,08$ ; при намотке круглым проводом на нарезной каркас  $b = 0,111$ .

Для однослойной неэкранированной катушки собственная емкость может быть приближенно определена по следующей формуле

$$C_0 \approx \frac{\pi \cdot D_0}{8,3 \cdot \lg(a + \sqrt{a^2 - 1})}, \quad (3.22)$$

где  $D_0$  – диаметр каркаса, см;  $a = \tau/d$  – отношение шага намотки к диаметру провода. Для ВКИ со сплошной намоткой  $a = \alpha$  – коэффициенту неплотности намотки, который уточняется из [1, таблица 4.3] для выбранного в пункте 3.2.18 диаметра провода.

3.2.26 Рассчитывается сопротивление, эквивалентное полным потерям в катушке,  $r_L$

$$r_L = r_f + \Delta r_d. \quad (3.23)$$

3.2.27 Рассчитывается добротность катушки  $Q$

$$Q = \frac{2\pi \cdot f \cdot L_{PAC}}{r_L}. \quad (3.24)$$

3.2.28 Если расчетная добротность  $Q$  окажется меньше заданной  $Q_3$ , то необходимо увеличить диаметр намотки (каркаса)  $D_0$  и повторить расчет, начиная с пункта 3.2.4. Если же  $Q$  окажется существенно больше  $Q_3$ , то необходимо уменьшить диаметр намотки  $D_0$  и повторить расчет.

При шаговой намотке возможно некоторое увеличение добротности путем подбора оптимального соотношения  $\tau/d$  без увеличения  $D_0$ .

3.2.29 Рассчитывается нестабильность индуктивности катушки, если это предусмотрено заданием, по методике, приведенной в [2].

3.2.30 При необходимости рассчитываются технико-экономические показатели: габаритные размеры и габаритный объем, масса, стоимость и др. показатели.

### 3.3 Особенности расчета ВКИ с немагнитным экраном

3.3.1 Как уже было сказано в подразделе 2.6, наличие экрана из немагнитных материалов приводит: к уменьшению индуктивности и добротности катушки; к увеличению собственной емкости; к увеличению нестабильности индуктивности и добротности. Влияние экрана на параметры катушки проявляется тем больше, чем больше коэффициент взаимной магнитной связи  $K_{CB}$ .

3.3.2 На начальном этапе проектирования выбирают материал экрана и задаются априори соотношениями параметров:  $l/D$  – длины и диаметра намотки катушки и  $D_э/D_0$  – внутреннего диаметра экрана и диаметра каркаса.

3.3.3 По графику [1, с. 233, рисунок 4-18] находят коэффициент  $\eta$  и по формуле (2.22) рассчитывают коэффициент связи  $K_{CB}^2$ .

3.3.4 Рассчитывают индуктивность катушки без экрана  $L_K$

$$L_K = \frac{L_3}{1 - K_{CB}^2}, \quad (3.25)$$

где  $L_3$  – индуктивность катушки, заданная в техническом задании.

3.3.5 Приняв  $L_3 = L_K$ , проводят расчет катушки без экрана по методике, приведенной в подразделе 3.2 до пункта 3.2.2б.

3.3.6 Добротность ВКИ рассчитывается с учётом влияния экрана. В данном случае сопротивление  $r_L$ , эквивалентное полным потерям в катушке, будет равно

$$r_L = r_f + \Delta r_D + \Delta r_{\text{Э}}, \quad (3.26)$$

Здесь  $\Delta r_{\text{Э}}$  – эквивалентное сопротивление потерь, вносимое экраном, рассчитывается по формулам (2.23) – (2.25).

3.3.7 Рассчитывается индуктивность катушки с экраном  $L_{K\text{Э}}$

$$L_{K\text{Э}} = L_{PAC} \cdot (1 - K_{CB}^2). \quad (3.28)$$

Очевидно, при правильном расчёте  $L_{K\text{Э}} \approx L_3$ , а в идеале  $L_{K\text{Э}} = L_3$ .

3.3.8 Определяется добротность катушки с экраном  $Q_{K\text{Э}}$

$$Q_{K\text{Э}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L_{K\text{Э}}}{r_L}. \quad (3.27)$$

3.3.9 Если добротность  $Q_{K\text{Э}}$  окажется меньше  $Q_3$ , то необходимо увеличить диаметр намотки (каркаса)  $D_0$  и повторить расчёт начиная с пункта 3.2.4.

### 3.4 Особенности расчёта ВКИ с ферромагнитными сердечниками

3.4.1 На основании анализа задания в соответствии с рекомендациями [1, 2] выбирается тип и материал сердечника. При этом определяется, соответственно, тип катушки и тип намотки.

3.4.2 Выбирается типоразмер сердечника и из справочных данных выписываются необходимые параметры и технические характеристики.

3.4.3 Согласно рекомендациям выбираются или рассчитываются геометрические параметры каркаса и катушки. В результате оказываются определёнными диаметр каркаса  $D_0$  и допустимая длина намотки катушки  $l$ .

3.4.4 Рассчитывается необходимая индуктивность катушки без сердечника  $L_K$

$$L_K = L_3 / \mu_C, \quad (3.29)$$

где  $L_3$  – заданное номинальное значение индуктивности;  $\mu_C$  – относительная магнитная проницаемость выбранного сердечника (справочная величина).

3.4.5 Проводится расчёт катушки без сердечника согласно рекомендациям [2] или по приведённой выше методике.

3.4.6 Рассчитывается добротность катушки с сердечником  $Q_{KC}$

$$Q_{KC} = \frac{\mu_C \cdot Q_K \cdot Q_C}{\mu_C \cdot Q_K + Q_C}, \quad (3.30)$$

где  $Q_K$  – добротность катушки без сердечника;  $Q_C$  – добротность сердечника, которая определяется как

$$Q_C = 1/tg\delta_C, \quad (3.31)$$

где  $tg\delta_C$  – тангенс угла потерь в сердечнике (справочная величина).

3.4.7 Если добротность  $Q_{КС}$  окажется меньше заданной  $Q_3$ , то необходимо увеличить типоразмер сердечника и повторить расчёт. Можно также повысить добротность ВКИ путём выбора более высококачественного материала сердечника, либо введением оптимального немагнитного зазора, если это возможно.

## **4 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

### **4.1 Анализ технического задания**

Прежде, чем приступить непосредственно к проектированию (расчету) ВКИ, необходимо провести анализ технического задания (ТЗ). В результате анализа исходных данных задания уточняются условия эксплуатации, проводится обоснование и выбор возможных конструктивных решений, выбираются основные и конструкционные материалы.

Так как в ТЗ указываются лишь степень жесткости по температуре, то необходимо по ГОСТ 16962.1-89 определить пределы изменения температуры среды. Остальные параметры условий эксплуатации (атмосферное давление, влажность, механические воздействия) можно принять нормальными

Исходя из задания, необходимо предварительно выбрать и обосновать:

- 1) конструкцию ВКИ (конструкцию катушки, тип намотки, тип сердечника, конструкцию экрана и т. д.);
- 2) материалы обмотки, каркаса, основания, экрана, сердечника, выводов и т. д.; указать марку и стандарт (ГОСТ, ОСТ, ТУ).

Конструкция ВКИ выбирается, прежде всего, исходя из назначения, величины индуктивности и требований к добротности и стабильности согласно рекомендациям [1,2]. Каркас может быть гладкий, нарезной, ребристый и т.д. В большинстве случаев каркас и основание катушки объединяются в единую конструкцию и изготавливаются в едином технологическом цикле (прессование, литье под давлением и т.д.).

При выборе материалов каркаса и основания необходимо учитывать назначение ВКИ, требования к добротности и стабильности, а также технологию изготовления их.

Обмотки однослойных катушек обычно выполняются медными эмалевыми проводами круглого сечения. Вожженная обмотка осуществляется, как правило, серебром на керамический каркас. Для намотки многослойных катушек используются провода как с эмалевой, так и с волокнистой изоляцией, а для универсальной намотки – многожильный провод – литцендрат.

Выводы обмоток обычно осуществляются собственным проводом. Они распаиваются на лепестки, закреплённые на основании.

Для ВКИ с экраном, в зависимости от задания, согласно рекомендациям [1-3] выбирается конструкция экрана (цилиндрическая или прямоугольная). В качестве материала для экранов рекомендуется выбирать алюминий, медь,

латунь, бронзу и др. металлы, но предпочтение отдается цельнотянутым алюминиевым экранам, если нет особых требований. При жестких требованиях к добротности и стабильности ВКИ внутреннюю сторону экрана рекомендуется шлифовать и покрывать благородными металлами (серебром, золотом).

На этом этапе выбираются также соотношения размеров экрана и катушки  $D_{\text{э}}/D$  и  $l_{\text{э}}/l$ .

Конструкция и материал сердечника либо оговариваются в задании, либо выбираются в зависимости от величины индуктивности и частоты сигнала с учётом назначения катушки согласно рекомендациям [1-3].

## 4.2 Оформление текстовой части контрольной работы

4.2.1 Текстовую часть контрольной работы рекомендуется оформлять в соответствии с требованиями образовательного стандарта ОС ТАСУР 6. 1 [5].

4.2.2 Текстовая часть должна содержать:

- а) Задание в полном объёме;
- б) Введение с постановкой задачи;
- в) Анализ задания (см. подраздел 4.1);
- г) Расчёт катушки индуктивности (см. раздел 3);
- д) Разработку конструкции ВКИ (см. пункт 4.2.3);
- е) Заключение с критическим анализом результатов работы;
- ж) Список использованных источников.

4.2.3 В разделе “Разработка конструкции” необходимо окончательно выбрать и обосновать:

- конструкцию ВКИ (конструкцию и размеры каркаса, основания, экрана; тип намотки; тип сердечника; конструкцию выводов и т. д.);
- основные и конструкционные материалы (обмотки, каркаса, экрана, сердечника, выводов, основания и т. д.) – указать марку и ГОСТ или ТУ.

4.2.4 Допускается оформлять текстовую часть в ученической тетради.

## 4.3 Разработка и оформление графической части

Согласно заданию по результатам расчета должен быть разработан сборочный чертёж высокочастотной катушки индуктивности.

Сборочный чертёж должен быть выполнен на белой бумаге формата А4 в соответствии с ГОСТ 2.109-73 и должен содержать:

- две-три проекции с необходимыми разрезами и сечениями, раскрывающими сборочный состав;
- технические требования;
- схему электрическую (по необходимости);
- технические характеристики (желательно).

На чертеже должны быть указаны позиции, габаритные и установочные размеры и др. необходимые сведения. На установочные и присоединительные размеры устанавливаются допуски.

К сборочному чертежу обязательно должна быть представлена спецификация. Она является основным конструкторским документом и должна быть выполнена в соответствии ГОСТ 2.108-68. В ней должны быть представлены разделы: документация, сборочные единицы, детали, материалы и по необходимости другие разделы. Положения должны проставляться по нарастающей.

Положения в сборочном чертеже и в спецификации должны соответствовать. Поэтому они сначала проставляются в спецификации, а затем переносятся на сборочный чертёж. Шрифт положений должен быть хотя бы на одну позицию больше по сравнению со шрифтом размерных цепей.

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- 1 Кузбных Н.И., Козлов В.Г. Перспективная элементная база РЭС. Электрорадиоэлементы: Учебное пособие. – ТУСУР, 2007. – 263 с.
- 2 Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.
- 3 Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. – М.: Высш. школа., 1975. – 440 с.
- 4 Немцев М.В. Справочник по расчёту параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоиздат, 1989. – 192 с.
- 5 ОС ТАСУР 6.1 Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления. – Томск: ТАСУР, 1997. – 40 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

### ЗАДАНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

#### 1 Задание

Рассчитать и сконструировать высокочастотную катушку индуктивности по данным, приведенным в таблице А.1.

Таблица А.1 – Варианты заданий контрольных работ по  
высокочастотным катушкам индуктивности

Вариант	Тип катушки	Индуктивность $L$ , мкГн	Добротность $Q$	Частота, МГц	Тип намотки	Форма экрана	Степень жёсткости по тем-ре
1	Однослойная на цилиндрическом гладком каркасе	20	250	8	сплошная	Без экрана	VI
2		30	225	7			V
3		40	200	6			V
4		50	180	5			IV
5		60	160	4			IV
6	Однослойная на цилиндрическом нарезном каркасе	5	300	10	шаговая	Цилиндрическая	VIII
7		10	275	8			VII
8		15	250	7			VII
9		20	225	6			VI
10		25	200	5			VI
11	На керамическом нарезном каркасе	3	300	12	шаговая, вожженная на ребро каркаса	Прямоугольная	VII
12		7	275	10			VI
13		10	250	8			V
14		14	225	6			IV
15		18	200	5			III

#### 2 Порядок выполнения контрольной работы

2.1 По ГОСТ 16962-71 согласно заданной степени жёсткости определить предельно допустимые изменения температуры окружающей среды, приняв максимальную температуру как наихудшие условия эксплуатации.

2.2 Провести анализ исходных данных, выбрать и обосновать конструкцию каркаса и основания, материалы каркаса и основания, провода, экрана, выводов.

2.3 Рассчитать катушку индуктивности.

2.4 Разработать конструкцию ВКИ, выполнить сборочный чертёж и спецификацию согласно требованиям ГОСТ 2.109 и ГОСТ 2.108.