

[Радиоматериалы и радиокомпоненты]

[210303.65 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура»

210305.65 «Средства радиоэлектронной борьбы» ]

[ИИБС, кафедра Электроники]

[Преподаватель Останин Борис Павлович]

---

# Радиоматериалы и радиокомпоненты

---

Раздел 4

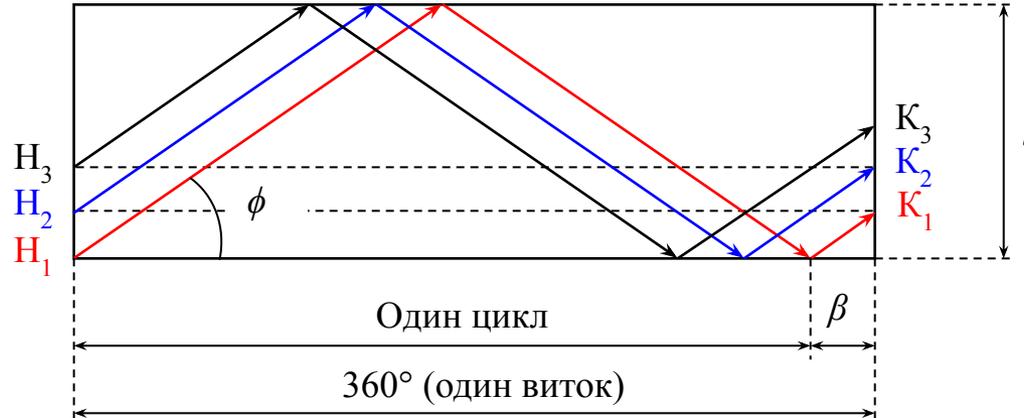
Катушки индуктивности

Лекция 2

# МЕТОДИКА РАСЧЁТА МНОГОСЛОЙНЫХ КАТУШЕК

# МЕТОДИКА РАСЧЁТА МНОГОСЛОЙНЫХ КАТУШЕК

## Методика расчёта многослойных катушек



Совершив один оборот вокруг каркаса, провод возвращается в положение, отличающееся от исходного на угол  $\beta$ . Это угол выбирается таким, чтобы каждый последующий виток находился рядом с предыдущим.

Очевидно, что

$$\operatorname{tg}\beta > \frac{2d_{\text{из}}}{D_0 \sin \varphi}$$

Угол  $\varphi$ , под которым осуществляется укладка провода, находят из

$$\operatorname{tg}\varphi \approx \frac{2l}{\pi D}$$

$d_{\text{из}}$  - диаметр провода в изоляции

$l$  - осевая длина катушки;

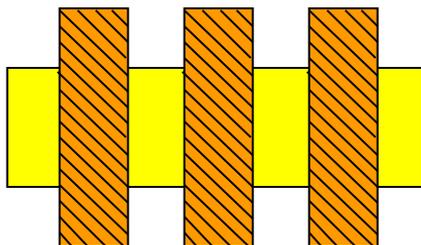
$D$  - диаметр витка.

Наименьшее значение  $\varphi$  будет у витков, имеющих наименьший диаметр (диаметр каркаса  $D_0$ ).

Обычно длину катушки с универсальной намоткой принимают от 2 до 10 мм. Количество циклов намотки связано с расчётным числом витков  $W$  соотношением

$$N = W \left( 1 - \frac{\beta}{360} \right)$$

Собственная ёмкость катушек с универсальной обмоткой составляет от 3 до 8 пФ. Дополнительное уменьшение ёмкости достигается секционированием обмотки.



## Совместное действие индуктивности и ёмкости учтём эквивалентной индуктивностью катушки

$$\frac{1}{\omega L_{\text{Э}}} = \frac{1}{\omega L} - \omega C_L = \frac{1 - \omega^2 LC_L}{\omega L}$$

$$L_{\text{Э}} = L \left( \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_L^2}} \right) \approx L \left( 1 + \frac{\omega^2}{\omega_L^2} \right)$$

$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{LC_L}}$  - собственная резонансная частота катушки индуктивности.

Если рабочая частота много ниже собственной резонансной частоты  $\omega_L$ , то  $L = L_{\text{Э}}$ .

Во время работы на катушку действуют температура, влага и т.д. Больше всего влияет температура. Это влияние оценивают температурным коэффициентом индуктивности

$$TKL = \frac{\Delta L}{L\Delta T}$$

Температурная нестабильность индуктивности при изменении температуры обусловлена изменением длины и диаметра провода обмотки, изменением длины и диаметра каркаса, в результате чего изменяются шаг и диаметр витков. При изменении температуры изменяется диэлектрическая проницаемость материала каркаса. Что ведёт к изменению собственной ёмкости катушки. Для повышения температурной стабильности применяют каркасы из материала с малым значением коэффициента линейного расширения. Обычно это керамика. Повышению температурной стабильности катушек способствует прочное сцепление обмотки с каркасом. С этой целью обмотку выполняют методом вжигания серебра в керамический каркас. В этом случае изменение размеров токопроводящего слоя определяется только линейным расширением каркаса. Такие катушки имеют  $\text{TKL} \approx (5 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ . Стабильность многослойных катушек хуже [ $\text{TKL} \approx (50 \dots 100) \cdot 10^{-6}$ ], т.к. в них невозможно избежать изменения линейных размеров провода обмотки.

## Потери в катушках индуктивности

Потери складываются из потерь в проводах, диэлектрике, сердечнике и экране. Суммарные потери оцениваются сопротивлением потерь  $R_{\Pi}$ , которое определяет добротность катушки

$$Q = \frac{\omega L}{R_{\Pi}}$$

Потери в проводах:

1. провода обмотки обладают резистивным (омическим) сопротивлением,
2. поверхностный эффект,
3. эффект близости.

## *Резистивное сопротивление*

$$R_0 = \rho \frac{l}{S} = \frac{4l}{\pi d^2} \rho$$

$l$  - длина провода обмотки,

$d$  - диаметр провода,

$\rho$  - удельное сопротивление материала провода.

$R_0$  можно выразить через число витков катушки  $W$  и средний диаметр катушки  $D_{CP}$ :

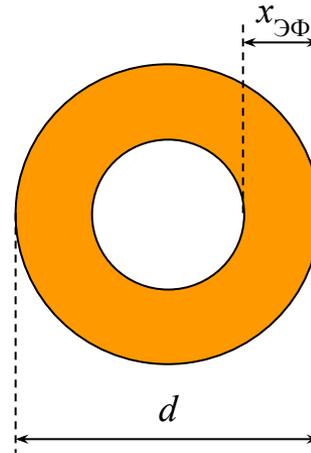
$$R_0 = \frac{7,3D_{CP}W}{d^2} \cdot 10^{-6}$$

$$D_{CP} = \frac{D_0 + D}{2} \text{ , см;}$$

$d$  - диаметр провода.

## *Поверхностный эффект*

Ток протекает не по всему сечению провода, а по кольцевой части поперечного сечения.



Вследствие этого сопротивление провода  
переменному току

$$R_{\Pi} = \rho \frac{l}{S_{\text{ЭФ}}}$$

$S_{\text{ЭФ}}$  - площадь кольца

$$S_{\text{ЭФ}} = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_{\text{ВН}}^2)$$

$$d_{\text{ВН}} = \frac{d - x_{\text{ЭФ}}}{2}$$

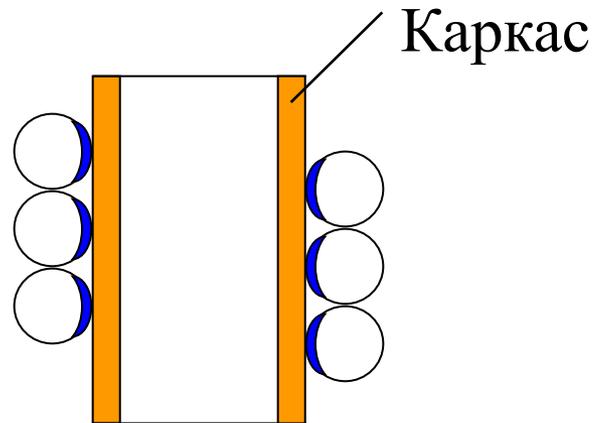
Тогда

$$R_{\Pi} = \rho \frac{d}{\pi dx_{\text{ЭФ}}}$$

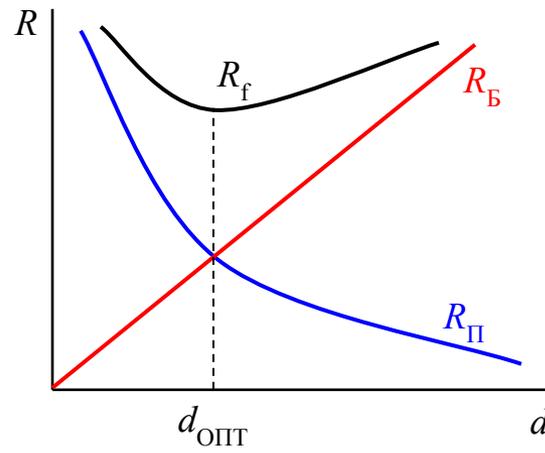
## *Эффект близости*

В проводах обмотки, свитой в спираль, проявляется эффект близости, суть которого состоит в вытеснении тока под воздействием вихревых токов и магнитного поля к периферии провода, прилегающей к каркасу, в результате чего сечение, по которому течёт ток, принимает серповидный характер, что ведёт к дополнительному возрастанию сопротивления провода (на  $R_B$ ).

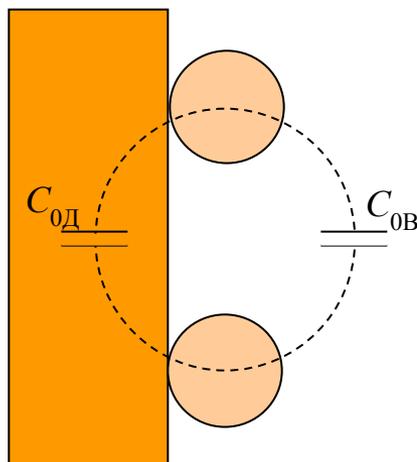
Сопротивление  $R_B$ , обусловленное эффектом близости, пропорционально диаметру провода, а сопротивление  $R_{\Pi}$ , обусловленное поверхностным эффектом, обратно пропорционально диаметру провода.



Существует оптимальный диаметр провода  $d_{\text{ОПТ}}$ , при котором сопротивление провода току высокой частоты  $R_f = R_{\text{П}} + R_{\text{Б}}$  оказывается оптимальным. Для однослойных катушек  $d_{\text{ОПТ}} = 0,2 \dots 0,6$  мм. Для многослойных  $d_{\text{ОПТ}} = 0,08 \dots 0,2$  мм. Существенно уменьшить потери в проводах можно, применяя провод «литцендрат», состоящий из большого числа жилок, скрученных в жгут. При небольшом диаметре тонких жилок ослабляется поверхностный эффект, а скручивание жилок в жгут ослабляет эффект близости.



***Потери в диэлектрике*** обусловлены тем, что между соседними витками катушки существует ёмкость, имеющая две составляющие – ёмкость через воздух  $C_{0В}$  и ёмкость через диэлектрик  $C_{0Д}$ .



Потери в диэлектрике учитывают величиной  $tg\delta$ ,  
зная которую можно рассчитать сопротивление потерь

$$R_{д} = 0,25C_{од}tg\delta L^2 f^3 \cdot 10^{-3}$$

$C_{од}$ , пФ;  
 $L$ , мкГн;  
 $f$ , МГц.

**Потери в сердечнике** складываются из потерь на вихревые токи  $\delta_B$ , потерь на гистерезис  $\delta_H$  и начальных потерь  $\delta_{\Pi}$  и учитываются как тангенс угла потерь в сердечнике:

$$\operatorname{tg} \delta_C = \delta_B f + \delta_H H + \delta_{\Pi}$$

В справочниках приводят значения  $\operatorname{tg} \delta_C$  для различных типов сердечников.

Сопротивление потерь

$$R_C = \operatorname{tg} \delta_C \omega L$$

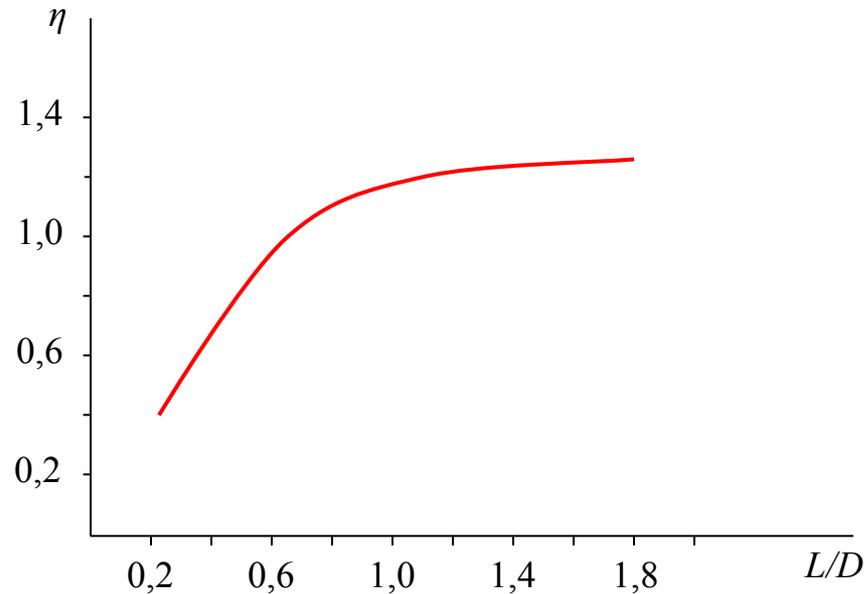
***Потери в экране*** из-за того, что ток, протекающий по катушке, индуцирует ток в экране. Потери, вносимые экраном

$$R_{\text{Э}} = 1,05\eta \left( \frac{D}{D_{\text{Э}}} \right)^3 W^2 \frac{D}{l_{\text{Э}}} \sqrt{f} \cdot 10^{-3}$$

$D_{\text{Э}}$  - диаметр экрана, см;  
 $l_{\text{Э}}$  - длина экрана, см;  
 $f$  - частота, МГц.

Величину  $\eta$  определяют по графику  $\eta = f\left(\frac{l}{D}\right)$

(он был показан ранее)

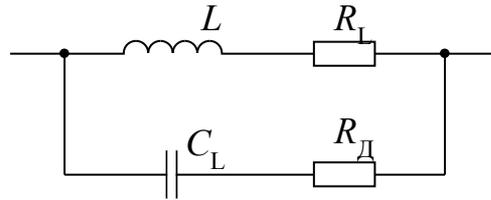


Суммарное сопротивление потерь в катушке, определяющее её добротность, равно

$$R_{\Pi} = R_f + R_{\text{Д}} + R_{\text{С}} + R_{\text{Э}}$$

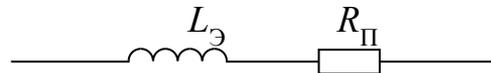
Практически значение добротности лежит в пределах от 30 до 200. Повышение добротности достигается выбором оптимального диаметра провода, увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями.

Катушку индуктивности можно представить в виде эквивалентной схемы



$$R_L = R_f + R_C + R_{\text{Э}}$$

Эквивалентная схема может быть приведена к более простому виду



Величины  $L_{\Sigma}$  и  $R_{\Pi}$ , а следовательно, добротность  $Q = \frac{\omega L}{R_{\Pi}}$  зависят от температуры. Эта зависимость определяется температурным коэффициентом добротности

$$TKD = \frac{\Delta Q}{Q \Delta T}$$