

[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

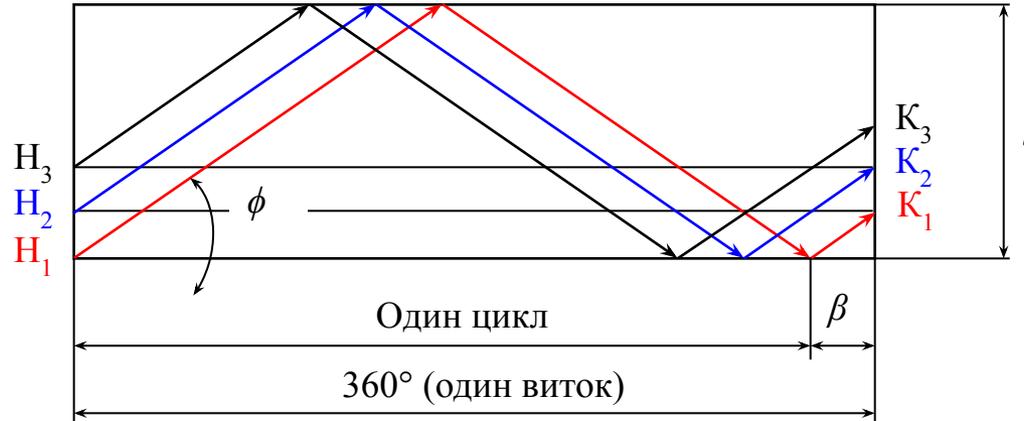
Катушки индуктивности

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 β . 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 φ , 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;

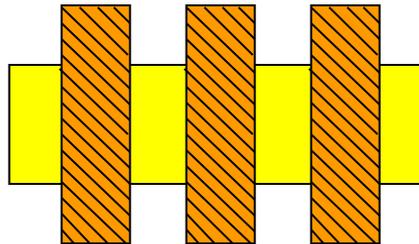
D - диаметр витка.

Наименьшее значение φ 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 ω_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_{Π} , 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,

ρ - удельное сопротивление материала провода.

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

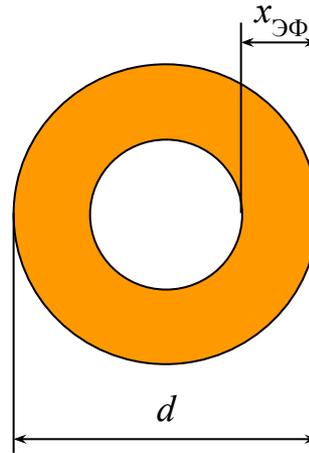
$$R_0 = \frac{7,3D_{CP}W}{d^2} \cdot 10^{-6}$$

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

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

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

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

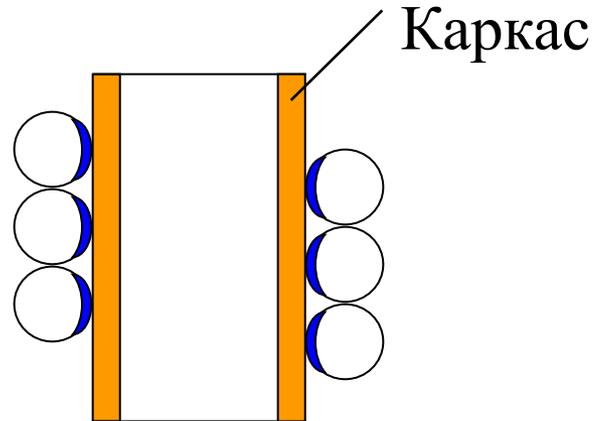
Тогда

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

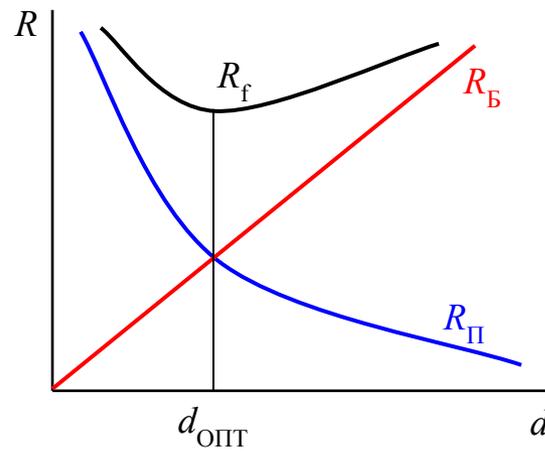
Эффект близости

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).

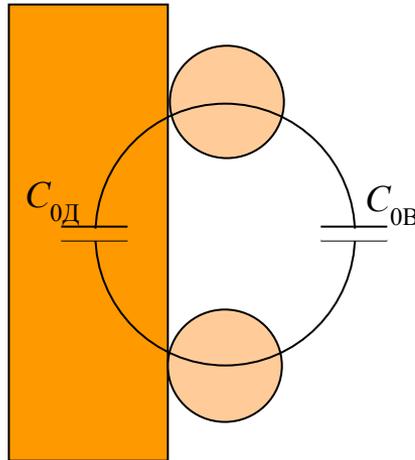
Сопротивление R_B , обусловленное эффектом близости, пропорционально диаметру провода, а сопротивление R_{Π} , обусловленное поверхностным эффектом, обратно пропорционально диаметру провода.



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 δ_B , потерь на гистерезис δ_H и начальных потерь δ_{Π} 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

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

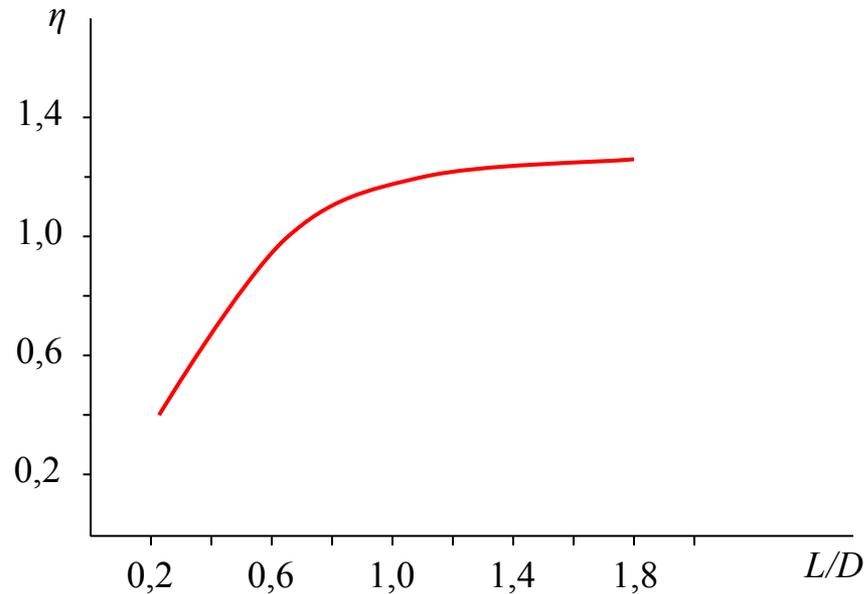
Потери в экране из-за того, что ток, протекающий по катушке, индуцирует ток в экране. Потери, вносимые экраном

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

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

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

(он был показан ранее)

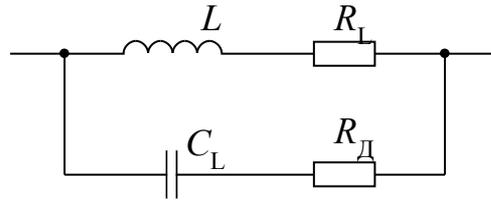


Суммарное сопротивление потерь в катушке, определяющее её добротность, равно

$$R_{\Pi} = R_f + R_{\text{д}} + R_{\text{с}} + R_{\text{э}}$$

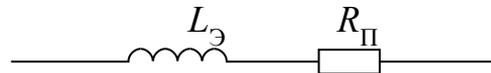
Практически значение добротности лежит в пределах от 30 до 200. Повышение добротности достигается выбором оптимального диаметра провода, увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями.

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

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