

Проектирование катушек без сердечников. Ч.1

Мирослав Лукевски

Компания «Eland Transformatory» является производителем индукционных элементов без сердечников типа EP1, а также EP3. В статье сопоставлены основные данные, касающиеся проектирования индукционных элементов без сердечника. Обсуждение ограничено до нескольких наиболее часто используемых на практике типов катушек.

Принципиальная схема катушки без сердечника

Намотка без сердечника – это катушка без сердечника, которая кроме собственной индуктивности L_o , имеет также собственную емкость C_o , а также электрическое сопротивление потерь $R_{пот}$, что представлено на параллельной принципиальной схеме (рис1а). Ту же схему можно представить в виде последовательной схемы (рис 1b), которая состоит из индуктивности и эффективного электрического сопротивления [1]

$$L_e = \frac{L_o}{1 - \left(\frac{f}{f_r}\right)^2} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{R_{str}}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_r}\right)^2\right]^2} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o \cdot C_o}} \quad (3)$$

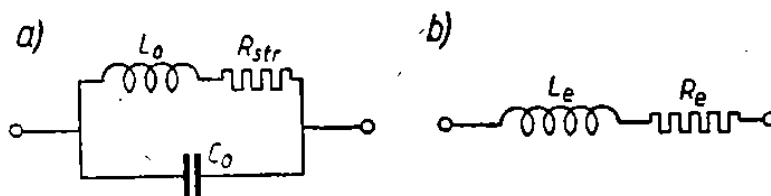


Рис.1 Принципиальная схема катушки без сердечника [1].

Сопротивление потерь $R_{пот}$ в результате явления скин-эффекта (поверхностного эффекта) зависит от частоты. Для малых частот сопротивление потерь равно сопротивлению намотки для постоянного тока $R_{пот}=R_o$. При возрастании частоты предположим, что сопротивление потерь является пропорционально квадрату частоты $R_{пот}\sim f^2$. [1,2]

Доброта качества и коэффициент мощности индукционной катушки определяется с помощью формулы:

$$Q = \frac{\omega \cdot L_o}{R_{nom}} \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{Q^2 + 1}} \quad (5)$$

Собственная и взаимная индуктивность одно- и многослойных катушек

Собственная индуктивность катушки без сердечника определяется для произвольной формы намотки путем исчисления согласованного потока Φ и тока катушки I , а затем самой индуктивности L_o .

$$\Phi = \oint_{l_M} \left[\iiint_V \frac{I_n \cdot \cos \alpha dV}{r} \right] dl_M \quad (6)$$

$$L_o = \frac{d(n\Phi)}{dI} \quad (7)$$

Таким способом определяется собственная индуктивность для наиболее часто встречающихся форм одно- и многослойных катушек без сердечников.

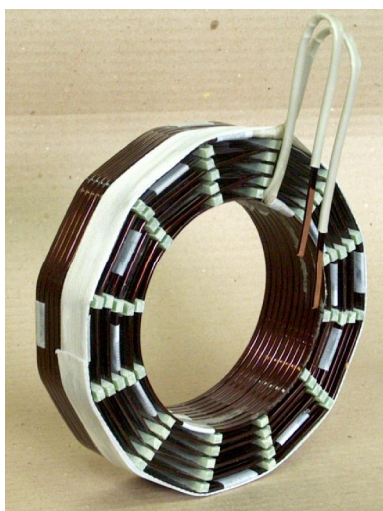


Рис2. Многослойная катушка с охлаждающими каналами типа EP1-0,49mH/10A

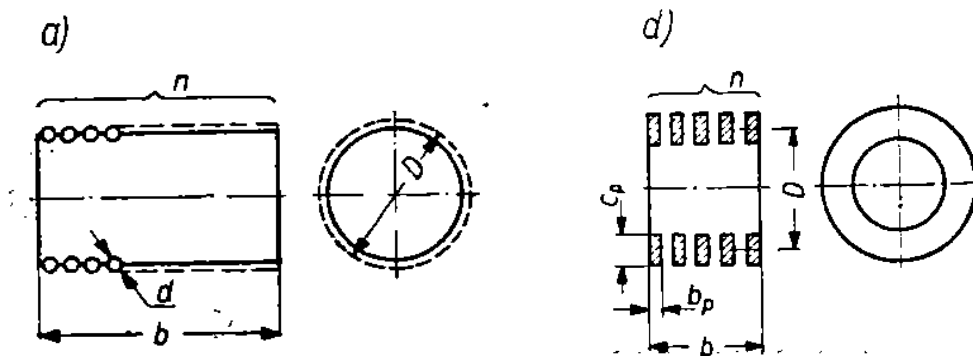


Рис.3 Однослойные катушки с круговым сечением, изготовленные из а) круглого, б) прямоугольного [1] провода.

Собственная индуктивность однослойных катушек, изготовленных из круглого (8) или прямоугольного (9) провода

$$L_o = F \cdot D \cdot n^2 \cdot 10^{-3} \text{ [}\mu\text{H]} \quad (8)$$

$$L_o = F \cdot D \cdot n^2 \cdot 10^{-3} - \frac{0,00628 \cdot D \cdot C_p \cdot n^2}{b} \cdot (0,693 + U_3) \text{ [}\mu\text{H]} \quad (9)$$

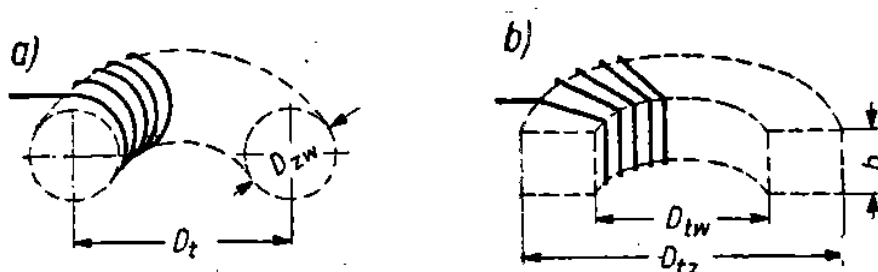


Рис.4 Торoidalные катушки, намотанные на каркас с: а) круглым сечением, б) прямоугольным сечением [1].

Собственная индуктивность однослойных тороидальных катушек, намотанных круглым проводом на каркасе с круглым (10) или прямоугольным (11) сечением

$$L_o = 0,00628 \cdot n^2 \cdot \left[D_t - (D_t^2 - D_{zw}^2)^{\frac{1}{2}} \right] \text{ [}\mu\text{H]} \quad (10)$$

$$L_o = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot \log \frac{D_{tz}}{D_{tw}} \cdot n^2 \text{ [}\mu\text{H]} \quad (11)$$

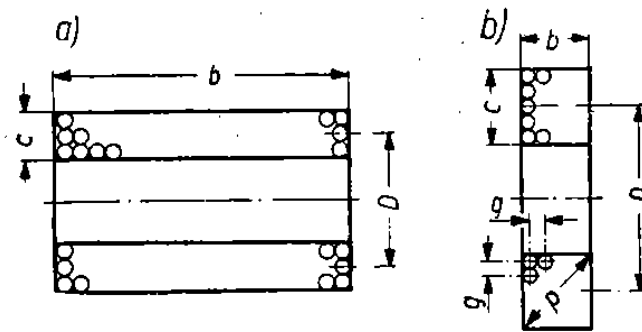


Рис.5 Многослойные катушки, намотанные на каркас с круглым сечением
а) длинная катушка, б) короткая катушка [1].

Собственная индуктивность многослойной длинной (10) и короткой (11) катушки

$$L_o = F \cdot D \cdot n^2 \cdot 10^{-3} - \frac{0,0127 \cdot D \cdot n^2}{b} \cdot (0,693 + U_3) \text{ [}\mu\text{H]} \quad (10)$$

$$L_o = \frac{80}{3 + 9 \frac{c}{b} + 10 \frac{b}{D}} \cdot D \cdot n^2 \cdot 10^{-3} \text{ [}\mu\text{H]} \quad (11)$$

В приведенных формулах выступают геометрические размеры намотки или каркаса, а также коэффициенты $F=f(D/b)$, $U_3=f(b/C_p)$ в зависимости от формы катушки.

В практических исчислениях к вычисленной собственной индуктивности следует добавить корректирующие поправки. Индуктивность, определенная с помощью приведенных формул с предполагаемым равномерным распределением тока в намотке, будет несколько меньше чем реальная индуктивность элемента. Расстояние между витками, возникающее в связи с шагом намотки, охлаждающими каналами или толщиной изоляции, приводит к неравномерному распределению плотности тока в намоточных проводах, что вызывает рост индуктивности. [1]

Сближение и соединение между собой двух катушек приведет к взаимодействию и появлению взаимной индуктивности M . Последовательное соединение катушек с собственной индуктивностью L_1 и L_2 вызывает изменение индуктивности системы:

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M = L_1 + L_2 \pm 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (12)$$

В случае параллельного сцепления катушек ток расходится в двух цепях пропорционально электрическому импедансу ветви. Индуктивность отдельных ветвей составляет:

$$L^a = L_1 - (\pm M) \quad (13)$$

$$L^b = L_2 - (\pm M) \quad (14)$$

Случайную индуктивность системы двух параллельно соединенных катушек определяем следующим образом:

$$L = \frac{L^a \cdot L^b}{L^a + L^b} = \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot (1 - k^2)}{L_1 + L_2 \mp 2k\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (15)$$

Коэффициент сжатия зависит от расстояния, а также соотношения диаметров катушек; на практике имеет максимальное значение $k=0,6$. [1,3]

Литература

- [1] – Poradnik Radio-i Teleelektryka [Справочник радио- и телеэлектрика] том В–Elementy i podzespoły [«Элементы и узлы»], Ред. Й. Антонец, РWT, Варшава 1959г.
- [2] – Elektryczność i magnetyzm w technice [«Электричество и магнетизм в технике»], Хенрик Рава, PWN Варшава 2001г.
- [3] – Elektrotechnika teoretyczna [«Теория электротехники»] том 2, Кароль Любельски, WPCz Ченстохов 1992г.