

Проектирование катушек без сердечника. Ч.2

Мирослав Лукевски

Компания «Eland Transformatory» является производителем индукционных элементов без сердечников типа EP1 и EP3. В статье представлены базовые технические параметры индукционных элементов без сердечников.

Собственная электрическая емкость катушек без сердечника

Техническими параметрами катушки без сердечника, кроме собственной и взаимной индуктивности, являются также электрическое сопротивление и электрическая емкость намотки. Результирующая собственная емкость катушки состоит из элементарных емкостей, возникающих между отдельными витками, а также между каждым из витков и остальными витками намотки.

Емкость однослойной цилиндрической катушки пропорциональна диаметру катушки и постепенно уменьшается с увеличением длины катушки.

$$C_o \approx \frac{2 + 4\xi^2 + \frac{1}{4\xi^2}}{10 + 16\xi^2 + \frac{3}{4\xi^2}} \quad (1)$$

Где: $\xi=b/D$ – параметр, зависящий от диаметра D и длины катушки b [1].

Однослойные катушки наименьшую емкость, $C_o = 1,1r$, получают, когда параметр $\xi=0,5$. Влияние заземления на собственную емкость катушки обуславливается введением множителя:

$$\varepsilon_m = 1 + \varepsilon_x \frac{\pi\delta}{b} \quad (2)$$

Где: ε_x – диэлектрическая проницаемость, δ - толщина изоляции, b – длина катушки [1].



Рис.1 Трехфазный индукционный элемент без сердечника в процессе испытаний EP3 - 2мН / 540А / 6кВ

Электрическая емкость многослойной катушки больше, чем емкость однослойной катушки, а ее емкость растет пропорционально длине катушки.

$$C_o \approx \frac{1}{m^2}(C_k + C_a) + \frac{m-1}{m^2} \cdot \frac{D \cdot b}{3,6 \cdot g_c} \quad (3)$$

Где: m – количество слоев катушки, g_c – эффективное расстояние между слоями, D, b – диаметр и длина катушки, C_k – емкость, определенная с помощью формул (1) и (2), если предположить, что ϵ_x – это диэлектрическая проницаемость каркаса, C_a – емкость, определенная с помощью формул (1) и (2), если предположить, что ϵ_x – это диэлектрическая проницаемость окружающей среды [1].

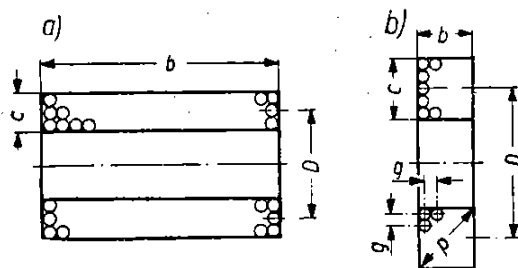


Рис.2 Многослойные катушки, намотанные на каркас с круговым сечением
а) длинная катушка, б) короткая катушка [1].

Металлические конструкции, корпуса, экраны, находящиеся в непосредственной близости катушки, увеличивают собственную электрическую емкость катушки – особенно, когда расстояние от конструкции является сопоставимым с размерами катушки.

Изменение емкости катушки получаем путем отдаления витков и слоев друг от друга, использования изоляционных материалов с небольшой диэлектрической проницаемостью, отдаления катушек от металлических масс и разбития катушек на секции. Разделение намотки на несколько последовательно соединенных секций, значительно уменьшает результирующую емкость катушки. Если емкость катушки C_o , то после разделения на x секций, каждая из них будет иметь емкость C_o/x , их результирующая емкость составит C_o/x^2 . К сожалению, между секциями появляются емкости C_s , которые увеличивают результирующую емкость на значение $C_s/x-1$. Полная емкость x секционной катушки составляет [1]:

$$C_{ox} = \frac{C_o}{x^2} + \frac{C_s}{x-1} \quad (4)$$

Где: x – количество секций катушки, C_o – емкость катушки до раздела на секции, C_s – емкость между секциями [1].



Рис.3 Многослойная катушка без сердечника – один из элементов трехфазной конструкции

Потери в катушках

В катушках без сердечников наблюдаются потери в проводнике R_{cu} – чаще всего медном, диэлектрические потери R_d – в изоляционном материале, индукционные потери R_{in} – в окружающей среде катушки, а также потери излученной энергии R_{pr} , которые для малых частот опускаются.

Потери в проводнике, индукционные потери и потери излученной энергии лежат в индукционной ветви принципиальной схемы катушки, а потери в диэлектрике – в емкостной ветви.

Потери в проводах катушек R_{cu} содержат тепловые потери провода R_p , дополнительно усиливаемые явлением скин-эффекта (поверхностного эффекта). Потери, возникающие из-за вихревых токов R_w , индуцированных магнитным полем соседних витков из-за влияния соседства. Кроме этого, появляется эффект увеличения потерь, вызываемый искривлением витков – потери вихревых токов тем больше, чем больше искривление витка. Общее сопротивление потерь в проводах катушки составляет [1]:

$$R_{cu} = R_p + R_w = R_o \left[a_n + kB \left(\frac{d}{g} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Где: R_o – электрическое сопротивление катушки для постоянного тока, a_n – коэффициент прироста сопротивления в результате скин-эффекта, зависящий от диаметра провода и глубины проникновения, B – коэффициент прироста сопротивления в результате соседства, k – коэффициент, зависящий от формы катушки, вида проводов и обмотки, g – расстояние осей проводов, шаг обмотки.

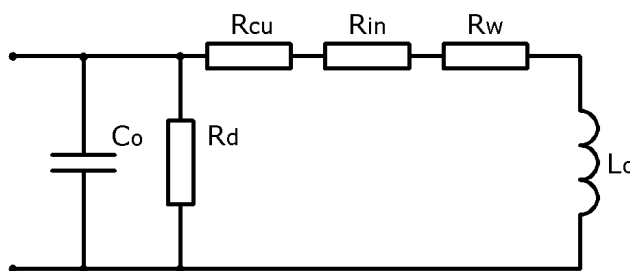


Рис.4 Схематическое изображение параметров катушки без сердечника

Диэлектрические потери возникают в каркасе и в изоляции намотки. Они зависят от качества и количества используемых диэлектрических материалов, влажности воздуха, ухудшающей показатель потерь изоляционного материала, интенсивности электрического поля и частоты [1].

$$R_d = \frac{\omega^3 \cdot L^2 \cdot C_o \cdot \text{tg}\delta}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_r}\right)^2\right]^2} \quad (6)$$

Где: ω - пульсация, L – индуктивность катушки, C_o – собственная емкость катушки, $\text{tg}\delta$ - коэффициент уровня потерь изоляции, f , f_r - частота и резонансная частота катушки.

Катушки без сердечников создают сильное электромагнитное поле в окружающем пространстве. Вихревые токи, создаваемые полем катушки в проводящих элементах, находящихся поблизости (стальные конструкции, корпуса, корпуса конденсаторов, экраны и т.д.) вызывают индукционные потери. Эти потери составляют значительную часть дополнительных потерь. Дополнительные потери, возникающие из-за соседства стальных элементов или конструкций, очень сложно поддаются оценке [1,2].

Литература

- [1] – Poradnik Radio-i Teleelektryka [Справочник радио- и телеэлектрика] том А,В, Ред. Й. Антоневиц, PWT, Варшава 1959г.
 [4] – Uzwojenia transformatorów energetycznych- budowa i obliczanie [Обмотки силовых трансформаторов – строение и расчёт], Коллективный труд под руководством Еугениуша Езерского, WNT, Варшава 1982г.