

И.К. Астафоров

РАСЧЕТ СЕКЦИОНИРОВАННОЙ КАТУШКИ РОГОВСКОГО

Приводится расчет дифференцирующих измерительных преобразователей тока, которые предлагается использовать в сетях высокого напряжения вместо традиционных трансформаторов тока.

Purpose of this paper is to give the design procedure of differentiating measuring current transducers, which are proposed for use in high voltage networks instead of traditional current transformers.

В последнее время в электротехнике наблюдается нарастающий процесс замены ТТ дифференцирующими индукционными измерительными преобразователями (ДИПТ), известными также под названиями трансреакторы, или катушки Роговского. ДИПТ не снабжены сердечником из ферромагнитного материала либо в таком сердечнике имеются воздушные зазоры, как у магнитных трансформаторов тока. Из-за отсутствия магнитного сердечника характеристики ДИПТ становятся линейными. По этой же причине отсутствуют погрешности, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами в ферромагнитном сердечнике, а также огромная погрешность, возникающая при насыщении такого сердечника. Таким образом, погрешности измерения значительно снижаются. Если внутри катушки ДИПТ имеется магнитный сердечник с воздушными зазорами, то и в этом случае насыщение сердечника практически не проявляется ни при каком значении измеряемого тока: у таких ДИПТ суммарное магнитное сопротивление участков сердечника, выполненных из ферромагнитного материала, ничтожно мало. ДИПТ отличаются от ТТ тем, что они работают в режиме, близком к холостому ходу. Это отличие обеспечивает снижение их массы в сотни и тысячи раз по сравнению с массой ТТ, измеряющих такие же токи при таком же выходном напряжении, соответственно снижается и стоимость изготовления. Положительным свойством ДИПТ по сравнению с ТТ является то, что его выходное напряжение пропорционально не самому току, а его производной. Поэтому проявление апериодических составляющих измеряемого тока снизится в десять и более раз.

Любую выполненную из проводящего материала катушку можно рассматривать как дифференцирующий преобразователь магнитного потока, сцепленного с ней. В соответствии с законом электромагнитной индукции, сформулированным М. Фарадеем, ЭДС e , наводимая в катушке изменяющимся во времени t магнитным потокосцеплением Ψ , определяется выражением:

$e = -\frac{d\Psi}{dt}$. Знак минус означает, что принятые положительные направления отсчета для ЭДС и для

магнитного потока при его возрастании связаны правилом правого винта. Катушкой Роговского называют такую катушку, которая расположена вблизи проводника (проводников) с током i , создающим указанное потокосцепление. ЭДС катушки Роговского связана с током i выражением:

$e = M \cdot \frac{di}{dt}$, где M – взаимная индуктивность катушки и проводника (проводников) с током i . Таким

образом, катушка Роговского является дифференцирующим индукционным преобразователем тока (ДИПТ) в проводнике, расположенном возле катушки.

Секционированные тороидальные катушки Роговского предназначены для измерения производных токов в электрических установках высокого напряжения. Конструктивное исполнение такой катушки обеспечивает ее высокую помехозащищенность от мешающих магнитных полей, а также возможность получения ЭДС, наводимой измеряемыми токами. При номинальных значениях измеряемых токов ЭДС составляет несколько вольт. Обмотка катушки состоит из большого числа секций (соленоидов), разделенных узкими промежутками длиной b , не покрытых витками. Соленоиды имеют средний диаметр витка d и длину a . Катушка охватывает участок покрышки высоковольтного ввода, который непосредственно примыкает к соединительной втулке ввода. Секции катушки целесообразно выполнять в виде одинаковых круговых соленоидов, надетых на общий гибкий немагнитный каркас [1, 2].

Расчет секционированной тороидальной катушки Роговского производится в следующем порядке:

1. Определяем средний диаметр витка d .

При определении среднего диаметра витка d следует учитывать удобство намотки секции катушки и размещения катушки вокруг покрышки высоковольтного ввода, а также толщину изоляционного покрытия секций и необходимость размещения катушки на участке между соединительной втулкой и первым кольцевым ребром покрышки. Чем больше этот диаметр, тем меньше число витков и длина обмоточного провода. Но при этом растет масса гибкого каркаса катушки, усложняются процессы изготовления секций катушки, надевания их на каркас и состыковки концов каркаса после охвата им фарфоровой покрышки. Рекомендуемое значение диаметра витка d находится в интервале от 5 до 8 см.

2. Определяем длину соленоида и предварительную длину промежутка.

Для удобства изготовления элементарных соленоидов, размещения их на общем гибком каркасе, закрепления соленоидов на нем и электрического соединения выводов элементарных соленоидов, относительная длина одинаковых элементарных соленоидов $\alpha_d = \frac{a}{d}$ должна быть не меньше 0,5 и не больше двух, так как при большем значении α_d возникают затруднения с насадкой секций на гибкий сердечник, а при меньшем α_d увеличивается сложность работ по обеспечению одинаковых зазоров b между секциями, прочному закреплению соленоидов на сердечнике и электрическому соединению выводов соленоидов. Относительная длина промежутков между обмотками соленоидов $\beta_d = \frac{b}{d}$ должна находиться в пределах от 0,2 до 0,5.

3. Определяем диаметр осевой линии.

Диаметр D осевой линии катушки определяется так, чтобы катушка свободно размещалась на нижнем участке верхней покрышки ввода в непосредственной близости к соединительной втулке. Для этого используются выбранный средний диаметр витка d и чертеж высоковольтного ввода.

4. Определяем взаимную индуктивность M катушки и центральной трубы высоковольтного ввода.

Взаимная индуктивность катушки и токопровода определяется по формуле: $M = \frac{E_2}{2\pi f I_1}$, где

I_1 – номинальный ток ввода; E_2 – напряжение катушки; f – частота.

5. Определяем размеры и число соленоидов (секций) катушки.

По заданным значениям диаметра D осевой линии катушки, среднего диаметра витка d и длины a соленоида, а также предварительному значению промежутков b между обмотанными

участками соленоидов находится предварительное значению числа секций катушки:

$$n = \frac{\pi D}{a + b}, \text{ которое затем округляется до целого числа.}$$

6. Выбираем обмоточный провод.

В связи с тем, что ток катушки составляет доли ампера, провод выбирается не по его допустимому нагреву, а исходя из удовлетворения трех других условий:

обеспечение механической прочности жилы провода и его изоляции в процессе механизированной намотки секций катушки;

низкое значение массы катушки;

активное сопротивление катушки много меньше сопротивления нагрузки.

Последнее условие устраняет большую потерю напряжения в нагруженной катушке.

Этим условиям отвечают провода с полиэфирной изоляцией, имеющие диаметр d_M медной жилы в пределах от 0,112 мм до 0,2 мм, при этом максимальный наружный диаметр изолированного провода $d_{из}$ находится в пределах от 0,14 мм до 0,24 мм [3].

Поперечное сечение выбранного обмоточного провода рассчитывается по формуле:

$$s_M = \frac{\pi d_M^2}{4}.$$

7. Определяем число витков соленоидов и катушки.

Число витков соленоида находится по выражению [4]:

$$w_i = \frac{2M}{\mu_0 n} \cdot \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d^2},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Найденное значение округляется до ближайшего четного числа.

8. Делаем проверку размещения обмотки в два слоя

Рассчитывается минимальная и максимальная длины одного слоя обмотки: $a_{min} = 1,05w_1d_{из}$

и $a_{max} = 2w_1d_{из}$.

После чего проверяется выполнение условия $a_{min} \leq a \leq a_{max}$.

Если это условие не выполняется, то производится следующее:

увеличивается длина соленоида a ;

обмотку катушки наматывают не в два, а в четыре слоя;

увеличивается диаметр витка d .

В последнем случае потребуется вернуться к пункту 5.

9. Проводим расчет длины обмоточного провода.

Длина провода определяется по формуле: $l_M = \pi d n w_1$.

10. Определяем массу меди обмоточного провода.

$m = \gamma_M l_M s_M$, где $\gamma_M = 8900$ кг/м³ – плотность меди.

11. Определяем индуктивность секционированной катушки.

Для расчета применяется следующий порядок.

11.1. Индуктивность L_0 одной, изолированной от других, секции катушки находится как индуктивность соленоида с использованием эллиптических интегралов $K(k)$ и $E(k)$ [5]:

$$L_0 = \frac{\mu_0 w_1^2 d}{4\pi} \Phi, \Phi(\alpha_d) = \frac{4\pi}{3} \left(\sqrt{\alpha_d^2 + 1} \left(K(k) + \frac{1 - \alpha_d^2}{\alpha_d^2} E(k) \right) - \frac{1}{\alpha_d^2} \right), k = \frac{1}{\sqrt{\alpha_d^2 + 1}}. \quad (1)$$

11.2. Расчет расстояния между секциями катушки: $b = \frac{\pi D}{n} - a$.

11.3. Определение индуктивности одной секции катушки с учетом ее взаимной индуктивности с соседними секциями.

Предположив, что рассматриваемая секция и соседние с ней являются коаксиальными соленоидами, а относительные значения длины соленоидов α_d и расстояний между соседними соленоидами β_d находятся в рекомендованных диапазонах, пренебрегаем кривизной осевой линии катушки. Тогда достаточно учитывать взаимные индуктивности рассматриваемой секции только с четырьмя другими. Две из них расположены с двух сторон через промежуток $b_1 = b$. Им соответствует взаимная индуктивность M_1 . Две другие учитываемые секции также расположены с двух сторон, но через одну секцию. Промежуток между каждой из них и рассматриваемой секцией равен $b_2 = 2b + a$. Им соответствует взаимная индуктивность M_2 .

Указанные взаимные индуктивности M_1 и M_2 рассчитываются по формулам, соответствующим теореме о четырех прямоугольниках [5]. Для того, чтобы определить M_1 сначала по формуле (1) находятся индуктивности трех фиктивных катушек: L_{b_1} , L_{ab_1} и L_{ab_1a} , имеющих относительную длину: b_1/d , $(a + b_1)/d$, $(2a + b_1)/d$. Так как у всех этих катушек одинаковая линейная плотность намотки витков, числа витков этих катушек соответственно равны: $w_1 b_1/a$, $w_1 (a + b_1)/a$, $w_1 (2a + b_1)/a$. После этого рассчитывается взаимная индуктивность:

$$M_1 = \frac{1}{2} (L_{ab_1a} + L_{b_1} - 2L_{ab_1}). \quad (2)$$

Аналогичным образом по формулам (1) и (2) рассчитываются индуктивности трех других катушек, имеющих относительную длину b_2/d , $(a + b_2)/d$, $(2a + b_2)/d$, и взаимная индуктивность M_2 .

Индуктивность всей катушки, состоящей из n секций, равна:

$$L = n(L_0 + 2M_1 + 2M_2)k_t, \quad k_t = \frac{2\alpha_{d\Sigma}}{\alpha_{d\Sigma} + \sqrt{\alpha_{d\Sigma}^2 - \pi^2}}, \quad \alpha_{d\Sigma} = \pi D/d. \quad (3)$$

В формуле (3) коэффициент k_t учитывает кривизну осевой линии тороидальной катушки.

12. Определяем значения сопротивлений катушки.

Находится индуктивное сопротивление катушки: $X = 2\pi f L$.

Удельное сопротивление медного провода при заданной температуре T ее нагрева находится по формуле [4]:

$$\rho_m = \rho_{m0} (1 + 0,0043 (T - T_0)), \quad (4)$$

где $T_0 = 20^\circ\text{C}$, а удельное сопротивление отожженной стандартной меди при этой температуре $\rho_{m0} = 0,01724 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Рассчитывается активное сопротивление катушки: $R = \frac{\rho_m \cdot l_m}{S_m}$.

В завершение расчета параметров катушки определяется ее полное сопротивление: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

-
1. Патент RU 2396661. Измерительное устройство дифференциальной токовой защиты шин / Кувшинов, Г.Е., Мясоедов, Ю.В., Нагорных (Зинкеева), А.С., Богодайко, И.А. // Бюл. 2010. – № 22.
 2. Богодайко, И.А., Кувшинов, Г.Е. Индуктивность секционированного тороида с каркасом кругового сечения// Сборник трудов V Всероссийской конференции с международным участием «Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». – Благовещенск: АмГУ, 2008. – С. 359-362.
 3. Электротехнический справочник: В 3-х т. – Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. профессоров МЭИ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.
 4. Электротехнический справочник: В 3-х т. – Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. профессоров МЭИ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
 5. Калантаров, Г.А., Цейтлин, Л.А. Расчет индуктивностей: Справочник. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.