

Магнитное поле тороидального магнитопровода и конструкция прецизионного трансформатора отношения напряжений

Ю. П. Семенов

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева

Y.P.Semenov@vniim.ru

Аннотация. Тороидальные магнитопроводы являются основой создания наиболее точных трансформаторов отношения и индуктивных делителей напряжения, применяемых в метрологических исследованиях. Равенство значений электродвижущей силы в любом витке обмоток, расположенных на магнитопроводе, определяется однородностью магнитного потока по его длине. Одним из источников неоднородности потока является внешнее поле (поле рассеяния) тороидального ленточного магнитопровода. Предложена модель трансформатора отношения напряжений, в которой применены магнитные экраны простой и легко реализуемой формы.

Ключевые слова: магнитопровод, трансформатор отношения

I. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее точные измерения эталонов импеданса выполняются с применением средств измерений на основе трансформаторов отношения (ТО) напряжений.

В правильно сконструированном ТО отношение напряжений на его выходе численно равно отношению числа витков соответствующих обмоток и не зависит от времени и изменения окружающих условий (температуры, давления, влажности и т. д.). Точность порядка 10⁻⁸ может быть достигнута только в том случае, когда (1) единый магнитный поток пронизывает все витки обмоток и (2) магнитный поток, созданный током в любой обмотке, полностью пронизывает все другие обмотки.

В реальном ТО повышение точности достигается выбором материала магнитопровода (МП), схемы и конструкции.

Далее приведены результаты исследований причин различия магнитного потока в различных сечениях по длине МП и способов повышения его однородности.

II. ОДНОРОДНОСТЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Точность отношения напряжений определяется равенством значения ЭДС в каждом из витков всех обмоток, расположенных на МП, при отсутствии в них токов нагрузки. Это означает, что магнитный поток должен быть одинаковым в любом радиальном сечении магнитопровода.

В прецизионных ТО преимущественно применяются МП тороидальной формы, образованные навивкой (подобно плотно сжатой часовой пружине) тонкой ленты из материала с большой магнитной проницаемостью μ – пермаллоя, аморфных или нанокристаллических

сплавов, – относительное значение μ которых может достигать сотни тысяч единиц (применение пермаллоя в прецизионных ТО ограничено вследствие деградации его магнитных свойств под воздействием механических напряжений).

Ленту из аморфных и нанокристаллических сплавов толщиной (15 – 30) мкм получают методом литья в режиме сверхбыстрого охлаждения (до 10⁶ градусов в секунду). Магнитные свойства ленты не зависят от механических напряжений, но лента получается хрупкой, поэтому МП из нее защищают пропиткой клеем или размещением в прочных корпусах.

Модели, обычно применяемые для анализа свойств ТО, соответствуют следующему представлению о его работе: «Магнитный поток Φ в сердечнике создается током, поступающим по проводникам, соединяющим первичную обмотку с источником, и протекающим по виткам первичной обмотки. Электродвижущая сила (ЭДС) e на вывод вторичной обмотки возникает при изменении Φ в соответствии с законом электромагнитной индукции

$$e = - d\Phi/dt$$

В этой модели неоднородность магнитного потока Φ может возникнуть: (1) из-за неоднородного распределения магнитодвижущей силы (МДС) вследствие неравномерного распределения витков намагничивающей обмотки; (2) из-за неоднородности магнитных свойств (μ_r) МП по длине пути потока вследствие (а) неравномерности намотки ленты и (б) различия значения μ по длине ленты.

Идеально однородное распределение МДС может быть достигнуто только применением обмотки в форме слоя тока, покрывающего всю поверхность МП за исключением узких зазоров, разделяющих витки. Такая обмотка не создает магнитное поле вне объема, охватываемого слоем тока. Наилучшим практически реализуемым приближением является намагничивающая обмотка, витки которой равномерно распределены на наружных поверхностях МП и полностью заполняют внутреннюю цилиндрическую поверхность МП.

На наружных поверхностях МП остаются зазоры между витками, которые могут быть источниками неоднородности поля вследствие неполной взаимной компенсации магнитных полей рассеяния рядом расположенных витков. Наибольшую ширину зазоры достигают на внешней цилиндрической поверхности МП (например, при отношении наружного (D) и внутреннего (d) диаметров тороида $D/d = 1,5$ общая ширина зазоров

составляет 30 %). Источником неоднородности поля может быть смещение положения витков в пределах зазоров между ними.

Локальные неоднородности магнитных свойств (μ_T) МП по длине пути потока Φ , вне зависимости от их источников, можно представить единой моделью вследствие статистического усреднения из-за большого числа слоев ленты в сечении МП (до 400 слоев при $(D - d) > 10$ мм).

Модель тороидального МП можно представить в виде совокупности тонкостенных цилиндрических оболочек, расположенной соосно и плотно прилегающих друг к другу [1]. Толщина оболочки равна сумме толщины ленты h и толщины зазора между соседними витками ленты δ , диаметр i -ой оболочки D_i находится в пределах от d до D .

На рис. 1 представлена развертка сечения оболочки длиной $\pi D_{cp} = \pi(D - d)/2$.

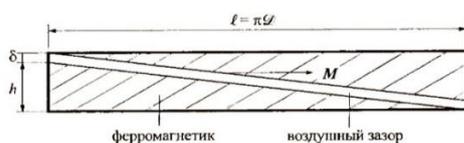


Рис. 1. Схематическое изображение развертки сечения одной цилиндрической оболочки из состава модели ленточного магнитопровода

Соотношение между значениями μ и μ_T имеет вид [1]:

$$\mu_T = \mu \cdot [1 + (\mu - 1)(1 - k_3)h^2 (k_3 \cdot \pi^2 \cdot D^2)^{-1}], \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент заполнения объема МП магнитным материалом.

При толщине ленты 25 мкм $k_3 = 0,7$, и из (1) следует, что при $D > 20$ мм и $\mu > 5 \times 10^4$ можно пренебречь влиянием зазора на значение μ_T без внесения погрешности более, чем 0,01 %. Тем более, можно пренебречь влиянием локальных изменений h и μ на однородности характеристик МП.

В исследованиях [2] установлен еще один источник неоднородности поля МП-выход магнитного потока на концах ленты МП в соответствии с рис. 2. Принятая модель предполагает, что магнитный поток в МП перемещается вдоль ленты МП от ее начала до конца. Оценка энергетических соотношений показывает, что вызванная этим источником неоднородность потока в МП не может превышать 0,01 %).

Исследования [3], включавшие также и многократную перемотку одних и тех же МП, привели к заключению: «...единственным возможным объяснением результатов может быть только непостоянство в пределах 10 % эффективной магнитной проницаемости ($\mu_{эфф} = \mu_T$) вдоль пути магнитного потока в сердечнике», а также показали, что плотность намотки обмоток и эффективная площадь поперечного сечения МП лишь незначительно влияют на неравномерность значения μ_T ($\mu_{эфф}$).

Возможной причиной расхождения результатов исследований [2, 3, 4 и др.] является представление о том, что магнитный поток, меняющийся во времени, но локализованный в объеме МП, обеспечивает процесс

передачи энергии из первичной обмотки во вторичную непосредственно через материал МП.

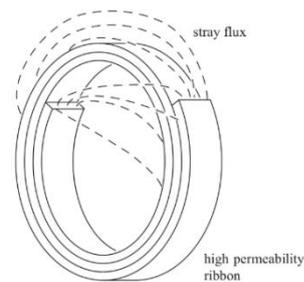


Рис. 2. Поток рассеяния на концах ленты тороидального магнитопровода

В следующем разделе, основанном на исследованиях Б.О. Брона и включающем цитирование [5], рассматривается правомерность применения такого представления о процессе создания электродвижущей силы (ЭДС) во вторичной обмотке тороидального ТО.

III. РОЛЬ МАГНИТОПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ВО ВТОРИЧНУЮ ОБМОТКУ ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрим схематически изображенный на рис. 3 МП в виде тороида с двумя обмотками – первичной с током i и разомкнутой одновитковой вторичной. Предположим, что $\mu_T \gg 1$, первичная обмотка (w_1 витков) равномерно распределена на МП, линии магнитного поля H являются окружностями.

Изменение магнитного поля в МП должно вызывать появление электрического поля, вектор напряженности которого E перпендикулярен силовым линиям H . Интеграл от H вдоль окружности l_1 (между поверхностью МП и первичной обмоткой) в соответствии с законом полного тока равен $2\pi H = w_1 i$.

Такие же интегралы вдоль окружностей, проведенных в пространстве между первичной и вторичной обмотками (l_3) и снаружи первичной обмотки (l_4) равны нулю, что означает отсутствие магнитного поля в «окне» МП, и в пространстве вне МП, то есть переменный магнитный поток локализован внутри МП. Направлении вектора Пойнтинга S в любой точке окружности l_2 показывает, что энергия для создания этого потока поступает через внутреннюю поверхность первичной обмотки, а в «окне» МП магнитного поля. Но тогда нет и сопряженного с ним электрического поля, и, следовательно, нет переноса энергии ко вторичной обмотке.

Если во вторичной обмотке протекает ток, то возникает магнитный поток реакции, направленный противоположно магнитному полю в МП. Тогда направления векторов H и E таковы, что направление вектора Пойнтинга S указывает на то, что вся энергия поступает во вторичную обмотку с той части первичной обмотки, которая расположена в пределах «окна» МП.

Это означает, что при наличии тока во вторичной обмотке: (1) энергия электромагнитного поля поступает во вторичную обмотку только на участке внутри «окна» МП; (2) эта энергия передается с соответствующей наружной поверхности первичной обмотки; (3) энергия обусловлена электромагнитным полем в пространстве «окна» МП.

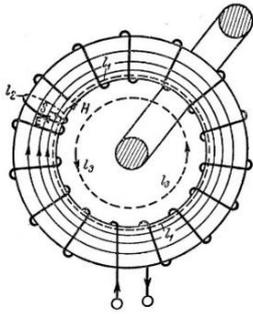


Рис. 3. Трансформатор с тороидальным сердечником МП. Таким образом, можно установить, что при наличии тока во вторичной обмотке

В отсутствие тока во вторичной обмотке, рассматриваемое представление о магнитном потоке, локализованном в объеме МП, появление ЭДС на выводах вторичной обмотки объяснить не может.

Полностью процесс передачи энергии в тороидальном ТО может быть объяснен только методами релятивистской электродинамики, основанными на уравнениях Максвелла. В данном контексте достаточно напомнить лишь некоторые положения о движении электромагнитного (ЭМ) поля и взаимосвязи электрической и магнитной составляющих.

О перемещении (движении) ЭМ поля в пространстве (также как и о перемещении материальных тел) можно судить по перемещению массы и энергии [5]. В однородной среде перемещение составляющих ЭМ поля происходит с постоянной скоростью v , характерной для данной среды, то есть в данной среде скорость перемещения поля может принимать только два значения – u или ноль.

Перемещения ЭМ поля можно характеризовать огибающей вектора Пойнтинга S , отражающего плотность потока энергии и массы поля, проходящего через единицу площади перпендикулярной к нему поверхности. Вектор Пойнтинга применяется для установления направления переноса энергии и формы областей, в которых происходит наиболее интенсивный перенос, например, в анализе работы длинных линий, электрических машин и т.п. [6]. При рассмотрении работы трансформаторов различной конструкции показано, что перенос энергии из первичной обмотки осуществляется потоками ЭМ энергии, исходящими с ее поверхностей. Поток, направленный ко вторичным обмоткам, создает в них разность электрических потенциалов, а поток, направленный к МП, возбуждает магнитное поле в МП [5]. При отсутствии электрической составляющей поля магнитный поток не может переносить энергию.

Фронт ЭМ волны перемещается в пространстве вдоль проводов от источника до выводов вторичной обмотки ТО, со скоростью близкой к скорости света по «траектории», которая включает МП и его «окно». Магнитное поле в МП является формой преобразования ЭМ поля, которая осуществляет накопление энергии и массы ЭМ поля в объеме МП. Наиболее интенсивный перенос энергии ЭМ поля происходит в области «окна», то есть можно предположить, что ЭДС в витках вторичной обмотки тороидального ТО создается преимущественно в этой области, а источником поля

рассеяния являются процессы, связанные с проникновением в МП фронта ЭМ поля.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ ТОРОИДАЛЬНЫХ МАГНИТОПРОВОДОВ

Проникновение ЭМ поля через поверхность МП можно представить с помощью модели рис. 1, но с учетом перемещения фронта ЭМ волны перпендикулярно к оси МП, то есть вертикально на рис. 1.

При переходе ЭМ поля через границу двух сред – магнитного материала МП и воздуха в зазоре ($\mu = 1$) – возникают две составляющие магнитного поля, угол между направлениями которых практически равен 90° вследствие того, что $\mu \gg 1$. Одна составляющая направлена вдоль ленты, другая – и под прямым углом к ее поверхности 90° . Это означает, что через цилиндрические поверхности ленточно-тороидального МП должен выходить магнитный поток.

Для проверки этого явления выполнены исследования внешнего магнитного поля тороидальных МП в соответствии с методом, описанным в [7]. В исследованиях использованы МП из аморфного и нанокристаллического сплавов с размерами $60 \times 40 \times 30$ мм.

На каждый МП равномерно нанесена астатическая обмотка 100 витков, соединенная с источником сигнала 1,6 кГц – генератором DS345. Внешнее магнитное поле МП оценивалось по результатам измерения ЭДС, наводимой в пробной катушке, посредством цифрового синхронного усилителя Saluki 1022D, синхронизируемого источником сигнала. Экранированная пробная катушка (200 витков) имеет форму плоского соленоида. Ее позиционирование относительно МП осуществляется вручную в каждой точке и фиксируется после регулирования положения ее оси с целью достижения максимальный уровень сигнал в данной точке. Предварительно калибровка позволила сопоставлять результаты измерений, выполненных с использованием различных пробных катушек.

Все измерения привели к качественно одинаковым результатам вне зависимости от типа магнитного сплава, числа витков обмотки и размеров пробной катушки. Типичная картина распределения внешнего магнитного поля, представленная на рис. 4 линиями равной плотности магнитного потока, показывает, что:

- снаружи тороидального МП существует магнитный поток, соединяющий его внутреннюю и наружную цилиндрические поверхности;
- этот магнитный поток разделен на две части, расположенные симметрично относительно плоскости перпендикулярной оси МП и находящейся на середине его высоты;
- максимальная плотность нормальной (по отношению к цилиндрической поверхности) составляющей магнитного потока достигается на цилиндрических поверхностях МП посередине его высоты.

При общем типовом характере распределения поля для большинства исследованных МП в ряде случаев

наблюдалось локальное смещение линии раздела «верхней» и «нижней» частей потока в различных аксиальных сечениях МП. Эти смещения нельзя объяснить близостью конца или начала ленты МП, поскольку они наблюдались только у части МП, а не у всех.

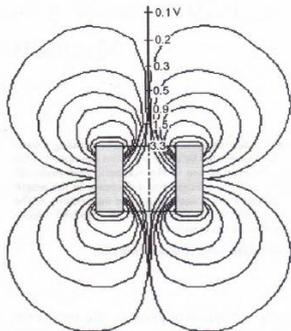


Рис. 4. Распределение магнитного поля рассеяния тороидального магнитопровода с астатической обмоткой

При круговом обходе наружной цилиндрической поверхности МП наблюдались локальные области (размерами от 1 до 10 мм), в которых плотности потока возрастала в 3–5 раз. Это явление можно рассматривать как местное изменение значения μ_t вдоль пути магнитного потока в МП, которое не может быть объяснено свойствами обмоток.

В целом, результаты исследований подтвердили существование магнитного потока между цилиндрическими поверхностями тороидальных МП, обусловленного процессом прохождения ЭМ поля через слоистую структуру МП.

V. КОНСТРУКЦИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТНОШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Исследования показали, что пространство «окна» МП является областью наиболее интенсивного преобразования энергии ЭМ поля в магнитный поток в МП и в ЭДС во вторичных обмотках. Также показана неизбежность потока рассеяния между цилиндрическими поверхностями тороидального МП. Из картины поля рис. 4 следует, что центральная осевая область «окна» тороидального МП является пространством с наименьшей радиальной составляющей напряженностью потока рассеяния.

Это означает, что при конструировании прецизионных ТО следует стремиться (1) сокращать длину провода обмотки в областях вне «окна» МП; (2) развить длину области «окна»; (3) располагать провода обмоток отношения в канале вдоль оси области «окна, снабженном» магнитным экраном.

Наилучшей практической реализацией пункта (1) этой концепции является конструкция ТО, предложенная в [4]. Магнитная система этого трансформатора образована двумя наборами МП, каждый из которых состоит из нескольких тороидальных МП с первичными обмотками, установленных соосно. Оба набора МП расположены параллельно вплотную друг к другу, а вторичная обмотка продета сквозь «окна» наборных МП, как это показано на рис. 5. Первичные обмотки всех МП электрически соединены параллельно.

Такая конструкция позволяет существенно повысить отношение активной (внутри области «окна») длины витка вторичной обмотки к его полной длине по сравнению с трансформаторами традиционной формы.

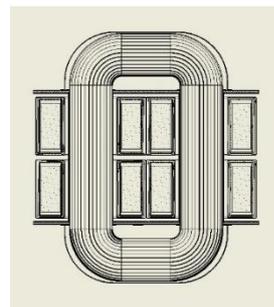


Рис. 5. Магнитная система трансформатора

Увеличение ЭДС во вторичной обмотке может быть достигнуто увеличением числа МП в наборе, а не числа витков. При одинаковой общей массе сердечников применение нескольких небольших сердечников вместо одного большого позволяет увеличить суммарный магнитный поток, то есть увеличить значение ЭДС на виток вторичной обмотки.

В прецизионных ТО вторичная обмотка из проводов большого диаметра, изображенная на рис. 5, должна быть заменена обмоткой из тонких проводов, проходящих через трубчатый магнитный экран малого диаметра, расположенный в центре «окна» наборного МП. Малый диаметр экрана повышает его эффективность и способствует повышению однородности поля в области наиболее интенсивного преобразования энергии ЭМ поля в ЭДС обмотки отношения.

Возможность использования тонкого провода для обмоток отношения в прецизионных ТО обеспечивается их работой в режиме холостого хода посредством применения схемы двухступенчатого ТО или цепей компенсации нагрузки. В этом режиме сопротивление обмоток отношения не влияет на точность отношения напряжений.

Примеры реализации двухступенчатого ТО на основе магнитной системы рис. 5 будут предметом в отдельной публикации. В качестве примера реализации магнитного экрана на рис. 6 представлена фотография деталей прецизионного ТО квадратного моста. Внизу справа показан медный экран с расположенным внутри МП с первичной обмоткой. Ожидаемая погрешность отношения напряжений этого ТО не превышает $5 \cdot 10^{-8}$.



Рис. 6. Магнитный экран ТО

VI. ВЫВОДЫ

Показано, что основным (и неизбежным) источником внешнего поля ленточных тороидальных трансформаторов отношения напряжений является процесс распространения электромагнитного поля в слоистой среде магнитопроводов.

Предложены изменения конструкции тороидальных трансформаторов, направленные на снижение погрешности отношения, обусловленные этим источником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. «Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов». Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 384 с.
- [2] Rayner G.H. Flux pattern of spiral tape cores. *Journal of Scientific Instruments (Journal of Physics E)*, vol 1, Number 7, p. 780, 196.
- [3] W.J.M. Moor and P.N. Milianic. *The Current Comparator*. 1988, Peter Peregrinus Ltd, 120 p.
- [4] Гурьянов В.С. Точные трансформаторы отношения // Исследования в области электрических измерений: сб. научных трудов / под ред. Е.Д. Колтика. Ленинград: Энергоатомиздат (ЛО), 1989, стр. 50-55.
- [5] Брон О.Б., Тартаковский Ж.Э. *Электромагнитное поле как вид материи*. Москва: Госэнергоиздат, 1962 г., 260 с.
- [6] Говорков В.А. *Электрические и магнитные поля* / изд. 3-е, Москва: Энергия, 1968 г., 488 с.
- [7] Rae Duk Lee, Han Jun Kim and Yu. P. Semenov. Precise Ratio Transformer: A New Concept of the Magnetic System // *IEEE Transaction on Instrum. and Meas.*, vol. 52, No. 2, April 2003, pp. 384–387.