

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, Э. Л. КАЩЕЕВ, Н. Ф. ШМОЙЛОВ
(Новосибирск)

О КОНСТРУИРОВАНИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С МИНИМАЛЬНЫМ АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ОБМОТКИ ДЛЯ МОСТОВЫХ ЦЕПЕЙ

При конструировании мостовых цепей с тесной индуктивной связью в качестве плечевых элементов широко применяются тороидальные трансформаторы. Используя волновую тороидальную обмотку, можно создавать плечевые отношения от 1 : 1 до 100 : 1 (1 : 100) с очень высокой точностью [1].

Как показано в [2], для того, чтобы отношение напряжений индуктивного делителя, образующего плечи моста, равнялось отношению чисел витков обмоток, необходимо, чтобы отношение активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния обмоток равнялось отношению чисел витков. В ряде случаев, помимо этого общего требования, следует стремиться к тому, чтобы активные сопротивления обмоток были бы возможно меньше.

В [3] сделан вывод о том, что, чем меньше активное сопротивление обмотки, тем меньше сказывается шунтирование плеча паразитными проводимостями на точности отношения плеч.

В [4] показано, что для получения постоянной и высокой чувствительности в широком диапазоне изменения плеч необходимо уменьшить активные сопротивления обмоток.

Для обеспечения выбранного режима измерительной цепи и получения необходимой чувствительности трансформатор должен обладать некоторой заданной индуктивностью. Таким образом, необходимо сконструировать трансформатор, обмотки которого при заданной индуктивности обладают минимальным активным сопротивлением.

Имеющиеся работы по оптимальному конструированию тороидальных катушек не решают этой задачи, так как авторы их исходят из иных предпосылок [5—7].

В настоящей статье предлагается методика конструктивного расчета тороидальных обмоток, обеспечивающая получение минимального активного сопротивления при заданной индуктивности. Рассмотрим однослойную обмотку, выполненную из провода круглого сечения до полного заполнения тороидального сердечника.

Выражение для индуктивности такой обмотки без учета магнитной проницаемости сердечника имеет вид

$$L = 2h n^2 \ln \frac{D_1}{D_2}. \quad (1)$$

Как видно из рис. 1, а, длина всей обмотки, состоящей из n витков, составляет

$$l = (2h + D_1 - D_2 + 4d)n. \quad (2)$$

Активное сопротивление обмотки без учета удельного сопротивления материала равно

$$R = \frac{4n(2h + D_1 - D_2 + 4d)}{\pi d^2}. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, б, условие плотной намотки выражается следующей зависимостью:

$$\pi(D_2 - d) = nd. \quad (4)$$

Получение минимального активного сопротивления при заданной индуктивности сводится к отысканию минимума функции (3) при наложении условий (1) и (4). В аналитическом виде решение этой задачи невозможно. Из качественного анализа выражений (1), (3), (4) следует, что увеличение h при постоянных диаметрах тороида D_1 и D_2 и при заданной индуктивности L дает возможность уменьшить число витков n , что, согласно (4), позволит увеличить диаметр провода. Так как в (3) n находится в числителе, а d в знаменателе и возводится в квадрат, то, несмотря на увеличение члена $2h$ в скобках, величина R при этом будет монотонно уменьшаться. Поэтому можно

рекомендовать изготавливать магнитопроводы из широкой ленты или выбирать ферритовые сердечники с большей высотой.

Как видно из (1), можно получить одну и ту же индуктивность на двух тороидах с равными высотами h , числами витков обмотки n и отношением $\frac{D_1}{D_2}$ с различными значениями D_1 и, значит, D_2 . При этом на большем тороиде обмотку можно выполнить из более толстого провода и, следовательно, получить меньшее сопротивление. Так как сопротивление обмотки зависит не от абсолютных значений D_1 и D_2 , а от их разности $D_1 - D_2$ (см. (3)), то при увеличении размеров тороида сопротивление обмотки будет монотонно уменьшаться за счет увеличения диаметра провода d , согласно (4). Это позволяет рекомендовать изготавливать магнитопроводы или выбирать ферритовые сердечники с большим наружным диаметром. Разумеется, размеры сердечника h и D_1 должны быть органичены конструктивными соображениями.

Задавшись большими размерами тороида h и D_1 , мы можем получить активное сопротивление заведомо меньшим, чем на тороиде меньших размеров. Однако это еще не будет минимальным значением R . Для его нахождения рассмотрим (3) в предположении, что h и D_1 постоянны. Теперь $R=f(n, d, D_2)$ и по-прежнему налагаются условия (1) и (4). Исследование этой функции на минимум позволит найти такие соотношения между n , d и D_2 , которые при заданной индуктивности и выбранных h и D_1 дадут абсолютный минимум активного сопротивления. Для того, чтобы в (3) учесть уравнения связей (1) и (4), выразим из (1)

$$D_2 = D_1 e^{-\frac{L}{2hn^2}}, \quad (5)$$

а из (4) с учетом (5) —

$$d = \frac{\pi D_1 e^{-\frac{L}{2hn^2}}}{n + \pi}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (3), после преобразований найдем

$$R = \frac{4}{\pi^3 D_1^2} n(n + \pi) e^{\frac{L}{2hn^2}} [(2h + D_1)(n + \pi) e^{\frac{L}{2hn^2}} - D_1(n + \pi) + 4\pi D_1]. \quad (7)$$

Таким образом, мы получили зависимость R только от одной переменной n .

Выражение (7) исследуем на экстремум. Находя производную $\frac{\partial R}{\partial n}$ и приравняв ее нулю, после преобразований получаем

$$(2q + 1) e^{\frac{p}{2n^2}} = \frac{3n^4 - 4\pi n^3 - (p + 3\pi^2)n^2 + 2\pi pn + 3\pi^2 p}{3n^4 + 4\pi n^3 - (2p - \pi^2)n^2 - 4\pi pn - 2\pi^2 p}, \quad (8)$$

где

$$q = \frac{h}{D_1}; \quad p = \frac{L}{\pi}.$$

Это уравнение решено на ЭВМ в широком интервале изменения q и p . Результаты представлены в виде графиков (рис. 2).

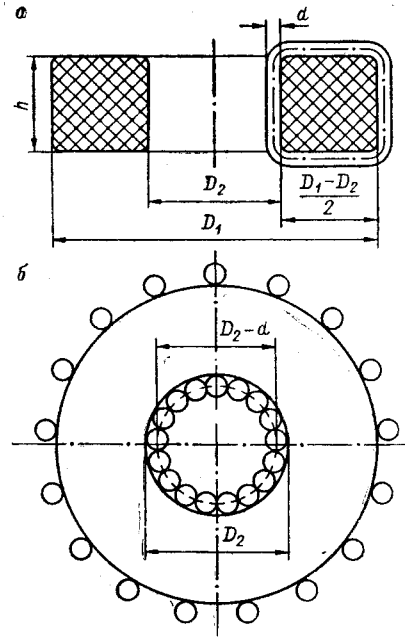


Рис. 1.

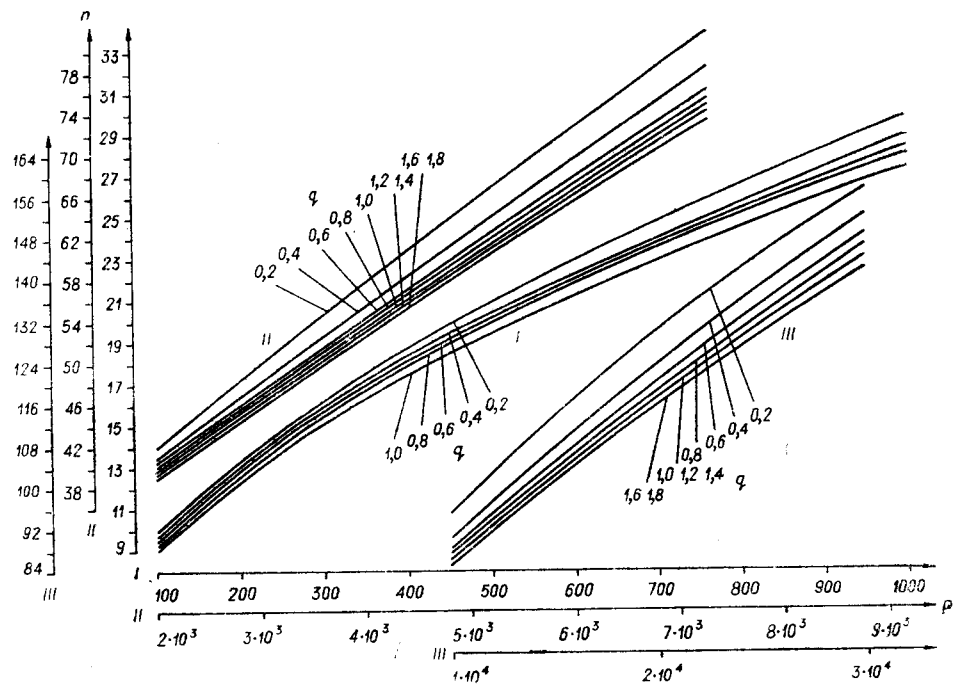


Рис. 2.

Все расчеты проводились для одиночного провода, однако полученные результаты справедливы и для жгута, состоящего из нескольких скрученных вместе жил. В этом случае под d следует понимать диаметр жгута. Расчет обмотки по минимальному активному сопротивлению позволяет определить максимальный диаметр d при минимальной длине l . Так как число жил в жгуте постоянно, то в жгуте максимального диаметра можно получить и максимальные диаметры образующих его жил. Так как n — число витков жгута, то при последовательном соединении жил количество витков рабочей обмотки трансформатора будет определяться соотношением

$$N = nk, \quad (9)$$

где k — число жил, образующих рабочую обмотку.

На основании проведенного анализа предлагается следующая методика расчета обмоток трансформатора по минимальному сопротивлению при заданной индуктивности.

1. В результате расчета определяется величина необходимой индуктивности $L_{обм}$. Устанавливается необходимое число секций рабочей обмотки k (жил в жгуте). Выбирается материал сердечника с магнитной проницаемостью μ_r .

2. Определяется индуктивность одной секции (жилы) без учета магнитной проницаемости сердечника

$$L = \frac{L_{обм}}{\mu k^2}.$$

3. Выбираются возможно большие (из конструктивных соображений) внешние размеры тороидального сердечника h и D_1 .

4. Вычисляются параметры

$$p = \frac{L}{h} \text{ и } q = \frac{h}{D_1}.$$

5. Для полученных значений p и q по графикам рис. 2 определяется оптимальное число витков жгута n (с точностью до десятых долей), что требуется для дальнейших вычислений.

$$\left(1 + \frac{1}{\sin \frac{180}{m}}\right)$$

где m — общее число жил в жгуте.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Грохольский. Способ изготовления трансформаторов с распределенными параметрами. Авторское свидетельство № 164892. Бюллетень изобретений, 1964, № 17.
2. C. W. Oatley, I. G. Yates. Bridges with Coupled Inductive Ratio Arms as Precision Instruments for the Comparison of Laboratory Standards of Resistance or Capacitance.— Proc. IEE, 1954, v. 101, P. III, p. 91.
3. А. Л. Грохольский. К вопросу о погрешности моста с индуктивно связанными плечами при шунтировании их сопротивлениями.— Электрические методы автоматического контроля. Труды ИАЭ СО АН СССР, вып. 5. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
4. К. М. Соболевский. Некоторые вопросы защиты мостов переменного тока от влияния паразитных связей. Автореф. канд. дисс. Львов, ЛПИ, 1956.
5. W. Deutschmann. Über die günstigen Ausmaße von Pupinspulenkerne.— Telegraphen und Fernsprech-Technik, 1931, Bd. 6, S. 171.
6. G. Reber. Optimum Design of Toroidal Inductances.— Proc. IRE, 1935, v. 23, p. 1056.
7. Л. И. Рабкин, Э. И. Новикова. Расчет кольцевых катушек с ферритовым сердечником, работающих в области звуковых частот.— Радиотехника и электроника, 1957, т. II, № 6.
8. Инженерно-технический справочник по электросвязи. Кабельные и воздушные линии связи. М., Связьиздат, 1961.

*Поступило в редакцию
30 марта 1966 г.*