



УДК 621.313

Д. С. Баранов, К. К. Никитин
АО «Концерн „Океанприбор“»

С. А. Гордеев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Простейшие рекомендации инженеру по расчету дросселей и трансформаторов

Представлен алгоритм разработки и оптимизации современных электромагнитных компонентов (дросселей и трансформаторов) радиотехнических схем. Проектирование происходит с элементами оптимизации по ряду различных критериев и максимально приближенно к практике разработки этих компонентов. Рассматривается расчет трансформатора напряжения и производится его энергетический расчет, также выполнен расчет магнитной системы дросселя. По энергетическому расчету трансформатора приводится ряд значительных замечаний, на которые стоит обратить внимание инженеру-разработчику при проектировании электромагнитных элементов. Показана возможность проектирования и разработки электромагнитных компонентов (дросселей и трансформаторов) для реальных устройств с минимально возможной долей ошибки. Алгоритм разработки, представленный в статье, применим в первую очередь в разработке электромагнитных компонентов для современных радиотехнических устройств, так как эти устройства предъявляют ряд дополнительных требований.

Электромагнитные элементы, дроссель, трансформатор, электромагнитные материалы

Электромагнитные элементы (ЭМЭ) – важнейшие составляющие радиотехнических схем. Тем не менее, многие специалисты испытывают трудности при проектировании устройств с ЭМЭ. Это вызвано рядом причин, например тем, что подходящий полупроводниковый элемент, резистор или конденсатор можно приобрести готовым, а ЭМЭ, как правило, нельзя. Литература по ЭМЭ скудна либо сильно устарела [1]–[4], что дополнительно усложняет ситуацию.

В последние десятилетия идет активное развитие отраслей, где к использованию ЭМЭ предъявляется ряд дополнительных требований, например требование широкополосности, линейности, минимизации потерь, габаритов.

В этих условиях может оказаться востребованной публикация, дающая разработчику простой и понятный, хорошо объясненный алгоритм проектирования дросселей и трансформаторов, пригодный для случаев, изложенных в предыдущем абзаце. Изложение будет вестись последовательно, однако нередко придется возвращаться к

моментам, подробное рассмотрение которых в один этап затруднительно.

Расчет дросселя. Как расчет дросселя, так и расчет трансформатора, удобнее описать, введя ряд исходных ограничений. Попытка рассмотреть проблему расчета «в целом» может не только оказаться затруднительной, но и привести к тому, что главное скроется за рядом подробностей. Поэтому введем следующие ограничения, часть из которых будет снята впоследствии:

– Будем рассматривать исключительно дроссели, выполненные на замкнутом магнитопроводе из ферромагнитного материала.

– Будем считать, что опыта и совместной квалификации разработчика узла, содержащего рассчитываемый дроссель, и разработчика дросселя окажется достаточно для верного исходного определения примерных габаритов дросселя.

Расчет магнитной системы дросселя. Этот расчет должен быть начат выбором магнитопровода, соответствующего:

– выбранному габариту дросселя в целом;
 – требованиям, определенным задачами, которые будет решать дроссель. Эти задачи будут рассмотрены далее.

В результате выбора становятся известными объем магнитного материала $V = lS$, а также площадь сечения магнитопровода S и средняя длина магнитной линии l . В этих условиях типичная задача расчета магнитной системы дросселя (МСД) может быть сформулирована следующим образом.

Требуется рассчитать МСД, предназначенного работать на токе i (не более), имеющего индуктивность L . При этом индукция магнитного поля в магнитопроводе не должна превышать величину B .

Сформулировав задачу, сделаем важные замечания:

– ток i считаем постоянным, хотя он может быть переменным. Тогда в качестве i принимается амплитудное значение;

– в данном примере ограничиваемся рассмотрением работы дросселя в цепи протекающего заданного тока. Такой случай реализуется, например, при работе дросселя в составе ФНЧ в полосе его пропускания: ток дросселя в этой полосе определяется приложенным к ФНЧ напряжением и сопротивлением нагрузки фильтра и практически не зависит от величины дросселя;

– вслед за расчетом магнитной системы должен последовать расчет собственно дросселя, при этом придется рассчитать и учесть потери в его обмотке, а при работе не на постоянном токе – еще и потери в магнитопроводе. Приступим к простейшему расчету МСД. Напряженность поля внутри обмотки известна [5]:

$$H = \frac{iW}{l}.$$

При этом индукция

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{iW}{l}, \quad (1)$$

где W – число витков; μ – относительная магнитная проницаемость магнитопровода; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная в системе СИ.

Физический смысл (1) понятен: чем больше ток и удельное сопротивление на единицу длины магнитопровода число витков, тем больше индукция.

Потокоцепление по определению описывается зависимостью

$$\psi = BSW = \mu\mu_0 \frac{iSW^2}{l}. \quad (2)$$

Обратим внимание на дополнительный множитель W в (2): потокоцепление создается каждым витком (всеми витками). По определению

$$L = \frac{\partial \psi}{\partial i}, \text{ отсюда имеем}$$

$$L = \mu\mu_0 \frac{SW^2}{l}. \quad (3)$$

Анализ (3) не затруднит даже начинающего специалиста. Анализируя одновременно (1) и (3), легко получим:

$$W = \frac{iL}{SB}, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{VB^2}{\mu_0 Li^2}. \quad (5)$$

Зависимости (4) и (5) имеют глубокий физический смысл, однако стоит обратить внимание на самое главное. Решая задачу расчета магнитной системы дросселя в принятой постановке, следует хорошо осознавать следующее:

а) достижение заданной величины индуктивности дросселя L возможно при различном выборе магнитной проницаемости μ и числа витков W . При использовании магнитных материалов с меньшей проницаемостью придется увеличить число витков W ;

б) согласно (4) и (5) при заданных входных V , L , i , чем большая величина B может быть допущена, тем большую проницаемость магнитопровода μ можно использовать. Иными словами, если требуется создать магнитную систему, минимизируя B , то придется использовать магнитные материалы с меньшими проницаемостями μ и наматывать большее количество витков W ;

в) из всех комбинаций μ_i , W_i только одна (4) и (5) обеспечивает при прочих заданных не превышение индукции B при токе i дросселя с индуктивностью L .

Надо сказать, что замечания а–в недостаточно известны в широком кругу разработчиков ЭМЭ.

Рассмотренная постановка задачи – наиболее частая, но далеко не единственная в практике разработчиков. Так, нередко в распоряжении разработчика имеются лишь магнитопроводы с заданной проницаемостью μ .

Тогда из (5) имеем:

$$V = \mu\mu_0 \frac{Li^2}{B^2}.$$

Зависимость (4) для W сохраняется.

И, наконец, самый редкий и экзотический случай реализуется, если задано число витков W . Такое происходит, например, когда ферритовые кольца надеваются на провод для создания помехозащищенной индуктивности – тогда $W = 1$.

В этом случае из (4)

$$S = \frac{iL}{WB}. \quad (6)$$

Соотношение (5) сохраняется, требуя задать l для нахождения V .

Далее можно перейти к анализу работы дросселя, подключенного к генератору напряжения. В этом случае ток i в (1) определяется как

$$i = \frac{U}{\omega L}. \quad (7)$$

Анализируя (6) и (7), получим:

$$W = \frac{U}{2\pi fSB}. \quad (8)$$

Произведение f, S, B в знаменателе, воспринимаемое как аббревиатура, позволяет легко запомнить важную формулу (8).

Анализ (8) позволяет сделать несколько важных и для многих неожиданных выводов:

– увеличение числа витков W в данном случае ведет к безусловному снижению индукции;

– в зависимость (8) вообще не входит величина проницаемости μ . Этот факт приводят к ряду неочевидных последствий. Так, например, если в качестве рассчитываемого дросселя выступает первичная обмотка трансформатора, то требуемое число витков не будет зависеть от примененного магнитопровода (проницаемости μ , величины немагнитного зазора [1];

– в (8) не входит величина l .

Только что рассмотренный режим работы дросселя, как и предыдущий, широко распространен.

К таким дросселям можно отнести в первую очередь:

– дроссели фильтров нижних частот вне полосы пропускания. При этом вся высокочастотная переменная составляющая входного для дросселя напряжения падает именно на нем;

– дроссели параллельной компенсации реактивности нагрузки;

– первичные обмотки трансформаторов напряжения, где в качестве дросселя выступает индуктивность L_{xx} холостого хода трансформатора.

Следует отметить, что до сих пор мы интересовались расчетом магнитной системы дросселя, что позволяет спроектировать дроссель без учета в нем тепловых потерь.

На самом деле:

– рабочий ток дросселя i , протекающий через обмотку, вызовет выделение тепла $P_M = i^2 r$, где r – сопротивление обмотки постоянному току;

– перемагничивание магнитопровода на переменном токе вызовет потери в магнитопроводе

$$P_C = P_C^0 \bar{f}^\alpha \bar{B}^\beta, \quad (9)$$

где P_C^0 – удельные потери в материале магнитопровода на частоте f_0 и индукции B_0 , $\bar{f} = f/f_0$, $\bar{B} = B/B_0$; $1 < \alpha < \beta < 3$ – эмпирические коэффициенты, как правило, публикуемые поставщиком магнитопроводов.

Зависимость (9) требует четкого регламентирования условий эксперимента, в ходе проведения которого она используется. Очень важно не только значение переменной составляющей индукции B , но и то, по какой траектории происходит ее изменение, происходит ли перемагничивание или нет.

Суммарные потери будут зависеть от многих факторов и могут оптимизироваться с учетом всего вышеизложенного. В качестве наглядного примера приведем тот факт, что в зависимостях для расчета W и μ , как правило, на переменном токе, приходится выбирать величину B не из условия ненасыщаемости материала магнитопровода, а из условия необходимости ограничения в нем потерь. Оптимизация по критерию минимизации потерь – одна из самых востребованных.

На этом рекомендации по расчету дросселя могут быть завершены, что позволяет обратиться к расчету трансформатора.

Расчет трансформатора. Предварительные замечания:

– расчет трансформатора целесообразно вести аналогично расчету дросселя, в первую очередь интересуясь выбором и расчетом магнитной системы;

– трансформатор, как и дроссель, способен к работе от генератора напряжения и от генератора тока. Однако работа трансформатора от генератора тока – гораздо менее используемый вариант, в отличие от дросселя, этот случай выходит за рамки рассматриваемого;

– в отличие от дросселя, на расчеты магнитной системы и тепловых потерь оказывают влияние различные токи: в случае дросселя это один и тот же рабочий ток, а в случае трансформатора напряжения – ток холостого хода $i_{x.x}$ для расчета магнитной системы и потерь в магнитопроводе и рабочие токи для расчета потерь в обмотках.

Трансформатор напряжения. Если трансформатор питается от генератора напряжения и пересчитывает его из первичной обмотки во вторичную в соответствии с соотношением числа витков $W_1/W_2 = U_1/U_2$, то число витков первичной обмотки, вычисляемое из условия достижения в магнитопроводе заданного значения индукции B , будет выражаться соотношением (8):

$$W_1 = \frac{U_1}{2\pi fSB}, \quad (10)$$

где U_1 – амплитуда синусоидального напряжения на входе трансформатора. При несинусоидальных формах напряжения нередко удается успешно пользоваться (11), считая U_1 амплитудой первой гармоники напряжения. Собственно, на этом расчет магнитной системы трансформатора заканчивается с учетом того, что индуктивность холостого хода [1] будет равна (3)

$$L_{x.x} = \mu\mu_0 \frac{SW_1^2}{l}.$$

Расчет индуктивности рассеивания L_S выходит за рамки данной статьи [1], однако для инженерного понимания сути этого параметра следует учесть следующее:

1. Не следует путать рассеивание с неполной магнитной связью между обмотками. Магнитная связь в основном обеспечивается магнитопроводом и, например, для стержневого трансформатора, у которого первичная обмотка расположена на одном стержне, а вторичная – на другом, может быть весьма и весьма высокой.

2. В то же время, индуктивность рассеивания L_S определяется только геометрией расположения первичной и вторичной обмоток и вообще не зависит от примененного магнитопровода. Чем идентичнее геометрически пространства, занимаемые обмотками, тем меньше L_S .

В связи с этим L_S трансформатора, как следует из предыдущего абзаца, будет высокой. Чтобы ее снизить, обычно первичную и вторичную обмотки располагают на обоих стержнях. Дальнейшее снижение L_S может быть достигнуто послойным исполнением обмоток на стержнях: слой

первичной обмотки, слой вторичной обмотки, слой первичной, слой вторичной, и т. д.

Следует отметить, что представления об индуктивности рассеивания в некоторых публикациях [5] ошибочны, а в относительно удачных изданиях [2], [4] также не приводится методик расчета L_S , в отличие от [1].

3. Индуктивность рассеивания при прочих равных растет с ростом W_1 и W_2 . Как правило, в хороших трансформаторах L_S составляет тысячные доли от $L_{x.x}$. В эквивалентной схеме трансформатора L_S располагается последовательно с нагрузкой и, будучи паразитной, составляет с сопротивлением нагрузки R_H ФНЧ 1-го порядка, ограничивающий АЧХ трансформатора на высоких частотах.

Энергетический расчет трансформатора. В основе энергетического расчета трансформатора лежат те же предпосылки, которые учитывались в расчете потерь в дросселе.

Важнейшим фактором потерь в трансформаторе выступает омическое сопротивление (r) обмоток рабочему току. Мощность потерь выражается при этом простейшей формулой

$$P_{\Pi} = i_1^2 r_1 + i_2^2 r_2,$$

где i и r – рабочие токи и сопротивления первичной и вторичной обмоток соответственно.

Так что если проектирование трансформатора идет по простейшей процедуре (выбор габарита – выбор магнитопровода (l, S) – расчет W_1), то знание всех размерений магнитопровода позволяет без труда вычислить r_1 и r_2 . В некоторых изданиях [1], [5] справедливо указано, что в случае, когда фактором, ограничивающим мощность трансформатора, выступает допустимая плотность тока в обмотках j_M , мощность трансформатора становится пропорциональной

$$P_{\text{Тр}} \sim j_M S S_{\text{ок}}, \quad (11)$$

где $S_{\text{ок}}$ – площадь так называемого окна трансформатора, в предельном случае полностью заполняемого обмотками. Для тороидального магнитопровода, например, $S_{\text{ок}} = \pi R_{\text{вн}}^2$, где $R_{\text{вн}}$ – внутренний радиус тороида.

Вторым фактором, вызывающим потери, является перемагничивание магнитопровода током холостого хода. Методика расчета потерь аналогична таковой для дросселя (9), с той лишь разницей, что дроссель, независимо от того, от какого генератора (напряжения либо тока) он питается, перемагничивается рабочим током, а трансформатор напряжения – током холостого хода.

В связи с этим отметим, что суммарные потери в трансформаторе, как правило (иногда – в равной степени), определяются обоими процессами – и рабочим, и холостого хода. При этом потерями в первичной обмотке, вызванными током холостого хода, как правило, пренебрегают.

Согласно изложенному, в том случае, если трансформатор работает на повышенных частотах и потерями в магнитопроводе пренебречь невозможно, его оптимизация по критерию достижения минимальных совокупных потерь может представить значительные трудности. Как правило, разработчики стремятся к тому, чтобы потери в проводе и магнитопроводе в условиях уже проведенной оптимизации немагнитной части отличались не радикально.

Заключительные замечания по энергетическому расчету трансформатора:

а) изложенное свидетельствует о том, что в данном приближении не существует факторов, ограничивающих мощность, «передаваемую» магнитной системой трансформатора, кроме как в смысле соблюдения зависимости (11);

б) симметрия (11) относительно S и $S_{ок}$ свидетельствует о том, что каждой конструкции трансформатора соответствует некая дуальная конструкция, где объем, занятый проводом и магнитопроводом, поменяв местами (броневая и стержневая, чашечная и тороидальная конструкции и т. д.). Согласно (11) не должно существовать за-

метной разницы в КПД и мощности трансформаторов дуальных конструкций, если только неоптимальное проектирование не приводит к неоправданному нарушению отведения тепла;

в) соотношение (11) – не единственное регламентирующее мощность трансформатора. Задаваемая максимальная плотность тока j_M является слишком общим параметром. Наиболее верен следующий подход к проектированию трансформаторов, особенно если речь идет о мощных изделиях, предназначенных для работы в диапазоне частот:

- экспертное определение габаритов изделия;
- определение габаритных параметров и выбор конфигурации и материала магнитопровода;
- экспертное определение ожидаемого КПД, обеспечивающего заданный перегрев в заданных условиях работы (мощность, скважность, охлаждение);
- расчет магнитной системы;
- выбор параметров катушки и определение потерь в проводе и магнитопроводе;
- проверка соответствия расчетного КПД ожидаемому и при необходимости внесение коррективов в ход проектирования.

Аналогичную последовательность действия с некоторыми оговорками можно рекомендовать и для дросселя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыкин Г. С. Трансформаторы низкой частот. М.: Связьиздат, 1955.
2. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Сов. радио, 1971.
3. Горский А. Н. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного питания. М.: Радио и связь, 1988.

4. Бальян Р. Х., Обрусник В. П. Оптимальное проектирование силовых высокочастотных ферромагнитных устройств. М.: Изд-во Томск. ун-та, 1987.
5. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005.

D. S. Baranov, K. K. Nikitin
JSC «Concern „Oceanpribor“»

S. A. Gordeev
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

BASIC RECOMMENDATIONS TO ENGINEERS ON CALCULATING CHOKES AND TRANSFORMERS

This paper presents an algorithm for the development and optimization of modern electromagnetic components (chokes and transformers) of radio engineering circuits. The design is based on optimization according to a number of different criteria and is as close as possible to the practice of developing these components. The article presents the calculation of a voltage transformer and its energy, as well as the calculation of the magnetic system of a throttle. With reference to the energy calculation of the transformer, a number of significant comments are given, which the design engineer should pay attention to when designing electromagnetic elements. Using the recommendations of this paper, it is possible to design electromagnetic components (chokes and transformers) for real devices with the minimum possible error rate. The development algorithm presented in the paper is applicable, first of all, in the development of electromagnetic components for modern radio engineering devices, as these devices set a number of additional requirements.

Electromagnetic elements, choke, transformer, electromagnetic materials