

Трансформаторы силовые и звуковые

Расчет и изготовление в домашней лаборатории

(Окончание. Начало см. «РХ» №3/00, с.58-61, №4/00, с.49-51)

Евгений Васильченко, г.Казань

Расчет трансформаторов для однотактных усилителей

Магнитопроводы однотактных выходных и межкаскадных трансформаторов работают с подмагничиванием постоянным током, поэтому расчет имеет ряд особенностей, главная из которых – зависимость входных параметров расчета от выходных. При постоянном подмагничивании током покоя I_0 магнитная проницаемость материала сердечника уменьшается. Введение немагнитного зазора позволяет свести влияние подмагничивания к минимуму, но не устранить его. Размеры трансформаторов для однотактных усилителей имеют большие габариты, чем для двухтактных той же мощности. Процесс перемагничивания сердечника происходит по частному циклу вокруг точки с индукцией B_0 . Таким образом необходимость выбора максимальной переменной индукции усугубляется проблемой выбора индукции “покоя” B_0 . Эта задача сродни выбору рабочей точки однотактного транзисторного усилителя с однополярным питанием. К примеру, разработчики фирмы Lundahl Transformers даже в межкаскадных трансформаторах допускают индукцию 0,9 Тл в отсутствие сигнала. Это позволяет иметь изменения индукции 0,7 Тл под воздействием звукового сигнала. Д-р Н. Патридж в своих работах 30-х годов писал об индукции “покоя” 0,9-1,0 Тл. Lundahl Transformers применяет стержневые магнитопроводы из холоднокатаной стали (с-core или ПЛ по отечественной классификации). В свете сказанного выше можно рекомендовать рассчитывать трансформаторы для однотактных усилителей (англоязычный термин - SE OPT) таким образом, чтобы магнитная индукция в отсутствие сигнала не превышала 0,7 Тл, а ее изменение под действием сигнала - 0,5;-0,6 Тл. Наилучшие результаты с точки зрения нелинейных искажений будут при уменьшении этих цифр до 0,4 Тл и 0,3 Тл соответственно и применении магнитопровода из высококачественной стали. После расчета выходного каскада усилителя и выбора величин индукции необходимо выяснить требуемую величину индуктивности первичной обмотки L_1 , сопротивления проводов, коэффициент трансформации. Предварительно выбрать подходящий магнитопровод можно по величине конструктивного параметра $G_{эл}$, это достаточно мягкий критерий. Но чаще всего размер магнитопровода выходного трансформатора однотактного усилителя определяется не величиной переменной индукции, а так называемой электрической постоянной времени трансформатора:

$$\tau_{эл} = \frac{L_1}{r_1} + \frac{L_2}{r_2} \approx \frac{L_1}{r_1}$$

Требуемые габариты выбираются из условия $\tau_{констр} \geq \tau_{эл}$

$$\tau_{констр} = 7,18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\mu_z \cdot Sc \cdot Sok \cdot Kc \cdot Kok}{l_c \cdot l_0}$$

К сожалению, сразу воспользоваться этими соотношениями невозможно. Точный расчет индуктивности обмотки в присутствии тока подмагничивания весьма затруднен. Поэтому практически все методики, особенно предназначенные для неподготовленного читателя, содержат эмпирические коэффициенты, призванные упростить расчет и сделать его одноступенчатым. Здесь мы предпримем попытку сохранить точность и “прозрачность” расчета с точки зрения физического смысла.

При неизменной степени постоянного подмагничивания индуктивность получается максимальной при определенной длине немагнитного зазора l_z . От величины этого зазора зависит эквивалентная магнитная проницаемость сердечника:

$$L_1 = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot \mu_z \cdot N_1^2 \cdot Sc \cdot 10^{-8}}{l_c}$$

$$\mu_z = \frac{\mu}{1 + \mu \frac{l_z}{l_c}}$$

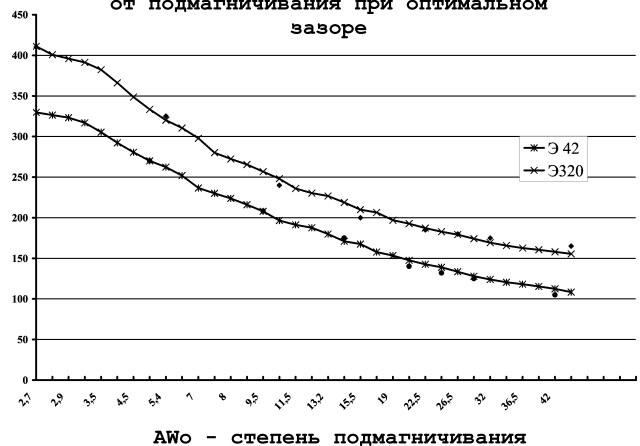
где

В присутствии постоянного подмагничивания l_z уже не является независимой переменной. Ключевой величиной в расчете дросселей и трансформаторов является степень подмагничивания – количество погонных ампер – витков aw_0 ,

$$aw_0 = \frac{N_1 \cdot I_0}{l_c}$$

Предлагаемый алгоритм расчета основан на экспериментальном графике зависимости магнитной проницаемости от aw_0 . Эти графики заимствованы из [2] и соответствуют массовым маркам сталей. Высококачественная сталь имеет в несколько раз боль-

Зависимость магнитной проницаемости от подмагничивания при оптимальном зазоре



шую магнитную проницаемость, однако, в большинстве случаев рассчитывать на это не приходится. В начале расчета величина aw_0 и, соответственно, μ_z не известны. Количество витков в обмотках может быть получено методом последовательных приближений по формуле

$$N_1 = \sqrt{\frac{7,97 \cdot 10^7 \cdot L_1 \cdot l_c}{\mu_{проб} \cdot Sc}}$$

Для этого в формулу подставляется требуемая индуктивность и пробная величина $\mu_{проб}$, по полученному количеству витков вычисляется степень подмагничивания aw_0 . По графику $\mu(aw_0)$ находится μ_z , вместо графиков можно использовать аппроксимирующие уравнения:

$$\mu_z(aw_0) = \frac{2000}{(aw_0 + 5)} + 70 \quad \text{для горячекатаной стали или}$$

$$\mu_z(aw_0) = \frac{1600}{(aw_0 + 3)} + 120 \quad \text{для холоднокатаной стали.}$$

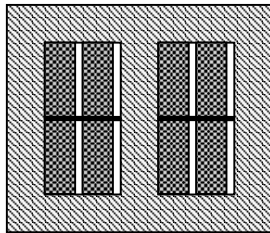
Пробная $\mu_{проб}$ корректируется и снова просчитывается количество витков. Эта процедура продлевается несколько раз до тех пор, пока изменение количества витков от просчета к просчету не будет незначительным (несколько десятков). Если новое значение μ_z больше старой $\mu_{проб}$, то $\mu_{проб}$ следует увеличить так, чтобы она стала немного больше μ_z и наоборот. В конце расчета необходимо убедиться, что получившиеся L_1, N_1 удовлетворяют требованию физической реализуемости $\tau_{констр} \geq \tau_{эл}$. При необходимости следует выбрать другой типоразмер магнитопровода и повторить расчет. Заключительная операция - расчет за-

AUDIO HIGH-END

зора, которому соответствует найденная величина μ . Эмпирическая формула для определения толщины прокладки в зазоре броневое магнитопровода $\delta_z [мм] = 9 \cdot 10^{-3} N_1 \cdot I_0$, однако лучше всего подобрать зазор экспериментально - по максимуму индуктивности первичной обмотки готового трансформатора.

Диаметр провода вычисляется по формуле, приведенной ранее, в разделе двухтактных трансформаторов («РХ» 4/00, с.50).

Расчет низкоомного межкаскадного трансформатора в принципе не отличается от расчета SE OPT. Небольшое отличие состоит в том, что ввиду малой мощности сигнала габариты такого трансформатора полностью определяются постоянной времени $\tau_{эл}$. Расчет высокоомного межкаскадного трансформатора обязательно должен быть дополнен оценкой внутренней емкости обмоток. Конструктивных особенностей однотактные трансформаторы не имеют. Намотка должна вестись виток к витку. Секционирование обмоток желательно, но не слишком сильное. Иногда схема 2+2 (две секции первичной + две секции вторичной) дает неплохие результаты, 4+4 достаточно практически всегда. Высокоомные выходные трансформаторы (~10 кОм) для мощных триодов типа 6М-70 или SV572 могут иметь неблагоприятную комбинацию индуктивности рассеяния и внутренней емкости. В этом случае следует применить дисковое секционирование, подобно трансформатору для двухтактного усилителя класса В. Увеличение количества секций уменьшает коэффициент заполнения окна, это должно быть учтено в начале расчета.



Конструктивное исполнение трансформаторов

Наиболее важные для конструктора - любителя моменты, связанные с процессом изготовления трансформатора, - это выбор каркаса, способа намотки, подбор обмоточных и изоляционных материалов, сборка сердечника и всего трансформатора. Каркас со щечками необходим практически всегда. Исключения - низковольтные, точнее низкопотенциальные обмотки. При анодном напряжении 600-800 Вольт нередко случается пробой между анодной обмоткой и сердечником, и наличие щечек может облегчить эту проблему. Бескаркасные катушки должны наматываться так, чтобы длина намотки каждого последующего слоя была меньше предыдущего. Чтобы витки при намотке не сползали, перед намоткой слоя на каркас укладывается полоса изоляционного материала, а после завершения намотки слоя полоса заворачивается и клеивается, удерживая слой от расползания. Щели и зазоры в картонных каркасах закрываются изоляцией. Таблица из [2], единственный комментарий к источнику 45-летней давности - слишком большой запас прочности, по крайней мере для напряжений ниже 1 кВ.

Анодное напряжение, кВ	Толщина, мм				Зазор между каркасом высокого напр. и обмоткой низкого напр.	Расстояние от крайней щетки до края каркаса
	крайние щетки	средние щетки	изоляция между обмотками	гильза каркаса высокого напряжения		
0,25	1,5-2,5	1,5-2	0,3-0,5	-	-	-
0,5	2,5-3,5	2-2,5	0,5-0,8	-	-	-
1	5,5-6	2,5-3	1,0-1,5	-	-	-
2	5-6	3-4	2-3	-	-	3-5
3	6-8	4-5	-	3-4	-	7-9
5	8-10	4-5	-	4-5	3-4	9-12
7	8-10	4-5	-	4-6	5-6	12-18
10-12	8-10	4-5	-	6-8	6-8	18-25

Изоляция - это очень важный компонент успеха. Примененная изоляция довольно сильно влияет на свойства трансформатора, в частности на класс нагревостойкости, тропикоустойчивости и т.п. В реальной жизни самодельщика могут использоваться самые немыслимые изоляционные материалы. Самые употребляемые из них - это бумага, стекло- и лакоткань, лавсан. Некоторые их свойства приведены в таблице.

Самый распространенный вид изоляции - кабельная бумага. Электроизоляционная стойкость бумаги довольно высока. В выходных трансформаторах обычно применяются тонкие про-

Название	Марка	Толщина	Пробивная электрическая прочность, кВ/мм		
			При толщине, мм	В исходном состоянии	После перегрева
Кабельная бумага	К	0,08; 0,12; 0,17	0,16	20	4
Телефонная бумага	КТН	0,05	0,1	30	5
Конденсаторная бумага	КОН II	0,005; 0,01; 0,012; 0,015; 0,022	0,044	50	30
Электрокартон	ЭВ, ЭВТ	0,1-3	0,3	11	8
Лакоткань	ЛХ, ЛХЧ, ЛШ	0,08-0,3	любой	5-10	4-9
Стеклоткань	-	0,025; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1	то же	-	4
Лавсан	-	-	то же	170	-
Фторопласт	Ф-4	0,01-0,1	то же	>30	-

вода, редко более 1,5 мм. Поэтому бумага может применяться достаточно тонкая - 0,8 мм. Если толщина проводов превышает 1,0 мм, то и изоляция должна быть толще - 0,12, а то и 0,17 мм. Это связано с тем, что при перегребе и сминании изоляции электрическая стойкость значительно снижается. Количество корпусной и межобмоточной изоляции для разных анодных напряжений:

Напряжение	300	350	500	700	1000
Количество слоев изоляции	1	1	2	3	4

Первичную и вторичные обмотки силовых трансформаторов обычно разделяют двумя-тремя слоями кабельной бумаги и электростатическим экраном. Экран обычно представляет собой один слой проволоочной обмотки, или один незамкнутый слой фольги с выводом. Межслойная изоляция прокладывается при намотке катушек либо через слой, либо через несколько слоев. Через каждый слой изоляция прокладывается в случае применения провода с низкокачественной витковой изоляцией, при диаметрах провода свыше 0,4 мм, или в особо ответственных случаях. Прокладку через несколько слоев применяют при намотке катушек проводами с высокопрочной эмалью или при наличии дополнительной наружной оплетки, причем суммарное напряжение в изолированных слоях составляет 20-30% от электропрочности витковой изоляции провода. Провода с лаковой изоляцией имеют электропрочность 300 - 1200 вольт в зависимости от диаметра.

Намотанную катушку желательно пропитать. Перед пропиткой должна быть проведена сушка. Пропиточных материалов в производстве трансформаторов используется предельное множество - в зависимости от области применения. Пропитка трансформатора сильно увеличивает срок его службы, и уменьшает акустический шум. Бумага попадает в класс нагревостойчивости А (самый слабый класс, температура до 105 градусов) только после пропитки. Можно посоветовать пропитывать катушки горячим церезином (парафином), а также глифталевыми, алкидными или полиэфирными лаками. Наиболее распространены в производстве лаки МЛ-192 и уретановый УР -231. Без вакуума лак проникает неглубоко. Если нет возможности пропитать катушку или весь трансформатор в вакууме, в ответственных случаях лучше пропитывать обмотку в процессе намотки. Сушка пропитанного изделия производится в два этапа: выдержка 1-6 часов при комнатной температуре, затем несколько (до 12) часов в сушильном шкафу при температуре около 100 ... 130 градусов. Труднее всего пропитываются и сушатся тороидальные трансформаторы.

При сборке трансформаторов на разъемных ленточных сердечниках усилие стяжки должно быть достаточным для получения минимального зазора в стыке и, с другой стороны, не превышать величин 10-12 кГ/кв.см поперечного сечения стержня. При больших давлениях ухудшаются магнитные свойства сердечников.

Стяжка отдельных пластин осуществляется либо изолированными стяжками шпильками, пропускаемыми через отверстия в углах пластин, либо обоймой, служащей одновременно для крепления трансформатора к шасси. Плоскость и торцы пластин следует изолировать от обоймы и элементов крепления.

Литература:

[1] Р.Х.Бальян "Трансформаторы малой мощности". Ленинград, Судпромгиз, 1961 г.

[2] монография Г.В. Войшвилло "Усилители низкой частоты" издания 1953 г.