

# Трансформаторы силовые и звуковые

## Расчет и изготовление в домашней лаборатории

Евгений Васильченко, г.Казань

Приношу благодарность за помощь в подготовке этой публикации Александру Забайрацкому и Владимиру Ульянову, чьи письма в FIDO'шных эхо-конференциях *su.hardw.audio* и *to.hi-fi*, присутствуют здесь в виде цитат или невяно:

Alexander Zabairatsky (2:5084/11.4)

Vladimir Uliyanov (2:5020/1021.11)

Владелец американской фирмы *Electra-print audio Co.* Jack Elliano любезно предоставил некоторые фактические материалы, использованные при подготовке этой статьи.

### Оговорки и ссылки

Рекомендации, приводимые в статье, отражают личную точку зрения автора. Материал ни в коей мере не претендует на полноту описания предмета и носит обзорный характер. Автор не несет ответственности за возможный ущерб, причиненный применением нижеизложенных сведений.

Качество выходных и переходных трансформаторов в ламповых усилителях - это залог хорошего звука. Поэтому конструкция трансформаторов традиционно является предметом *know-how* фирм - изготовителей и разработчиков. Рискую открыть секрет Полишинеля, скажу, что 99% успеха обусловлены грамотным расчетом, подбором материалов и комплектующих экстракласса и высочайшей технологией изготовления. И только один процент приходится на применение эмпирических методов достижения результатов.

Расчет выходного трансформатора всегда производится в составе лампового каскада. Вместо этого предлагается рассматривать трансформатор как «черный ящик» с параметрами, которые скорректированы под конкретное применение. Практически всегда самодельщику известны параметры каскада, рекомендуемые изготовителем ламп. Точность такого подхода более чем достаточна. В великолепной *базе данных Дункана Манро* есть рекомендуемые режимы усилителей для практически всех ламп. Она называется *TDSL Personal Edition* и свободно доступна на его сайте в Интернете <http://duncanamps.simplenet.com/>

Расчет трансформатора для источника вторичного электропитания должен учитывать особенности схемы выпрямления, параметры элементов выпрямителя и фильтров. Все это умеет делать бесплатная программа *D.Munro PSUD* [http://duncanamps.simplenet.com/psud2/psud2\\_beta024.exe](http://duncanamps.simplenet.com/psud2/psud2_beta024.exe). Здесь будет рассмотрен упрощенный расчет силового трансформатора с заданными параметрами нагрузки.

Неплохие сведения по расчету усилителей и звуковых трансформаторов есть на сайте известного английского аудиофила по имени *Russ Sadd* <http://www.aston.ac.uk/~saddrj/library.htm>

В его библиотеке можно взять архивированные файлы статей по схемотехнике ламповых усилителей, весьма полезные обзоры и материалы, принадлежащие, в частности, перу знаменитого *Нормана Кроухерста*. В разделе о звуковых трансформаторах большое внимание уделено расчету индуктивности рассеяния и собственной емкости обмоток. Есть и пример изготовления выходного трансформатора для ультралинейного выходного каскада <http://www.aston.ac.uk/~saddrj/download/HMOT.zip> A Home-Made Output Transformer by W. Groome.

Оговорюсь, что так любимый Кроухерстом ультралинейный режим, несмотря на прекрасные характеристики, не является самым лучшим способом получения хорошего звука. Эта оговорка относится к вышеупомянутому одному проценту составляющей успеха.

Несложные алгоритмы расчета трансформаторов и дросселей в текстовом формате можно найти на странице <http://www.mc-h.demon.co.uk/vtheory/vtheory.htm>

Большинство производителей трансформаторов для аудио применений представлены в Internet'e, приведу лишь самые известные названия:

*Hammond manufacturing* <http://www.hammondmfg.com>

*Electra-print audio Co* <http://www.execpc.com/~n9zes/electra.html>

*MagneQuest* <http://www.magnequest.com>

Тороидальные трансформаторы выпускает фирма *Plitron*: <http://www.plitron.com>

С продукцией *Audio Note UK* можно ознакомиться на <http://www.audionote.co.uk>

Страницы культовых фирм *Tamura* - <http://www10.big.or.jp/~dh/tamura> и *Tango Transformers* <http://www.netSPACE.or.jp/~eifl/eifl/export/tango.htm>

На *Web-странице автора* <http://class-a.da.ru> можно найти практически все данные по магнитопроводам отечественных трансформаторов, выпускающихся по межотраслевым нормам, начиная от веса и габаритных размеров, до практических рекомендаций по выбору коэффициента заполнения окна и плотности тока. Там же находится программа для расчета выходных трансформаторов по алгоритму, изложенному в этой статье.

### О магнитопроводах

В производстве трансформаторов применяются специальные сорта сталей. Их характерной особенностью является содержание довольно большого количества кремния (до 4,5% в стали типа Э41 или ее современном аналоге 3512). Вот примеры обозначения по старым ГОСТам:

Э41-Э43 (изотропная горячекатаная с максимальной индукцией 13000 Гаусс = 1,3 Тесла на частоте 50 Гц);

Э310-Э330 (текстурированная холоднокатаная с нормированной индукцией 17000 Гс вдоль кристаллов на частоте 50 Гц);

Э340-Э360 (то же самое с индукцией 15000 Гс для частоты 400Гц).

По действующему ГОСТу принято четырехзначное обозначение: первая цифра 3 - класс трансформаторных сталей, вторая - округленное содержание кремния в процентах, третья - округленная максимальная индукция в сердечнике в Тесла, четвертая - номер разработки.

Зарубежная классификация сталей базируется на величине потерь. Для силовых трансформаторов используются стали от М6 до М55. Индекс пропорционален величине потерь, выраженных в ваттах на фунт веса (к сожалению, мне неизвестно, на какой частоте и при какой индукции, для того, чтобы можно было классифицировать отечественные марки стали). Наша ширпотребовская сталь толщиной 0,5 мм 3512 имеет потери 3,5 Вт/кг @ 50 Гц / 1,5 Тл и 25 Вт/кг @ 400 Гц / 1,0 Тл и примерно соответствует М24. Лучшие партии серийной холоднокатаной стали имеют в тех же условиях 1 и 8 Вт/кг соответственно. *AudioNote UK* использует в своих выходных трансформаторах стали группы М4.

Потери в сердечнике и нелинейные искажения в трансформаторе усилителя имеют общую природу - нелинейность процесса намагничивания стали. Потери пропорциональны площади петли гистерезиса. Уменьшение максимальной индукции, разумеется, уменьшает высоту петли и, следовательно, искажения. Кроме этого, при малых индукциях зависимость магнитной индукции от напряженности поля, создаваемого обмоткой, более линейна. Но даже при малых индукциях и при наличии подмагничивания ширина петли частного цикла у низкосортных сталей остается значительной. Другими словами, уменьшение индукции в магнитопроводе с целью уменьшения уровня искажений имеет ограниченный смысл. Выходной трансформатор с низкокачественным сердечником имеет большие габариты, но это не единственный его недостаток. Увеличение размеров обмотки приводит к росту рассеяния, собственной емкости, сопротивления и разбаланса плеч трансформатора.

Есть еще один фактор, связывающий свойства сердечника с искажениями звукового сигнала, это зависимость магнитной проницаемости стали от индукции в сердечнике. Благодаря наличию максимума на графике этой зависимости, коэффициент нелинейных искажений на НЧ имеет минимум при некотором значении индукции. Для того чтобы найти наилучший режим работы трансформатора, необходимо знать свойства применяемой стали.

Магнитопровод для силовых трансформаторов может быть изготовлен из любой стали и любой формы. Разница будет только в габаритах. Лучшие массогабаритные параметры имеют тороидальные трансформаторы. Они же имеют наименьшее поле рассеяния. Сказываются ли особенности конструкции силового

трансформатора на звучании усилителя? Несомненно. Особенно заметно это влияние на звучание транзисторных усилителей. Трансформатор при необходимости должен уметь пропускать мощные импульсы тока низкой частоты. Эта особенность редко учитывается в методиках расчета «обычных» трансформаторов вторичных источников электропитания.

Вопрос выбора магнитопровода для выходного трансформатора еще более неоднозначен. Три ответа на простой вопрос саodelьщика «Какую сталь применить для своего проекта»:

**Mike LaFevre** из MagneQuest: «Наиболее употребляемая в выходных трансформаторах недорогая сталь М6. М4 уже вдвое дороже. Выбор стали по звуку достаточно субъективен. Производители гитарных усилителей часто (но не всегда) предпочитают М19 из-за способности давать «богатый, жирный звук с кучей красивых гармоник». Что касается hi-fi, то материал сердечника – это только один кусочек головоломки, хоть и самый крупный. По опыту моей работы хороший дизайн никогда не определяется единственным параметром».

**Jack Eliano** из Electra-Print Audio Co: «Мы используем как М6, так и М19. Оба типа находят свое применение, несмотря на сильные различия. Важно использовать линейный участок кривой намагничивания. Даже с М19 искажения, вносимые трансформатором, не превышают 0,05%».

**Примечание.** Коэффициент гармонических искажений принято рассчитывать по формуле и методике Патриджа:

$$\frac{U_n}{U_0} = S_H \frac{10^9}{8\pi^2} \frac{l_c \cdot Ra}{N^2 \cdot Sc \cdot f} \left( 1 - \frac{Ra}{4Z_f} \right)$$

где  
 $U_n, U_0$  - напряжения гармоники и основной частоты,  
 $S_H$  - коэффициент искажений, характеристика материала сердечника,

$l_c$  - средняя длина магнитной силовой линии в сердечнике,  
 $Ra$  - сопротивление измерительного резистора, включенного последовательно с первичной обмоткой,  
 $N$  - количество витков в первичной обмотке,  
 $Sc$  - площадь сечения сердечника,  
 $f$  - основная частота,  
 $Z_f = 2\pi f \cdot L$  - индуктивное сопротивление первичной обмотки,  
 $L$  - индуктивность первичной обмотки.

В эту формулу входит коэффициент искажений  $S_H$ , характерный для каждого материала.  $S_H$  зависит, в частности, от магнитной индукции, качества и толщины материала и имеет порядок величины 50-100.

**Владимир Ульянов:**

«Если есть возможность узнать марку железа, из которого изготовлен сердечник, то лучшее Ш железо для звуковых целей 3414...3416. Железо для ПЛ сердечников обычно применялось 3406...3407, а 3408...3409 - это вообще лучшее, что есть на сегодня для звука, не считая эксклюзивов типа аморфного железа или экспериментальных марок сталей.»

Для ленточных сердечников практически всегда используется холоднокатаная анизотропная сталь, у которой в направлении навивки сердечника более высокие магнитные свойства, чем у горячекатаной изотропной, которая используется для шихтованных сердечников. В Ш сердечниках иногда применяется холоднокатаная сталь, но магнитные свойства стали в этом случае не могут быть полностью использованы. Поэтому в расчетах трансформаторов на Ш железе не учитывается разница индукции насыщения разных видов стали. Тем не менее, качество трансформаторов будет, естественно, различаться. Вот что пишут о магнитопроводах для изготовления выходных трансформаторов А. Забайрацкий (АЗ) и В. Ульянов (VU):

**АЗ:** «Если сердечник Ш-образный, то он должен быть из холоднокатаной стали (Э-330, Э-340...). Внешний признак - пластины покрыты каким-то красновато-коричневатом налетом, похожим на ржавчину, но не ржавчиной. Лучшие пластины УШ (у пластин Ш боковые части по ширине точно равны половине среднего языка, у УШ боковишка шире половины среднего). Не стоит брать сердечник от горелого трансформатора - резуль-

тат будет заметно хуже».

**VU:** «Качественно сделанные ПЛ сердечники сейчас можно найти в ОСМ трансах, в трансах от тепловозов и теплоходов и прочих изделиях для промышленных целей. Практически старые ПЛ сердечники до ~86 года достаточно приличные, кроме телевизионных, для которых применялось самое дешевое железо. Оптимальная толщина пластин 0.27...0.35 мм. Поэтому стали нормированные на 400 Гц - марки 3420 и выше, для звука не идут, так как у них толщина 0.15 мм, а как еще заметил Цыкин в одной из последних своих работ, сердечники из тонких пластин вносят дополнительные гармоники высоких порядков, что к примеру в случае выходных трансов обозначает жесткость звука и его «металлическую» окраску. Из тонких сталей ПЛ сердечники сейчас делают кому не лень, т.к. их мотать можно хоть на токарном станке, естественно без нормальной технологии и самое главное без соблюдения режимов отжига. При нормальном отжиге начальная магнитная проницаемость получается в районе 2000, у сердечника современного халатного изготовления обычно в среднем 600, причем еще есть короткозамкнутые пластины и не протравленные места стыков, чуть ли не болгаркой разрезанные».

Нормальная технология отжига - это отжиг в очень чистом водороде с соблюдением температурного режима, который включает в себя несколько стадий. Допустим отжиг в вакууме (<0.001 мм рт.ст.), начальная магнитная проницаемость при этом получается 350-400 для горячекатаных сталей и 500-700 для холоднокатаных сталей (1500 - для лучших партий). Тем не менее, на практике часто применяют безвакуумный отжиг навитых сердечников, в том числе и кратковременный (до 1 часа). Полного восстановления свойств стали такие режимы не обеспечивают. Такие сердечники для применения в звуке непригодны из-за больших потерь.

Вредно влияет на магнитные свойства сердечников повторный отжиг и механические воздействия: После отжига ленточные сердечники пропитываются. Для большей монолитности разрезных сердечников применяется компаунд КП-10 вместо обычного БФ-4. При чрезмерно длительном тепловом старении таких сердечников наблюдается значительное повышение магнитных потерь и намагничивающих токов (до 80%). Это происходит из-за механических напряжений.

Особенно не любят механических воздействий сердечники из пермаллоя. После отжига их помещают в контейнеры с ЦИАТИМом. Намотка ведется уже поверх контейнера.

Этот краткий экскурс в технологию был предпринят для того, чтобы у читателей не возникало иллюзий относительно кажущейся простоты ламповых усилителей. Новый виток развития ламповой техники - это не только дань моде и схемотехнические решения 50-х годов, но и высокие технологии, и понимание того факта, что в звуке нет мелочей.

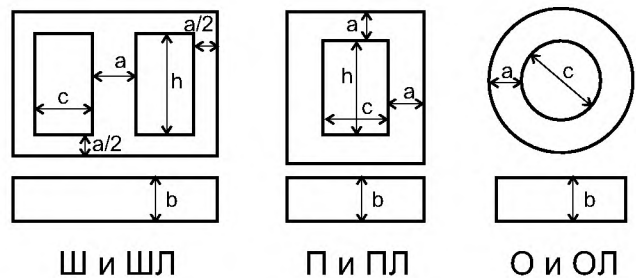
Теперь самое время обратиться к хорошо известным формулам.

**Расчет силовых трансформаторов**

**Обозначения и система единиц**

Для Ш, ШЛ и ПЛ железа принимаются обозначения (рис. 1):

- a - ширина среднего стержня;
- b - набор (для Ш) или ширина ленты (для ШЛ, ПЛ) или «толщина блина» ОЛ;
- c - ширина окна магнитопровода (диаметр окна для ОЛ);
- h - высота окна.



Все приведенные расчеты сделаны в системе СГС с некоторыми исключениями. Линейные размеры приводятся в сантиметрах.

## AUDIO HIGH-END

рах, индукция в Гауссах (если не указано явно Тесла), токи в Амперах, плотность тока - в Амперах на квадратный миллиметр, частоты - в Герцах.

Трансформатор для вторичного источника питания должен иметь сердечник с габаритной мощностью большей или равной электрической мощности. Габаритная мощность однофазного трансформатора вычисляется по формуле

$$P_{габ}[Вт] = 2.22 \cdot 10^{-8} \cdot F \cdot Sc \cdot Kc \cdot Sok \cdot Kок \cdot Bm \cdot J,$$

где

F - частота, Гц,

Sc - площадь сечения сердечника, см<sup>2</sup>,

Kc - коэффициент заполнения сердечника сталью,

Sок - площадь сечения окна, см<sup>2</sup>,

Kок - Коэффициент заполнения окна медью,

Bm - Максимальная индукция в сердечнике, Гс,

J - плотность тока в проводах, А/мм<sup>2</sup>

Для ориентировочных прикидок можно применить

$$P = 0,9 \cdot Sc \cdot Sok \text{ для шихтованных сердечников,}$$

$$P = 1,2 \cdot Sc \cdot Sok \text{ для ленточных сердечников.}$$

### Замечания о Kc и Sc

Площадь сердечника следует *измерять*, не полагаясь на маркировку сердечников. Расхождения могут достигать 10%.

Коэффициент заполнения сердечника сталью зависит от толщины стальных пластин или ленты, вида изоляции, качества изготовления и может принимать значения от 0,86 до 0,97. Для ориентировочных расчетов принимается 0,9.

Типичные значения для *шихтованных сердечников*:

Толщина пластин / вид изоляции	Лаковая	Фосфатная	Оксидная
0,5	0,94	0,96	0,97
0,35	0,91	0,94	0,95

Для *ленточных сердечников*:

Толщина ленты/ вид изоляции	Катафорез	Оксидная для ОЛ	Оксидная для ПЛ
0,35	СС	0,93	0,92
0,15-0,2	0,88	0,93	0,88-0,92

Изоляция стальной ленты катафорезом с помощью суспензии сейчас практически не применяется. Эта технология применяется для изоляции пермаллоевой ленты.

### Выбор Кок

Нетрудно заметить, что величина Кок·Сок·J представляет собой приведенный вторичный ток, т.е. суммарную величину тока, циркулирующего в трансформаторе. Максимально достижимый коэффициент заполнения окна медью зависит от конструкции трансформатора, количества межслойной и межобмоточной изоляции, толщины и вида провода (круглый или прямоугольный). В свою очередь, каждый из этих факторов определяется целым рядом условий. Строго говоря, точный расчет может быть сделан только с помощью последовательных приближений. Однако накопленный опыт позволяет задать исходные величины сразу. Поскольку чаще всего самоделщикам попадает в руки уже готовый трансформатор, можно рассчитать его коэффициент заполнения по формулам

$$S = N_1 \cdot S_1 + N_2 \cdot S_2 + \dots + N_n \cdot S_n,$$

где

$$S_n = 3 \cdot 14 \cdot D_n^2 / 4, \text{ D}_n - \text{толщина соответствующего провода,}$$

$$Kок = S / Sok$$

Полученный коэффициент может служить оценкой максимального достижимого Кок. При самостоятельной намотке Кок получится примерно на 10-15% меньше за счет несовершенства технологии намотки и изоляции

Кок обязательно нужно рассчитывать *перед* намоткой уже рассчитанного трансформатора для того, чтобы оценить, поместится ли заложённый в расчет провод в окно. Для прикидок обычно принимается Кок=0,3. После намотки трансформатора нужно уточнить Кок для того, чтобы скорректировать габаритную мощность (а с ней и плотность тока в проводах).

Наибольший Кок (до 0,45) имеют дроссели, которые наматываются без дополнительной изоляции. У низковольтных трансформаторов Кок имеет порядок 0,3 - 0,35. Анодно-накальные трансформаторы за счет большего количества изоляции имеют Кок 0,22-0,27. Еще меньший коэффициент заполнения имеют высоковольтные трансформаторы (все цифры приведены для медных проводов круглого сечения и броневых магнитопроводов). Чем меньше мощность трансформатора, тем меньше Кок. Наибольший коэффициент заполнения окна имеют трансформаторы в броневом исполнении, наименьший - в тороидальном.

### Выбор индукции

Промышленные трансформаторы малой мощности с сердечником из горячекатаной стали рассчитываются на индукцию 1,25 Тл, из холоднокатаной ленточной - на 1,7 Тл. Речь идет о частоте 50 Гц. При расчете трансформаторов очень малой мощности, до 10-15 ватт, индукция должна быть снижена до 1,0-1,1 и 1,4-1,6 Тл соответственно. Это теория, хорошо подкрепленная практикой серийного производства трансформаторов минимальной стоимости. В действительности к самоделщику редко попадает кондиционный сердечник с гарантированными свойствами. Наиболее вероятно использование магнитопровода, уже бывшего в употреблении. Как уже было упомянуто выше, на магнитные свойства сердечника сильно влияют механические воздействия, в том числе и те, что сердечник испытывает в процессе сборки, пропитки, и обратной разборки, не говоря уже о процессе эксплуатации. В процессе разборки разрезные сердечники могут расклеваться. Кроме этого, качество реза не всегда бывает изначально высоким. Поэтому разрезные сердечники, собираемые в домашних условиях, наверняка имеют неконтролируемый зазор. В производстве это обычно учитывается, типичный технологический зазор составляет 10-15 микрон для разрезного и до 50 микрон для шихтованного сердечника. Наличие зазора в магнитной цепи ведет к увеличению тока намагничивания (и тока холостого хода). Величина тока намагничивания в промышленных трансформаторах выбирается довольно высокой. В любительской практике обычно не предъявляются требования обеспечить минимальную стоимость трансформатора. Гораздо важнее получить малое поле рассеяния и нечувствительность к импульсам тока, которые отбирает у блока питания усилитель класса АВ на пиках потребления. Наиболее опасны для трансформатора несимметричные пики с частотами ниже расчетных 50 Гц. Ток потребления с очень низкой частотой легко намагничивает сердечник трансформатора до насыщения. Все это хорошо известно разработчикам трансформаторов для аудио применения. В проспекте фирмы *Electra-print audio Co*, изготавливающей трансформаторы и дроссели по индивидуальному заказу, содержится оговорка, что изделия рассчитываются с учетом применения в классе А, если иное не указано явно.

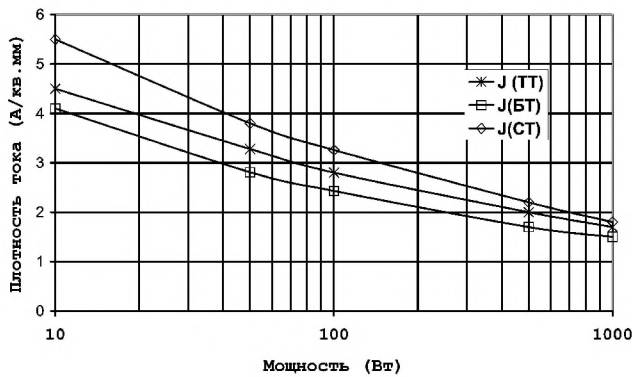
Именно по этим причинам трансформаторы, применяемые в звуковой аппаратуре, следует рассчитывать на пониженную индукцию, ориентировочно 1,0 и 1,4 Тл соответственно примененным сталям. Очень сильно уменьшать ток намагничивания не стоит, поскольку при этом падает габаритная мощность и увеличивается активное сопротивление обмоток.

Лучшим способом проверки качества магнитопровода и точности расчета является измерение тока холостого хода. В любительской практике нет смысла точно рассчитывать ток холостого хода и сравнивать его с полученным. Косвенным показателем выполнения вышеприведенных рекомендаций является величина тока покоя, не превышающего 3-5% от рабочего тока потребления. Для самых маленьких трансформаторов допустима 10 и даже 50% -ная величина.

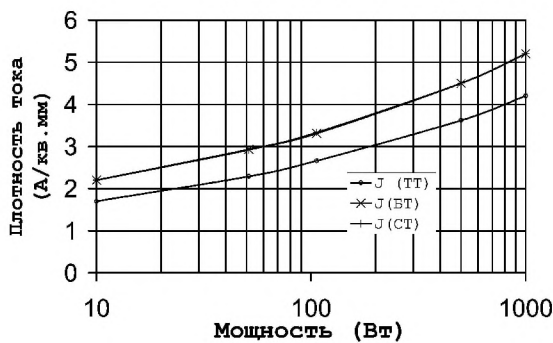
### Выбор плотности тока

От выбора плотности тока зависит величина падения напряжения на выводах трансформатора и степень его разогрева под нагрузкой. Инженерный расчет трансформаторов «на заданное падение напряжения» и «на заданный перегрев» сильно отличается. Здесь следует пояснить, что заданное падение напряжения должно точно выдерживаться при работе нескольких трансформаторов на общую нагрузку. Для наших целей имеет смысл огоривать верхний предел падения напряжения dU исходя из эксплуатационных требований электровакуумных и электронных приборов. Точная формула расчета J приведена ниже, однако удобнее пользоваться графиками, заимствованными из литературы.

Зависимость плотности тока от мощности.  
Расчет на заданный перегрев 50 град.



Зависимость плотности тока от мощности.  
Расчет на заданное падение напряжения 10%



$$J = \sqrt{\frac{p'}{\rho \cdot K_{ок} \cdot V_k}}$$

где  $\rho = 1,22 \cdot 0,0175$  («горячее» удельное сопротивление меди, Ом·мм<sup>2</sup>),  
 $V_k$  – объем катушки, см<sup>3</sup>,  
 $p'$  – величина потерь в катушке, Вт, пояснения ниже.

После того, как плотность тока выбрана, необходимо определить сечение и диаметр провода для первичной и вторичных обмоток. Силу тока в первичной обмотке  $I_p$  можно оценить, исходя из суммарной мощности вторичных обмоток  $P_{II}$ :

$$I_p = \sqrt{\left(\frac{\Gamma' p}{\eta}\right)^2 + I_{хх}^2},$$

где  $\Gamma' p = P_{II} / 220$  – величина «отраженного» тока,  $I_p$  – векторная сумма тока холостого хода и отраженного тока, скорректированного с учетом КПД  $\eta$ . Ток намагничивания можно не рассчитывать, а задать в виде некоторой части от активной составляющей тока первичной обмотки трансформатора. Наиболее актуален учет тока холостого хода для маленьких силовиков, мощностью менее 10 Вт. В малых трансформаторах величина тока намагничивания может достигать 100% активной составляющей тока. К слову сказать, сила тока во вторичных обмотках тоже не всегда равна току потребления и зависит от схемы выпрямителя.

При расчете трансформатора, предназначенного для работы в усилителе класса АВ или В, есть смысл несколько увеличить сечение провода обмотки, питающей выходные каскады, а также первичной обмотки.

**Количество витков на вольт**

Расчет количества витков на вольт начинается с промежуточной величины  $W/E$ .

$$W/E = 10000 / (4,44 \cdot F \cdot S_c \cdot K_c \cdot B)$$

Прямо использовать эту величину для расчета количества витков вторичной обмотки нельзя. Необходимо рассчитать коэффициенты падения напряжения: для первичной обмотки –  $K_1$ , вторичных –  $K_2$ , для накальных –  $K_3$ .

$$K_1 = 1 - dU/2$$

$$K_2 = 1 + dU/2$$

$$K_3 = 1,03 \cdot K_2,$$

где

$dU$  – падение напряжения, задается непосредственно, скажем 10%, либо рассчитывается (если задан перегрев). Здесь придется сделать отступление. Ниже будут приведены формулы инженерного расчета падения напряжения. Они достаточно громоздки и требуют знания дополнительных параметров. Для облегчения расчетов можно воспользоваться таблицами параметров унифицированных рядов сердечников. Эти таблицы можно найти в [1] и на Web-странице <http://class-a.da.ru>, они обеспечивают высокую точность. Расчеты можно дополнительно упростить, если выполнены рекомендации по выбору индукции на 15-25% ниже максимально допустимого уровня. В этом случае потери в сердечнике можно пренебречь и не рассчитывать максимальное падение напряжения, а задавать его. Тем не менее вот формулы расчета:

$$dU = p' / (P_{II} + p')$$

$P_{II}$  – суммарная мощность вторичных обмоток,

$$p' = \alpha \cdot dT \cdot \text{Плкат} \cdot \left(1 + \beta \frac{\sqrt{v}}{1+v}\right) - \text{потери в катушках},$$

$dT$  – заданный перегрев, обычно 50 градусов,

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,

$\beta$  – величина, равная отношению площади сердечника  $P_c$  к площади катушек  $\text{Плкат}$ ,

$v$  – отношение потерь, равное отношению потерь в сердечнике к потерям в катушках. Это ключевая величина, определяющая режим работы трансформатора. Ее рассмотрение выходит за рамки статьи. Оптимальные значения можно определить как

$v = 1$  для тороидальных трансформаторов

$v = (1 + \beta)^2$  для стержневых трансформаторов

$v = 1 + \beta$  для броневых трансформаторов.

**Количество витков** в первичной обмотке  $N_1 = 220 \cdot K_1 \cdot W/E$

Количество витков во вторичных обмотках  $N_2 = U_2 \cdot K_2 \cdot W/E$ , для накальных (сильноточковых) обмоток следует применять коэффициент  $K_3$ .

**Диаметр провода**  $d$  рассчитывается исходя из токов обмоток  $I$  и плотности тока  $J$ .

$$d = \sqrt{\frac{4I}{\pi J}}$$

(продолжение следует)

**ПРЕДПРИЯТИЕ**  
**«ТРИОД»**

ЛАМПЫ: Г, ГИ, ГК, ГМ,  
 ГМИ, ГС, ГУ, 6... и др.  
 Магнетроны, клистроны, тиратроны,  
 разрядники, ФЭУ, видиконы и др.  
 ВЧ, СВЧ-транзисторы.  
 Со склада и под заказ.  
 Гарантия, доставка, скидки

(044) 478-09-86, 477-38-06 (с 10.00 до 17.00)  
 E-mail: ur@triod.kiev.ua

# Радио хобби

Журнал для радиолюбителей,  
аудиофилов и пользователей ПК  
№ 4(16)/СЕНТЯБРЬ 2000

Совместное издание с  
Лигой радиолюбителей Украины  
Издается с февраля 1998 г.



**Главный редактор**  
Николай Сухов

**Редакционная коллегия**  
Георгий Божко (UT5ULB)  
Александр Егоров  
Сергей Кубушин  
Евгений Лукин  
Всеволод Марценюк  
Олег Никитенко  
Александр Провозин  
Александр Торрес  
Георгий Члиянц (UY5XE)  
Владимир Широков

**Адрес редакции**  
Украина, 03190, Киев-190, а/я 568  
Тел./факс: (044) 4437153  
E-mail: radiohobby@mail.ru  
Fido: 2:463/197.34  
<http://www.radiolink.net/radiohobby>  
<http://www.radiohobby.ldc.net>  
<http://radiohobby.go.to>  
<http://radiohobby.da.ru>  
Новостной автоответчик:  
hobbyresponder@ukrpost.net

**Распространение**  
по подписке в любом отделении связи:

**Украина** - по «Каталогу периодичних видань України» УОПЗ Укрпошта, **индекс 74221**  
цена подписки на II полугодие 2000 г. 17 грн. 25 коп.

**Россия и другие страны СНГ, Литва, Латвия, Эстония** - по каталогу «Газеты и журналы» агентства Роспечать, **индекс 45955**  
цена подписки на II полугодие 2000 г. 99 руб. РФ

**Дальнее зарубежье** - по каталогу «Russian Newspapers & Magazines 2000» агентства Роспечать, \$21

Выражаем благодарность всем авторам за их мысли и идеи и всем подписчикам за доверие и материальную поддержку журнала. Редакция может не разделять мнение авторов и не несет ответственности за содержание рекламы.

© «Радио хобби». Перепечатка материалов без письменного разрешения редакции запрещена. При цитировании обязательна полная библиографическая ссылка с указанием названия и номера журнала.

Подписано к печати 05.09.2000 г.  
Отпечатано на журнальном комплексе издательства «Пресса Украины», м.Киев, вул. Героев космосу, 6  
Тираж 8700 экз.

Заказ № 0130066, цена договорная  
Учредитель и издатель ООО «Эксперт»  
Журнал выходит шесть раз в год  
60x84/8 бум. форм., 7,44 усл.печ.л., 12,8 уч.-изд.л.  
Зарегистрирован Госкомитетом Российской Федерации по печати 25.06.97 г., свид. №016258  
Зарегистрирован Министерством информации Украины 11.06.97 г., свид.серия КВ №2678

# СОДЕРЖАНИЕ

- 2** Из истории классических схем ..... Г.Члиянц
- 4** Новая техника и технология: ИНТЕРНЕТ-обзор  
AMD Duron и Sledgehammer против Intel Celeron II и Pentium 4, CDROM AudioXcel с повышенной стойкостью к дефектам компакт-диска, новые MP3-плееры Microboss/eXpanium/Genica/RaveMP2300/VAIO Music Clip, миниатюрный 500-МБ оптический диск DataPlay, цифровая фотокамера с записью на miniCD-R, никелевый диск Rosetta с временем хранения 10000 лет, вирус I-Worm.Jeg, он-лайнные словари в Интернете, новые стандарты голосовых модемов, OrCAD 9.2, автономные миниатюрные WWW-серверы Slim-Link, новая технология усиления звука REVA True Fidelity, УМЗЧ класса D серии CoolAudio, FETKY = HEXFET+Shottky, одночиповое решение цифрового ревербератора, двухканальный малошумящий VCA, шестиканальный 24-разрядный аудиоЦАП, ИМС ШИМ-усилителя с выходной мощностью 10000 Вт при КПД 98% и другие новости о микросхемах
- 8** DX-клуб «Радио хобби» ..... А.Егоров  
Радиостанции точного времени и частот
- 11** Дайджест зарубежной периодики  
Ламповые предусилители с выходом на головные телефоны и для источников с нестандартными АЧХ, вариант переделки «Прибоя», 20-ваттный двухтактный УМЗЧ на 6Н8С/6Н9С/6П3С, 120-ваттный Circlotron на шести EL34, модифицированный ультралинейный режим с подачей части анодного напряжения на катод вместо экранирующей сетки позволил реализовать в усилителе на двух телевизионных «строчных» лучевых тетрадах выходную мощность 90 Вт при коэффициенте гармоник 0,16% и полосе от 10 Гц до 50 кГц, гибридный полевой-биполярно-ламповый УМЗЧ с симметрией всех каскадов, прибор для определения полярности обмоток трансформаторов, 30-ваттный УМЗЧ на полевых IRFP150 в режиме класса А, УМЗЧ мощностью 120 Вт на ИМС STK4241, транзисторный УМЗЧ с «ручной» линеаризацией отдельных каскадов, ШИМ-УМЗЧ, винил-корректор с отключаемым рокот-фильтром, профессиональный микрофонный предусилитель с лимитером/компрессором/шумоподавителем, микшерский пульт, графический эквалайзер, внешний аудиоЦАП 32-96 кГц/16-24 разряда с оптическим и коаксиальным S/PDIF входом, S/PDIF монитор, NICAM-декодер, широкополосный ТВ антенный усилитель без индуктивности, автоматический источник бесперебойного питания 220 В/50 Гц, понижающий преобразователь DC-DC на ШИМ ИМС с высоким КПД, автовыключатель освещения, светорегуляторы с плавным нарастанием яркости, зарядные устройства, регулятор частоты вращения ЭД с «ужесточением» его нагрузочной характеристики, «кассета» для размагничивания головок касетных магнитофонов, псофометрический взвешивающий фильтр по МККР468-2, измеритель эквивалентного последовательного сопротивления электролитических конденсаторов для импульсных БП и High-End аудиотехники, микроблоки питания из последовательного и параллельного портов ПК, измеритель вольт-амперных характеристик с выводом на дисплей ПК, автоматический переключатель усилителей для трансиверов Icom, приемник-пеленгатор для «охоты на лис», перевод AWG/BSWG в миллиметры, ВЧ-YAGI как GP на НЧ и другие наиболее интересные устройства из трех десятков свежайших зарубежных журналов
- 35** Украина в СЕРТ! ..... Г.Члиянц  
О процедуре взаимного международного признания разрешений на эксплуатацию любительских радиостанций
- 36** Программа для работы SSTV - JVCOMM32 ..... П.Ткаченко
- 40** Широкополосная аперриодическая антенна ..... И.Захаров
- 41** Всеволновый треугольник ..... А.Астраинов
- 42** КСВ-метр для УКВ диапазона ..... И.Милованов
- 43** Радиостанция KENWOOD TK-270G/370G ..... Б.Витко
- 46** Русификация и добавление новых возможностей сотовых телефонов фирмы Motorola ..... М.Рязанов
- 48** Операционные усилители типа «Current Feedback» ..... В.Голуб
- 49** Трансформаторы силовые и звуковые. Расчет и изготовление в домашней лаборатории ..... Е.Васильченко
- 52** «НОВВУ и SNOBBY» ..... А.Белканов
- 52** Транзисторный УМЗЧ без ООС ..... А.Зысюк
- 58** End Millennium - транзисторный УМЗЧ без ООС фирмы LC Audio
- 59** Телевизионный антенный коммутатор ..... А.Томша
- 59** Минисправочник. Коды крупных городов СНГ в сети FidoNet
- 60** Блок управления стеклоочистителем ..... А.Руденко
- 61** Устройство POST CARD для ремонта ПК ..... Р.Скрипник
- 63** CD-ROM энциклопедия  
Новые компакт-диски для радиолюбителей
- 64** Книга-почтой

Наименование ОУ	Коэффициент усиления $K_0$	Сопрот. ОС $R_1$ , Ом	$R_{вх}$ , Ом	Граничная частота, МГц		$V_{увых}$ , В/мкс	Увых [В]/Iвых [мА]
				- 3 дБ	- 0,1 дБ		
AD8001AN	-1	649	50	340	105	1200	±3,1/70
	1	1050		880	70	-	
	2	750		460	105	1000	
	10	470		260	-	-	
	100	1000		20	-	-	
AD8009AR	1	-	8	1000	-	-	±3,8/175
	2	301		700	75	5500	
	10	200		350	-	-	
AD8023AR	-10	250	75	60	-	1200	1,0/70
	-1	750		150	-		
	1	2000		460	-		
	2	750		240	-		
	10	300		300	-		

В результате он может быть более широкополосным, чем типа «Current Feedback», при  $K_0 h_{116} / 2 < R_1$ .

В таблице приведены параметры трех усилителей типа «Current Feedback» фирмы «Analog Devices» - AD8001, AD8009 и AD8023 [3]. Микросхемы усилителей выпускаются в корпусах: типа DIP-8 - AD8001AN, типа SOIC-8 - AD8001AR, AD8009AR, типа SOIC-14 - AD8023AR, типа SOT-23-5 - AD8001ART (рабочие температуры - от -40 до +85 °С) и в керамическом корпусе с 8 выводами - AD8001AQ (от -55 до +125 °С). Выпускаются также бескорпусные чипы AD8001ACHIPS, AD8009ACHIPS, AD8023ACHIPS (от -40 до +85 °С) и оценочные платы AD8001R-EB+2 ( $c K_0 = 2$ ), AD8009-EB. Микросхемы AD8023AR и AD8023ACHIPS содержат в одном кристалле три одина-

ковых усилителя. Подробнее с параметрами рассмотренных и других усилителей фирмы «Analog Devices», а также усилителей других фирм, можно ознакомиться в НПФ «VD MAIS».

**Литература**

1. High Speed Design Techniques. - Analog Devices, 1996 (Current Feedback Op Amps, p. 1-1 - 1-18).
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т.1. - М.: Мир, 1983 (Токовые зеркала, с. 123 - 127).
3. Data Sheets: AD8001 (Rev.C, 1999); AD8009 (Rev.A, 1999); AD8023 (Rev.A, 2000). - Analog Devices.

## Трансформаторы силовые и звуковые Расчет и изготовление в домашней лаборатории

(Продолжение. Начало см. «РХ» №3/00, с.58-61)

Евгений Васильченко, г.Казань

**Расчет выходных трансформаторов**

*Предварительные замечания.*

Для расчета выходного трансформатора требуются некоторые данные, которые получаются при расчете выходного трансформаторного каскада:

$\eta$  - КПД трансформатора

$a$  - коэффициент распределения активного сопротивления обмоток между первичной и вторичной обмотками

$P_{\text{OUT}}$  - выходная мощность усилителя

$R_i$  - внутреннее сопротивление источника сигнала (т.е. в нашем случае - лампы)

$R_a$  - входное сопротивление трансформатора, являющегося анодной нагрузкой ламп

$R_n$  - сопротивление нагрузки трансформатора.

Кроме этого, должна быть задана требуемая ширина полосы пропускания и соответствующий ей коэффициент частотных искажений, максимальный сдвиг фаз в рабочей полосе, величина тока подмагничивания. В профессиональных расчетах также задаются допустимые искажения на некотором уровне и частоте сигнала.

Мы ограничимся заданием АЧХ в двух точках:  $F_n$  - нижняя и  $F_v$  - верхняя частоты среза по уровню -1 дБ (либо -3 дБ). Выбирая частоты среза 20 Гц и 20 кГц по уровню -1 дБ или даже -0,5 дБ, получаем фазовый сдвиг в звуковой полосе, не превышающий 90 градусов, и, следовательно, гарантию устойчивой работы усилителя на реактивную нагрузку. Трансформатор с такими параметрами может быть реализован в большинстве случаев.

Кроме этого, придется задать некоторые входные величины, исходя из практических соображений, т.к. расчет выходного каскада выходит за рамки статьи. В расчетах будут участвовать следующие величины:

$$n = \frac{N_2}{N_1} - \text{коэффициент трансформации,}$$

$r_0 = r_1 + r_2'$  - активное сопротивление обмоток трансформатора, являющееся суммой сопротивления первичной обмотки и приведенного (т.е. пересчитанного в первичную) сопротивления вторичной обмотки  $r_2'$ :

$$r_2' = r_2 \cdot n^2 - \text{активное сопротивление вторичной обмотки.}$$

$R_{\text{экв}}$  - эквивалентное сопротивление трансформаторного каскада.

$$\omega = 2\pi f - \text{круговая частота.}$$

Задаваемая величина КПД трансформатора сильно влияет на результаты расчета, поэтому в начале расчета воспользуемся рекомендациями Войшвилло [2]:

для $P_{\text{вых}}$	<1Вт	1 - 10	10 - 100
КПД	0,7-0,8	0,75-0,85	0,84-0,93

В духе современной идеологии звуковоспроизведения следует выбирать большие значения из диапазона. Особо стоит отметить случай применения низкоомных триодов, подобных 6С33С. Такие лампы работают с большими анодными токами. Поэтому требование высокого КПД приводит к большим сечениям провода первичной обмотки и в результате к большим габаритам трансформатора.

Коэффициент распределения сопротивления между обмотками обозначим  $a$ . Этот коэффициент определяет, какую долю сопротивления обмоток будет составлять сопротивление первичной обмотки. Обычно сопротивление первичной обмотки выбирают меньше половины общего сопротивления для того, чтобы снизить падение напряжения на первичной обмотке и улуч-

## AUDIO HIGH-END

шить режим работы лампы. И так  $r_1 = a \cdot r_0$ , коэффициент выбирается в пределах  $a=0,3...0,5$ .

Очень важным является выбор максимальной индукции в сердечнике  $B_m$ . Это - еще одна компромиссная величина, выбор которой является балансированием между размером сердечника и нелинейными искажениями на НЧ. Рекомендации [2] таковы:

$P_{\text{ВЫХ}}$ , Вт	1	3	10	30	100	300	1000	3000
$B_m$ , кГс	4	5	7	8	9	9	10	11

Опыт показывает, что в случае применения трансформатора в усилителе без ООС не стоит превышать индукцию 7-8 кГс (0,7... 0,8 Тл). Другими словами, есть резон уменьшить цифры в графе  $B_m$  на 1-2 пункта.

### Расчет:

Любитель-конструктор обычно ограничен в возможностях выбора магнитопровода. В связи с этим прежде всего необходимо оценить пригодность или подобрать подходящий сердечник из имеющихся в наличии. Для этого рассчитывается величина вспомогательного параметра  $G_{эл}$ , который представляет собой некую комбинацию задаваемых электрических параметров:

$$G_{эл} = \frac{29,8 \cdot 10^3 [1 - a(1 - \eta)] \cdot \sqrt{P_{OUT}}}{F_n \cdot B_m \cdot K_c \cdot \sqrt{a \cdot (1 - a) \cdot (1 - \eta) \cdot \eta} \cdot K_{ок}} \quad \text{для усилителя, работающего в классе А,}$$

литера, работающего в классе А,

$$G_{эл} = \frac{42,1 \cdot 10^3 (0,707 + \eta)}{F_n \cdot B_m \cdot K_c} \sqrt{\frac{P_{OUT}}{\eta \cdot (1 - \eta) \cdot K_{ок}}} \quad \text{для усилителя класса В. Индукцию следует подставлять в Гауссах, этот параметр выводится из формул, связывающих индукцию в сердечнике с мощностью, частотой среза, КПД, и т.п. Опуская промежуточные формулы, которые связывают индукцию с габаритными размерами и конструктивными особенностями трансформатора, приведем конструктивный параметр:}$$

Индукцию следует подставлять в Гауссах, этот параметр выводится из формул, связывающих индукцию в сердечнике с мощностью, частотой среза, КПД, и т.п. Опуская промежуточные формулы, которые связывают индукцию с габаритными размерами и конструктивными особенностями трансформатора, приведем конструктивный параметр:

$$G_{констр} = Sc \sqrt{\frac{S_{ок}}{l_0}},$$

все измерения - в сантиметрах, для броневых сердечников средняя длина витка  $l_0 \approx 2(a + b) + 2,9c$ .

Основное условие для выбора сердечника  $G_{констр} \geq G_{эл}$ . Выполнение этого неравенства гарантирует с одной стороны то, что индукция не превышает максимальную, а с другой стороны физическую реализуемость трансформатора. Другими словами, коэффициент заполнения окна не превысит заданную при расчете величину. Чем ближе электрический параметр к конструктивному, тем полнее используется окно магнитопровода. Если конструктивный параметр значительно превышает электрический, есть смысл увеличить КПД трансформатора.

После того, как сердечник выбран, можно приступить к расчету параметров обмоток. Для двухтактного и однотактного усилителей расчет ведется по-разному. В первом случае количество витков, как правило, определяется максимальной индукцией на низшей частоте. Во втором случае более сильным условием является получение необходимой индуктивности первичной обмотки.

### Расчет трансформатора для двухтактного усилителя

Сначала оценивается коэффициент трансформации

$$n = \sqrt{\frac{R_n}{\eta \cdot R_a}}, \quad \text{затем - ЭДС самоиндукции первичной обмотки}$$

$$E = \frac{1 + r_2 / R_n}{n} \sqrt{P_{OUT} \cdot R_n}.$$

Формула для количества витков первичной обмотки уже была приведена в первой части статьи:

$$N_1 = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \cdot Sc \cdot K_c \cdot F_n \cdot B_m}, \quad N_2 = N_1 \cdot n$$

(площадь в квадратных сантиметрах, индукция в Гауссах).

Диаметры проводов всех обмоток вычисляются через требуемое сопротивление:

$$d_i = \sqrt{\frac{2,23 \cdot 10^{-4} \cdot l_0 \cdot N_i}{r_i}}$$

Как правило, для уменьшения индуктивности рассеяния обмотки секционированы. Поэтому вторичная обмотка может быть выполнена из нескольких секций, соединенных параллельно или последовательно-параллельно. В этом случае диаметр провода следует уменьшить:

$$d_2' = \frac{d_2}{\sqrt{M_2}},$$

где  $M_2$  - количество параллельно включенных секций вторичной обмотки. В первом приближении расчет на этом заканчивается. Теперь можно оценить получившиеся электрические и конструктивные параметры и, при необходимости, скорректировать исходные данные. Эквивалентное сопротивление RL-цепи трансформаторного лампового каскада

$$R_{экс} = \frac{(R_i + r_i) \cdot (R_a - r_i)}{R_i + R_a}.$$

Легко запоминающиеся формулы для определения требуемой индуктивности первичной обмотки:

$\omega_n L_1 = R_{экс}$ , определяет индуктивность для получения нижней частоты среза  $\omega_n$  по уровню -3дБ

$\omega_n L_1 = 2R_{экс}$ , при таком определении спад на частоте среза составит 1 дБ. По возможности следует задавать индуктивность именно по уровню -1дБ. Трансформаторы для двухтактных усилителей, как правило, содержат больше витков, чем требуется для обеспечения заданной НЧ частоты среза, и фактическую индуктивность можно оценить по формуле:

$$L_{1факт} = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot N_1^2 \cdot Sc \cdot 10^{-8}}{l_c}$$

$\mu$  - динамическая магнитная проницаемость, величина, зависящая от амплитуды переменного магнитного поля,  $l_c$  - средняя длина магнитной силовой линии, [см].

С известной долей условности можно принять  $\mu=1000...1500$  при амплитуде магнитной индукции порядка 100 Гс.

Частота среза каскада при этом по уровню -1 дБ равна

$$F_n' = \frac{R_{экс}}{\pi \cdot L_{1факт}}$$

и может составлять единицы Гц. При попытке подать на каскад сигнал с частотой  $F_n'$  и амплитудой, равной номиналу для средних частот, наверняка произойдет мощная перегрузка трансформатора по магнитной индукции. Для того, чтобы избежать засорения сигнала гармониками на мощных НЧ пиках, следует предотвратить попадание на вход оконечного каскада составляющих с частотой, ниже расчетной  $F_n$ .

Заслуживает проверки идея уравнивания действительной и расчетной частот среза путем уменьшения фактической индуктивности обмотки. Это можно сделать путем внесения небольшого немагнитного зазора длиной  $l_z$ . Величину зазора можно определить по формуле для эффективной магнитной проницаемости:

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

Немного сложнее обстоит дело с расчетом поведения лампового усилителя в области высших звуковых частот. Уменьшение усиления трансформаторного каскада в этой части диапазона связано с влиянием индуктивности рассеяния  $L_s$  между первичной и вторичной обмоткой. Частота среза усилителя (по уровню  $-3$  дБ) составляет

$$F_{\theta} = \frac{R_i + R_a}{2\pi \cdot L_s}$$

Для высокоомных трансформаторов актуален еще один механизм возникновения частотных искажений. Дело в том, что индуктивность рассеяния и собственная емкость обмотки вместе с анодным и активным сопротивлением обмотки образуют последовательный резонансный контур с малой добротностью. Выше резонансной частоты усиление каскада быстро падает. В области резонанса усиление зависит от добротности цепи, которая может быть в небольших пределах уменьшена подключением резистора параллельно обмотке. Разумеется, такая коррекция влияет и на усиление в целом. Чаще всего таким образом корректируется АЧХ усилителей с межкаскадными трансформаторами.

В усилителях класса В индуктивность рассеяния является причиной появления нелинейных искажений высокого порядка.

Для борьбы с индуктивностью рассеяния применяется секционирование обмоток. Чаще всего секции первичной и вторичной обмоток наматываются по очереди на всю ширину каркаса. При таком расположении секций индуктивность рассеяния рассчитывается по известной формуле:

$$L_s = \frac{0.4\pi \cdot N_1 \cdot l_0 \cdot 10^{-8}}{m^2 h_n} \left( m\delta_u + \frac{A_1 + A_2}{3} \right),$$

где  $m$  – количество промежутков между слоями,  $h_n$  – высота намотки (для прикидок можно использовать высоту окна  $h$ ),  $A_1$  и  $A_2$  – толщина первичной и вторичных обмоток (суммарные),  $\delta_u$  – толщина межслойной изоляции. Чаще всего окно магнитопровода заполняется полностью, поэтому формулу можно упростить, заменив величину в скобках, которая называется приведенным расстоянием между обмотками, на  $(m\delta_u + c/3,2)$ .

Как видно из формул, секционирование является радикальным средством уменьшения индуктивности рассеяния. Однако, следует соблюдать меру, используя его. Дело в том, что при ци-

линдрическом секционировании увеличивается собственная емкость обмотки, и это может стать источником частотных искажений в случае применения высокоомных ламп. Для уменьшения собственной емкости обмоток применяется дисковое секционирование, подобное тому, которое используется в магнитных антеннах радиоприемников длинноволнового диапазона. Расчеты собственной емкости и индуктивности рассеяния были очень хорошо проработаны Норманом Кроухерстом и доступны на сайте Russ Sadd'a. В подавляющем большинстве случаев для усилителей, работающих в классе А, достаточно разбить первичную обмотку на 4 секции, а вторичную – на 4 или 5 секций, наматывающихся поочередно. Трансформаторы для мощных усилителей, работающих в классе В, лучше выполнять по следующей схеме: каркас разделяется перегородкой на две равные секции, в которые и наматываются половины первичных обмоток, причем направление намотки половинок должно быть противоположным. Сверху первичных наматываются половинки вторичной обмотки. Направления намотки вторичных обмоток должны совпадать с направлениями соответствующих половинок первичной обмотки. Затем, как обычно, половинки первичной обмотки соединяются последовательно (в данном случае – начало с началом), а вторичные – параллельно (начало одной – с концом другой и наоборот). Индуктивность рассеяния между половиной первичной обмотки и всей вторичной для такого трансформатора:

$$L_{sn} = \frac{0.4\pi \cdot (0.8 \div 0.9) \cdot N_1^2 \cdot l_0 \cdot 10^{-8}}{2h_n} \left( \delta_u + \frac{A_1 + A_2}{3} \right),$$

здесь  $h_n$  относится к высоте секции, а не всего каркаса.

Толщина межобмоточной изоляции для прикидок может быть принята равной 0,02...0,03 см, т.е. 2-3 слоя кабельной бумаги К-08 (толщина 0,08 мм). Для большинства применений этого количества изоляции достаточно (анодное напряжение порядка 400-500 вольт). Подробно о механических и электрических свойствах материалов, применяемых для целей изоляции, а также об обмоточных проводах можно узнать из [1] или на Web-странице автора.

*Литература:*

- [1] Р.Х.Бальян "Трансформаторы малой мощности": Ленинград, Судпромгиз, 1961 г.
- [2] монография Г.В.Войшилло "Усилители низкой частоты" издания 1953 г.

(Окончание следует)



В начале лета из Санкт-Петербурга пришло печальное известие о кончине от тяжелой болезни близкого мне и по увлечению, и по должности, и по возрасту Саши Белканова. Больно сознавать, что ряды самодельщиков-энтузиастов с профессиональными знаниями и тонкой интуицией поредели.

На следующей странице мы публикуем одну из вводных статей для журнала «Вестник Ассоциации Российских Аудиофилов», которая дает представление об Александре, как о главном редакторе, близком по духу нашему с вами Хобби.

Николай Сухов

Тяжелую утрату понес коллектив журнала «Вестник А.Р.А.». 15 мая 2000 года на 46-м году жизни после тяжелой продолжительной болезни скончался его основатель и главный редактор Александр Николаевич Белканов. Ушел из жизни человек, отдавший все творческие и душевные силы становлению и развитию своего дела.

Александр Белканов родился 6 сентября 1954 года в городе Сибай Башкирской АССР. Его детство прошло в г. Балхаш Казахской ССР. В 1975 году он поступил в Ленинградский институт киноинженеров на кафедру технической электроники. С 1980 по 1982 год работал на заводе «Вильма» в Вильнюсе мастером цеха по производству магнитофонов «Рута». В 1984 году он пришел в КБ бытовой радиоэлектроники завода им. Калинина на должность старшего инженера, где разрабатывал, внедрил в производство и впоследствии модернизировал одну из лучших моделей отечественных акустических систем 25АСЭ-101 «Статик». С 1988 по 1992 год работал в фирме «Медилен», участвовал в разработке ультразвукового хирургического скальпеля. В период с 1992 по 1996 год работал инженером в НПФ «Тепломаш». Позднее, осенью 1996-го года, работая в журнале «Салон AV», он основал свой журнал «Вестник А.Р.А.» и до последних дней был его главным редактором.

Человек неиссякаемой энергии, Александр Николаевич работал, не щадя сил, и требовал такого же отношения к работе от сотрудников. До последнего момента он трудился над выпуском очередного номера журнала и готовил материалы для следующего.

Выражаем искреннее соболезнование родным и близким покойного. Светлая память об Александре Николаевиче навсегда сохранится в наших сердцах.

Коллектив редакции журнала «Вестник А.Р.А.».



# 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 одноконтурных усилителей

Магнитопроводы одноконтурных 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 одноконтурных усилителей имеют большие габариты, чем для двухконтурных 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 одноконтурного 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 одноконтурных 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 одноконтурного 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  $\tau_{констр} \geq \tau_{эл}$

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

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:

$$L_1 = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot \mu_z \cdot N_1^2 \cdot Sc \cdot 10^{-8}}{l_c}, \text{ где } \mu_z = \frac{\mu}{1 + \mu \frac{l_z}{l_c}}$$

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



aw<sub>0</sub> – степень подмагничивания

шую магнитную проницаемость, однако, в большинстве случаев рассчитывать на это не приходится. В начале расчета величина  $aw_0$  и, соответственно,  $\mu_z$  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  $\mu_z$ , вместо графиков можно использовать аппроксимирующие уравнения:

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

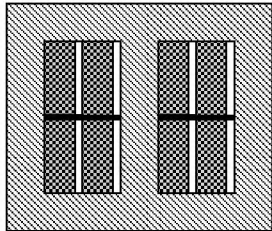
$$\mu_z(aw_0) = \frac{1600}{(aw_0 + 3)} + 120 \quad \text{для холоднокатаной стали.}$$

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 будет незначительным (несколько десятков). Если новое значение  $\mu_z$  больше старой  $\mu_{проб}$ , то  $\mu_{проб}$  следует увеличить так, чтобы она стала немного больше  $\mu_z$  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 зазора, которому соответствует найденная величина  $\mu_z$ . Эмпирическая формула для определения толщины прокладки в зазоре броневое магнитопровода  $\delta_z [мм] = 9 \cdot 10^{-4} N_1 \cdot I_0$ , однако лучше всего подобрать зазор экспериментально - по максимуму индуктивности первичной обмотки готового трансформатора.

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

## AUDIO HIGH-END

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  $\tau_{эд}$ . Расчет высокоомного межкаскадного трансформатора обязательно должен быть дополнен оценкой внутренней емкости обмоток. Конструктивных особенностей одноконтурных трансформаторов 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 ГМ-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 низкочастотные 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 заклеивается, 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			Гильза каркаса высокого напряжения	Зазор между каркасом высокого напр. и обмоткой низкого напр.	Расстояние от крайней щетки до края каркаса
	крайние щетки	средние щетки	изоляция между обмотками			
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 (след. колонка).

Самый распространенный вид изоляции - кабельная бумага. Электроизоляционная стойкость бумаги довольно высока. В выходных трансформаторах обычно применяются тонкие провода, редко более 1,5 мм. Поэтому бумага может применяться довольно тонкая - 0,8 мм. Если диаметр проводов превышает 1 мм, то и изоляция должна быть толще - 0,12, а то и 0,17 мм. Это связано с тем, что при перегибе и смятии 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

Название	Марка	Толщина	Пробивная электрическая прочность, кВ/мм		
			При толщине, мм	В исходном состоянии	После перегиба
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	-

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, 1961г
- [2] Г.В.Войничилло "Усилители низкой частоты", 1953г
- [3] Р.Х.Бальян "Трансформаторы для радиоэлектроники" М., Сов.радио., 1971г.

### Поправки к предыдущей части статьи («РХ» 4/00)

В формуле индуктивности рассеяния (левая колонка с.51) количество витков  $N_1$  должно быть в квадрате. Правильный вариант формулы:

$$L_S = \frac{0,4\pi \cdot N_1^2 \cdot l_0 \cdot 10^{-8}}{m^2 h_u} \left( m \delta_u + \frac{A_1 + A_2}{3} \right)$$

В правой колонке на с.49 выражение для активного сопротивления обмоток, пересчитанного в первичную обмотку, можно дополнить формулой

$$r_0 = (1 - \eta) \cdot R_a$$