

Наименование ОУ	Коэффициент усиления K_0	Сопрот. R_1 , Ом	Рвх., Ом	Граничная частота, МГц		$V_{\text{Увых}}$, 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 (с $K_0 = 2$), 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:

η - КПД трансформатора
 a - коэффициент распределения активного сопротивления обмоток между первичной и вторичной обмотками

P_{OUT} - выходная мощность усилителя

R_1 - 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

для Рвых	<1Вт	1 - 10	10 - 100
КПД	0,7-0,8	0,75-0,85	0,84-0,93

рекомендациями Войшвилло [2]:

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 улучшить

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 для 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:

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

литера, работающего в классе А,

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

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

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

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

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

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

(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 секционируются. 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

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

Легко запоминающиеся формулы для определения требуемой индуктивности первичной обмотки:

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

$\omega_n L_1 = 2R_{эkv}$, 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:

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

μ - 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

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

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_H .

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

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

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:

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

где m – количество промежутков между слоями, h_u – высота намотки (для прикидок можно использовать высоту окна h), A_1 и A_2 – толщина первичной и вторичных обмоток (суммарные), δ_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 Sudd'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:

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

здесь h_u 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. Войшвилло "Усилители низкой частоты" издания 1953 г.



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.».