

Менно Вандервин (Menno Van Der Veen) родился в Нидерландах в 1949г. и получил образование в Гронингемском Университете по специальности «Физика и Электроника». Большую часть своей жизни он посвятил исследованию вопросов, связанных с высококачественным воспроизведением звука и проектированию усилительных устройств. Менно Вандервин является автором более чем 350 статей, связанных с этими проблемами. Возглавляемая им консультационная компания R&D, основанная в 1986г., проводит фундаментальные исследования в областях: проектирования ламповых усилителей и выходных трансформаторов, цифрового воспроизведения звука, разделительных фильтров для громкоговорителей, электростатических громкоговорителей.

Я хочу выразить глубокую благодарность Менно Вандервину за любезное разрешение перевести и опубликовать эту статью на сайте [NexTube](#). В настоящее время в русскоязычной литературе фактически отсутствует информация о современных методиках проектирования выходных трансформаторов для ламповых усилителей.

Основным источником информации служат книги 30 – 50 летней давности, которых явно недостаточно для решения задач звуковоспроизведения, соответствующих современным требованиям. К сожалению, большинство современных русскоязычных публикаций также базируются на этих книгах и не содержат ничего нового. Достаточно прочесть классический учебник Цыкина, и 95% статей можно не читать - в лучшем случае, Вы не узнаете ничего нового, в худшем - будете введены в заблуждение ошибочными выводами. Придание вопросу проектирования выходных трансформаторов некоего мистического оттенка можно объяснить или маркетинговыми соображениями или тем, что авторы просто не владеют технической стороной вопроса.

В статье совершенно ясно показано, что характеристиками системы «выходные лампы – выходной трансформатор – нагрузка» можно эффективно управлять. Возможно, теоретическая часть статьи покажется некоторым читателям несколько сложной, но ничего не мешает Вам воспользоваться конечными выводами и формулами, приведенными в статье, для Вашей работы.

Евгений Карпов

## ТОРОИДАЛЬНЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ВЫХОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ - ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Представлено на 97-ом съезде AES, 1994г, 10-13 ноября Сан-Франциско

**MENNO VAN DER VEEN**, член AES.

it. buro Vanderveen, The Netherlands fax: xx31-38-4533-178, e-mail. [mennovdv@noord.bar1.nl](mailto:mennovdv@noord.bar1.nl)

Частотный диапазон и переходная характеристика выходных трансформаторов, используемых в ламповых усилителях, определяются как параметрами трансформатора, так и полными сопротивлениями источника и нагрузки.

В статье обсуждаются общие вопросы теории трансформаторов и методика вычисления частотного диапазона и переходной характеристики трансформатора в зависимости от режима работы выходных ламп и нагрузки. Введен новый параметр - **Частотный Декадный Коэффициент**, учитывающий влияние изменения полных сопротивлений источника сигнала и нагрузки, и произведено его сравнение с хорошо известным параметром – **Коэффициентом Качества**. Рассмотрена новая конструкция тороидального выходного трансформатора с шириной полосы пропускания по уровню -3dB от 0.3Hz до 250kHz.

## 1-1 ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ ВОЗВРАЩАЮТСЯ

Ламповые усилители снова привлекают внимание аудиофилов (лит. 1,2,3,4). В течение нескольких последних десятилетий, в основном, разрабатывались и получили широкое распространение полупроводниковые усилители. Однако ламповые усилители никогда полностью не исчезали, а просто отошли на второй план. Несмотря на хорошие качества полупроводниковых усилителей, много компаний начали снова разрабатывать ламповые усилители из-за свойственной им теплоты и мягкости звука и возрастающего интереса потенциальных заказчиков. Почти каждый месяц на рынке высококачественного воспроизведения появляются новые ламповые усилители (см., например, лит. 4). В большинстве этих усилителей в выходных каскадах используются выходные трансформаторы для согласования низкого импеданса динамика (ниже 10 Ом) с высоким импедансом выходных ламп (в среднем, более 1000 Ом). Хотя возможно создание (лит. 5) ламповых бестрансформаторных усилителей (OTL), большинство проектировщиков предпочитают трансформаторные выходные каскады.

## 1-2 ЦЕЛЬ СТАТЬИ

В этой статье будут рассмотрены вопросы взаимосвязи между необходимыми параметрами выходного трансформатора и параметрами выходных ламп, также будет рассмотрен новый тип широкополосного, тороидального трансформатора. Особое внимание будет уделено вопросу частотного диапазона системы выходной трансформатор - выходные лампы. Для этой цели вводятся новые параметры, характеризующие трансформатор, а именно - **Коэффициент настройки (TF)** и **Частотный Декадный Коэффициент (FDF)**. Здесь не будут рассматриваться какие-либо варианты схемных решений выходного каскада или его частотные свойства, не связанные с выходным трансформатором. Предполагается, что любые частотные ограничения являются следствием взаимодействия выходного трансформатора, выходных ламп и нагрузки. С примерами схемных решений и общими вопросами проектирования ламповых усилителей можно ознакомиться в публикациях 1,2,3,5,6,10.

## 1-3 ВЫХОДНАЯ ЛАМПА КАК ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ?

Для дальнейших рассуждений целесообразно заменить выходную лампу (лампы) упрощенной эквивалентной схемой. На Рисунке 1-1 показаны анодные характеристики хорошо известной выходной лампы типа EL34 или 6CA7 в пентодном режиме. Используются ли две лампы (двухтактная схема) или одна лампа (однотактная схема), режим лампы (ламп) характеризуется некоторой рабочей точкой

(точка А на рисунке 1-1). В этой рабочей точке лампа (лампы) может быть заменена эквивалентным источником переменного напряжения  $V_p$  с последовательно включенным выходным сопротивлением  $R_g$ . Для однотактного каскада  $R_g$  эквивалентно внутреннему сопротивлению лампы -  $r_i$ . Для двухтактной схемы, работающей в классе А,  $R_g$  равняется  $2 \cdot r_i$ . Когда двухтактная схема реализована на катодных повторителях,  $R_g$  равняется  $2 \cdot 1/s$  (лит. 7). Возможно рассматривать лампу и как источник тока с параллельно включенным сопротивлением  $R_g$ . Использование обеих типов моделей лампы приводит к одинаковым результатам, однако замена лампы источником напряжения позволяет упростить вычисления, и такая модель предпочтительней.

## 1-4 СОГЛАСОВАНИЕ ИМПЕДАНСОВ

Выходные лампы нагружены на импеданс первичной обмотки выходного трансформатора -  $R_{aa}$ , который, главным образом, определяется приведенным импедансом динамика  $Z_L$ . Нагрузочная линия также показана на рисунке 1-1 и обозначена  $1/R_{aa}$ . Если число первичной обмотки равно  $N_p$ , а вторичной  $N_s$ , то коэффициент трансформации  $T$  определяется следующим соотношением:

$$T = \frac{N_s}{N_p} \quad (1-1)$$

Зависимость между  $R_{aa}$  и  $Z_L$  определится соотношением:

$$R_{aa} = \frac{Z_L}{T^2} \quad (1-2)$$

Максимальная мощность от выходных ламп к нагрузке передается, если общее сопротивление выходных ламп ( $R_g$ ) равно  $R_{aa}$ . Однако этот критерий используется не всегда. Поэтому определим коэффициент нагрузки ( $\beta$ ) как:

$$\beta = \frac{R_g}{R_{aa}} \quad (1-3)$$

В большинстве ламповых усилителей величина  $\beta$  больше 1. В усилителях с выходными каскадами на триодах величина  $\beta$  почти равна или немного меньше 1.

## 1-5 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА

Существует большое количество эквивалентных схем трансформатора, и их обзор дан в лит.8. В ламповых усилителях выходной трансформатор является понижающим, и число витков  $N_p$  больше  $N_s$ . Эквивалентная схема трансформатора показана на рисунке 1-3 (смотрите также список условных обозначений). В ней все элементы первичной стороны, влияющие на частотные характеристики трансформатора в области высоких и низких частот, а также

выходное сопротивление ламп  $R_g$  (выходное сопротивление генератора модели), приведено ко вторичной стороне, где подключена нагрузка  $Z_L$  (громкоговоритель).

Эта схема будет базовой для проведения анализа. Эту эквивалентную схему можно улучшить, например, более совершенные схемы предложил Flanagan (лит. 8). Однако это не целесообразно делать по двум причинам. Во-первых, результаты вычислений по этой простой схеме обеспечивают хорошее соответствие с измеренными значениями для рассматриваемых далее тороидальных трансформаторов (совпадение более чем 90 %). Во-вторых, простота этой схемы упрощает понимание вопроса, как влияют конструктивные параметры на частотный диапазон выходного трансформатора в ламповом усилителе.

## 2 ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ

Полная передаточная функция для схемы, показанной на рисунке 1-3, определяется формулой 2-1, где  $\omega$  – круговая частота.

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \frac{V_{load}}{V_p} \\ H(\omega) &= T * I_{los} * L * H \\ I_{los} &= \frac{Z_L}{(R_g + R_{ip})T^2 + R_{is} + Z_L} \\ L &= \frac{i\omega}{i\omega + \frac{(R_g + R_{ip})T^2(R_{is} + Z_L)}{[(R_g + R_{ip})T^2 + R_{is} + Z_L]L_p T^2}} \\ H &= \frac{1}{1 + a2\left(i\frac{\omega}{\omega_0}\right) + \left(i\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 T^2} \end{aligned} \quad (2-1)$$

где:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(R_g + R_{ip})T^2 + R_{is} + Z_L}{R_g T^2 L_{sp} C_{ip}}} \quad (2-2)$$

$$a2 = \omega_0 \frac{L_{sp} T^2 + C_{ip} R_g (R_{ip} T^2 + R_{is} + Z_L)}{(R_g + R_{ip})T^2 + R_{is} + Z_L} \quad (2-3)$$

Передаточная функция содержит четыре члена, каждый из которых описывается своей собственной функцией и оказывает свое специфическое влияние.

**Первый член «Т»** – определяет коэффициент трансформации первичного напряжения  $V_p$  на вторичную сторону трансформатора.

**Второй член « $I_{los}$ »** – определяет потери в трансформаторе из-за внутренних сопротивлений первичной и вторичной обмоток. Также, сюда включаются потери, связанные с наличием внутреннего сопротивле-

ния источника сигнала  $R_g$  и с импедансом нагрузки  $Z_L$ . Этот элемент передаточной функции аналогичен «внесенным потерям», хорошо известному параметру, описывающему трансформатор (лит. 8).

**Третий член «L»** – описывает фильтр верхних частот первого порядка, образованный «эквивалентным сопротивлением» и индуктивностью первичной обмотки  $L_p$ . Этот член определяет поведение трансформатора в области нижних частот.

**Четвертый член «H»** описывает фильтр низких частот второго порядка, параметры которого определены резонансной частотой  $\omega_0$  (формула 2-2) и коэффициентом  $a2$  (какого то специального названия для этой величины в теории фильтров нет), вычисляемым по формуле 2-3. Вместо коэффициента  $a2$  часто используется понятие добротности ( $Q$ ), величина  $a2$  и  $Q$  связаны формулой  $a2 = 1/Q$  (в общем случае величина  $a2$  характеризует затухание в звене второго порядка).

К счастью, для расчета реального трансформатора передаточную функцию можно упростить. Во-первых, можно использовать полученное в первой главе значение  $\beta$ . Во-вторых, измерение параметров различных выходных трансформаторов позволяет сделать вывод, что для большинства из них выполняются условия  $R_{ip} \ll R_g$  и  $R_{is} \ll Z_L$ . Поэтому возможно пренебречь сопротивлениями обмоток в уравнениях, так как это не приведет к существенному возрастанию погрешностей. Теперь передаточную функцию можно представить следующим образом:

$$H(\omega) = T * \left[ \frac{1}{1 + \beta} \right] * \left[ \frac{i\omega}{i\omega \frac{\beta}{\beta + 1} \frac{R_{aa}}{L_p}} \right] * \left[ \frac{1}{1 + a2\left(i\frac{\omega}{\omega_0}\right) + \left(i\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \right] \quad (2-4)$$

уравнение, определяющее  $\omega_0$ , также упрощается:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{sp} C_{ip}}} \sqrt{\frac{\beta + 1}{\beta}} \quad (2-5)$$

Соответственно, теперь соотношение, определяющее  $a2$ , примет вид:

$$a2 = \omega_0 \frac{\frac{L_{sp}}{R_{aa}} + C_{ip} \beta R_{aa}}{\beta + 1} \quad (2-6)$$

Для дальнейшего анализа удобно выразить  $a2$  по-другому. Для этого вводится новый параметр  $\alpha$ , и  $a2$  становится его функцией (формулы 2-7 и 2-8).

$$a2 = \alpha \sqrt{\frac{1}{\beta(\beta + 1)}} + \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{\beta}{\beta + 1}} \quad (2-7)$$

$$\alpha = \frac{1}{R_{aa}} \sqrt{\frac{L_{sp}}{C_{ip}}} \quad (2-8)$$

Использование формул 2-4 - 2-8, существенно облегчает вычисление передаточной функции. Однако необходимо отметить, что для проведения точного анализа без каких-либо упрощений, необходимо использовать формулы 2-1 - 2-3. Это вполне оправдано при использовании для вычислений компьютера.

### 3 РАСЧЕТ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ПО УРОВНЮ -3dB

В этой главе рассматривается вопрос расчета ширины полосы пропускания по уровню -3dB для системы трансформатор - выходные лампы. Из передаточной функции исключены члены, определяющие коэффициент трансформации и потери, так как они являются (считаются) частотно-независимыми.

#### 3-1 ОБЛАСТЬ НИЗКИХ ЧАСТОТ

Нижнюю частоту, передаваемую трансформатором по уровню -3dB, можно определить непосредственно из передаточной функции (формула 3-1).

$$f_{-3L} = \frac{R_{aa}}{2\pi L_p} \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (3-1)$$

Как и предполагалось, нижняя частота определяется индуктивностью первичной обмотки  $L_p$ , импедансом первичной обмотки  $R_{aa}$  и коэффициентом нагрузки  $\beta$ .

#### 3-2 ОБЛАСТЬ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Вычислить значение верхней частоты, передаваемой по уровню -3dB, более сложно, так как передаточная функция  $H$  имеет два полюса. Вычисления производят в два этапа. Сначала вычисляется коэффициент передачи фильтра второго порядка в комплексном виде, затем определяется значение частоты по уровню передачи -3dB. Для этого находят частоту, при которой коэффициент передачи равен  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  (формулы 3-2, 3-3).

$$f_{-3H} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{sp} C_{ip}}} * \left[ f(a2) \sqrt{\frac{\beta + 1}{\beta}} \right] \quad (3-2)$$

$$f(a2) = \sqrt{\frac{(2 - a2^2) + \sqrt{(a2^2 - 2)^2 + 4}}{2}} \quad (3-3)$$

На рисунке 3-1 показана зависимость функции  $f(a2)$  от величины  $a2$ . Большинство выходных трансформаторов имеют добротность 0.5 - 1 ( $a2$  соответственно изменяется между 2 и 1).

В этом диапазоне добротностей функция  $f(a2)$  - практически прямая линия и может быть аппроксимирована линейной функцией  $ff(a2)$  с погрешностью, не превышающей 5 %.

$$ff(a2) = 1.95 - 0.668a2 \quad 1 < a2 < 2 \quad (3-4)$$

Эта функция может быть легко рассчитана вручную, но для точных вычислений без использования ап-

проксимации функции  $f(a2)$  необходимо использовать компьютер.

### 4 КОЭФФИЦИЕНТ НАСТРОЙКИ И ЧАСТОТНЫЙ ДЕКАДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Теперь будет определен смысл **Коэффициента Настройки**. Показано как, используя **Коэффициент Настройки** и **Коэффициент Качества трансформатора**, вычислить полосу пропускания по уровню -3dB. Также будет определен смысл **Частотного Декадного Коэффициента** и показано, что он связывает между собой коэффициенты **Настройки** и **Качества**.

#### 4-1 КОЭФФИЦИЕНТ НАСТРОЙКИ

Если разделить выражение 3-2 на выражение 3-1, мы сопоставим коэффициент передачи в области высших частот с коэффициентом передачи в области нижних частот по уровню -3dB. В результате будет получено следующее выражение:

$$\frac{f_{-3H}}{f_{-3L}} = f(a2) * \left[ \frac{\beta + 1}{\beta} \right]^{1.5} * \left[ \frac{1}{R_{aa}} \sqrt{\frac{L_{sp}}{C_{ip}}} \right] * \left[ \frac{L_p}{L_{sp}} \right] \quad (4-1)$$

Анализ этой формулы дает несколько интересных результатов.

**Первый член** определяет параметры фильтра (Q- или  $a2$ - коэффициент) в области высоких частот.

**Второй член** отражает влияние выходного сопротивления генератора  $R_g$  (лампы) и импеданса нагрузки  $Z_L$  на полосу частот по уровню -3dB.

**Третий член** учитывает влияние отношения характеристического импеданса первичной обмотки  $Z_{ip}$ , (формула 4-2) к импедансу первичной обмотки  $R_{aa}$  (определяемому значениями  $Z_L$  и  $T$ ).

$$Z_{ip} = \sqrt{\frac{L_{sp}}{C_{ip}}} \quad (4-2)$$

**Четвертый член** - хорошо известный параметр трансформатора, **Коэффициент Качества** (см., например, лит. 10), определенный как:

$$QF = \frac{L_p}{L_{sp}} \quad (4-3)$$

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующий вывод, что первые три члена в выражении 4-1 определяют условия использования трансформатора. А именно, какая величина нагрузки трансформатора, какое выходное сопротивление ламп выходного каскада и какая выбрана величина добротности трансформатора.

Таким образом, первые три члена выражения 4-1 определяют настройку трансформатора на известные условия использования. По этой причине целесообразно объединить их в один параметр - **КОЭФФИЦИЕНТ НАСТРОЙКИ**. Следовательно, **Коэффициент настройки** равен:



$$TF = f(a2) \left[ \frac{\beta + 1}{\beta} \right]^{1.5} \left[ \frac{Z_{ip}}{R_{aa}} \right] \quad (4-4)$$

Учитывая вновь введенные обозначения, значение полосы пропускания трансформатора по уровню -3dB можно определить следующим образом:

$$\frac{f_{-3H}}{f_{-3L}} = TF * QF \quad (4-5)$$

## 4-2 ВЛИЯНИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ НАСТРОЙКИ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Первоначально, исследовалось влияние на величину Коэффициента Настройки выходного сопротивления каскада в зависимости от топологии усилительного каскада и типа используемых ламп. Следовательно, изменялась только величина  $R_g$  при постоянном значении  $R_{aa}$  (это подразумевает, что коэффициент трансформации  $T$  и нагрузка  $Z_L$  не изменяются). На рисунках 4-1, 4-2 и 4-3 показаны результаты этих измерений при изменении  $\beta$  от .1 до 10, и для значений  $\alpha$  0.5, 1 и 2 соответственно. Изменение добротности ( $= 1/a2$ ;) для этих режимов показано на тех же рисунках (правая шкала).

Также исследовалось влияние изменения нагрузки на **Коэффициент Настройки**. Результаты измерений показаны на рисунках 4-4, 4-5 и 4-6. Рисунок 4-4 соответствует режиму  $Z_L=1$  Ом и  $R_g=R_{aa}$ , что почти эквивалентно симметричному двухтактному каскаду на триодах, возбуждающему выходной трансформатор. Рисунок 4-5 соответствует режиму  $Z_L=1$  Ом и  $R_g=3*R_{aa}$  (почти эквивалентно ультралинейной схеме выходного каскада). Рисунок 4-6 соответствует режиму  $Z_L=1$  Ом и  $R_g=10*R_{aa}$  (двухтактный выходной каскад на пентодах). Для величины  $Z_L=1$  Ом, было принято, что  $\alpha = 1$ .

### Выводы:

1) при различных значениях величины нагрузки и затухания **Коэффициент Настройки** подвержен значительным изменениям (приблизительно, от 0.1 до 10). Это определяет частотный диапазон выходного трансформатора по уровню -3dB для любого варианта использования. Следовательно, величина **Коэффициента Качества** близкого к единице - недостаточна.

2) величина добротности трансформатора удивительно стабильна на рисунке 4-1. Вычисления показывают, что если  $\alpha = 0.65$ , то значение добротности остается постоянным и равно 0.66 при  $\beta > 1$ .

3) довольно стабильная частотная характеристика, почти независимая от выходного сопротивления ламп, получается при  $\alpha > 2$  (рисунок 4-3).

4) для выходного каскада на пентодах (рисунок 4-6) величина коэффициента  $a2$  быстро падает при увеличении импеданса нагрузки. На практике встречаются динамики, у которых импеданс растет в области высоких частот (из-за индуктивности катушки

динамика). Это частично объясняет, почему некоторые ламповые усилители плохо воспроизводят верхние частоты при использовании подобных динамиков.

## 4-3 ЧАСТОТНЫЙ ДЕКАДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

При вычислении отношения  $f_{3H}/f_{3L}$  стремятся получить максимальное значение, но что полученная величина значит? Мы получаем ширину полосы пропускания трансформатора по уровню -3dB. Представление этой величины в логарифмическом виде существенно упрощает ее вычисление и интерполирование. В таком виде полученное значение прямо определяет количество ДЕКАД, перекрываемых трансформатором в заданных режимах. По этой причине целесообразно определить **ЧАСТОТНЫЙ ДЕКАДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ** следующим образом:

$$FDF = \log \frac{f_{-3H}}{f_{-3L}} \quad (4-6)$$

После преобразования получим:

$$FDF = \log(TF * QF) = \log(TF) + \log(QF) = TDF + QDF \quad (4-7)$$

Введем новые параметры **ДЕКАДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ НАСТРОЙКИ**

$$TDF = \log(TF) \quad (4-8)$$

и **ДЕКАДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА:**

$$QDF = \log(QF) \quad (4-9)$$

Теперь с помощью нескольких примеров покажем полезность этих коэффициентов.

## 4-4 ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО ДЕКАДНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

**Пример 1:** Допустим  $L_p=100H$  и  $L_{sp}=5mH$ . Тогда  $QF=20,000$ . Вычислив **Декадный Коэффициент Качества**, определим **Частотный Декадный Коэффициент**. В этом случае, полоса трансформатора перекрывает 4 30 декады. Подстройка параметров трансформатора позволяет расширить рабочий диапазон. Если использовать Баттервортовскую аппроксимацию фильтра (максимально плоская полоса пропускания), для которой  $a2 = \sqrt{2}$  и  $\alpha = 1$  (при условии, что  $\beta = 1$ ), то Коэффициент Настройки будет равен 2,83 и, соответственно, **Декадный Коэффициент Настройки** станет равен 0.452. В этом случае ширина полосы трансформатора увеличится до 4.75 декады. Предположим, что  $f_{3L}=1.0$  Гц, тогда от  $f_{3H} = 10^{4.75} = 56$  кГц. В дальнейшем будет показано, что для  $R_{aa} = 1.257$  kOhm, емкость  $C_p$  должна быть равна 3.16 nF.

**Пример 2;** при использовании того же самого трансформатора ( $\alpha=1$ ) рассчитаем параметры, соответствующие оптимальной переходной характеристике ( $a2=\sqrt{3}$ ). В этом случае  $\beta = 0.5$  (формула 2-7). Коэффициент Настройки равняется 4.12 и

$TDF = 0.61$ . Теперь количество перекрываемых декад –  $FDF = 4,91$ . Используя формулы из главы 3, вычислим значения  $f_{3L}$  и  $f_{3H}$ , которые соответственно равны 0.67 Гц и 55 кГц. Так как  $\alpha$  равна 1, емкость  $C_{1p}$  не изменилась и должна быть равна 3.16 пФ. Однако теперь выходное сопротивление генератора  $R_g$  должно быть равно 629 Ом. Сравнение полученных результатов с результатами первого примера указывает, что число выходных ламп надо удвоить. Неожиданным результатом этих вычислений является отсутствие влияния уменьшения величины  $R_g$  на полосу в области высоких частот и уменьшение нижней частоты по уровню -3dB!

#### 4-5 ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕКАДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Причины использования **Декадного Коэффициента Настройки** и **Частотного Декадного Коэффициента** следующие:

1) До сих пор **Коэффициент Качества** использовался как критерий "качества" трансформатора. Большие значения **QF** соответствуют лучшему трансформатору и, соответственно, более широкой полосе частот, которую он передает. Ранее выпускавшиеся трансформаторы имели значение **QF** в пределах 20.000 - 70.000 (лит. 10). В настоящее время трансформаторы имеют значение **QF** достигающее 146.000 (100/.000685; см. лит. 1). В главе пять описаны новые тороидальные широкополосные выходные трансформаторы со значениям **QF** - 274.000 (360/.001312). Использование **Декадного Коэффициента Качества** позволяет более реалистично оценить влияние возросших значений **QF** на достижимую полосу частот ( по уровню -3dB), передаваемую трансформатором.

2) Любой трансформатор может быть "настроен" различными способами. Различные значения **TF** можно получить, изменяя параметры  $Z_L$  или  $R_g$ . Например, добиться повышения **TF** можно, уменьшая величину  $R_g$  или  $Z_L$ . Влияние изменения различных параметров на ширину полосы пропускания непосредственно отражается на **Декадном Коэффициенте Настройки** (**Коэффициенте Настройки**) и дает возможность быстрой оценки ее изменения.

3) Величина **Частотного Декадного Коэффициента** непосредственно определяет ширину полосы частот для выходного трансформатора, используемого в данных условиях. Другими словами, если значение **FDF** равно 6, подразумевается, что мы будем иметь полосу частот от 1 Гц до 1 МГц или от 10 Гц до 10 МГц и т.д.,

#### Выводы:

а) Параметр **QF** определяет то, каких параметров можно достичь с этим трансформатором, не используя настройку. Преобразовав **QF** в **QDF** мы получим

величину, характеризующую достижимую ширину частотного диапазона этого трансформатора. Величина **QDF** является удобным параметром для сравнения различных типов трансформаторов.

б) Параметр **TF** хорошо характеризует качество трансформатора в области высоких частот. Параметр **TDF** определяет, какое дополнительное расширение частотного диапазона возможно при использовании различных настроек.

с) Параметр **FDF** непосредственно определяет полный частотный диапазон трансформатора по уровню -3dB.

#### 5 НОВЫЕ ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫЕ ВЫХОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В этой главе описан новый тороидальный выходной трансформатор для ламповых усилителей. В соответствии с методикой приведенной выше, будут определены его параметры и приведены необходимые разъяснения.

##### 5-1 ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ

В 1984 была сделана первая попытка создания тороидального выходного трансформатора для двухтактных ламповых усилителей. В результате получилась простая конструкция с довольно хорошими техническими параметрами. Дальнейшие исследования показали, что оптимизированная конструкция тороидального трансформатора будет обладать рядом преимуществ по сравнению с трансформаторами, выполненными на Ш и стержневых сердечниках. Использование тороидального сердечника и применение специальных методов намотки позволило обеспечить очень сильную магнитную связь между первичной и вторичной обмотками. Соответственно уменьшилось значение индуктивности рассеяния. Также было достигнуто большое значение индуктивности намагничивания первичной обмотки  $L_p$ . Высокое значение индуктивности  $L_p$  и маленькое значение  $L_{sp}$  дает возможность получить очень большой **Коэффициент Качества**.

Малые величины паразитной емкости  $C_{1p}$  также обеспечивались за счет применения специальных методов намотки и тщательно рассчитанного секционирования.

Выходная мощность новых трансформаторов лежит в диапазоне от 20 до 100 Ватт с нижней рабочей частотой по уровню -3dB между 20 и 30 Гц на большой мощности. Однако значение  $f_{3L}$  - близко к 1 Гц (имеются в виду малосигнальные параметры) из-за высоких значений  $L_p$  (см. рисунок 5-1). Трансформаторы имеют высокую степень симметрии. Например, индуктивность рассеяния половины первичной обмотки относительно другой имеет малое значение и почти равна индуктивности рассеяния всей пер-

вичной обмотки, что свидетельствует о высокой степени симметричности. Высокая степень симметрии позволяет реализовать мощные трансформаторы с относительно небольшими сердечниками без риска его насыщения.

По сравнению с трансформаторами предыдущих разработок, были получены следующие преимущества: большая индуктивность первичной обмотки, более сильная магнитная связь между обмотками, меньшая индуктивность рассеяния при аналогичных или даже уменьшенных значениях емкостей обмоток, высокая степень симметрии. За счет использования магнитных материалов с пониженными потерями (особенно в области высоких частот) были снижены потери в сердечнике, также были снижены тепловые потери в обмотках за счет их более низкого сопротивления.

## 5-2 ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

На настоящий момент (1994) выпускаются пять стандартных типов выходных трансформаторов с импедансом первичной обмотки в диапазоне от 1 до 8 kOhm. Их параметры приведены в таблице 5-1. Трансформаторы снабжены отводами, что позволяет их использовать для каскадов с ультралинейной схемой включения ламп, также они пригодны для выходных каскадов, выполненных на триодах и пентодах. Все типы трансформаторов предназначены для использования в двухтактных схемах.

Рассмотрим подробнее параметры модели с самым низким импедансом первичной обмотки - VDV1080, параметры других моделей также приведены в таблице 5-1. Использование методики, описанной в разделах 1 – 4, позволяет произвести расчет параметров для других моделей трансформаторов.

## 5-3 ИМПЕДАНС СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ И ОТВОДЫ

Трансформаторы оптимизированы для использования совместно с динамиками сопротивлением 5 Ом. Вследствие того, что полное сопротивление динамика изменяется с частотой (см. например рисунок 5-2), такое значение импеданса нагрузки было выбрано, чтобы иметь возможность использовать большинство широкодоступных динамиков. По специальному запросу возможно выполнение трансформаторов с отводами, оптимизированными для другого импеданса нагрузки. Отвод в середине вторичной обмотки позволяет использовать трансформатор в схемах с катодной обратной связью и использовать симметричные цепи обратной связи.

## 5-4 КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА И ДЕКАДНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КАЧЕСТВА

Измерение величины индуктивности первичной обмотки  $L_p$  производилось при приложении к

обмотке напряжения 200 V с частотой 50 Гц, или 240 V с частотой 60 Гц (это соответствует одинаковой величине магнитной индукции в сердечнике). Также проводились измерения  $L_p$  при больших и меньших значениях первичного напряжения. В этом случае величина  $L_p$  изменяется незначительно относительно своего номинального значения, это объясняется изменением относительной магнитной проницаемости, являющейся функцией напряженности магнитного поля.

Вычисленное значение **Коэффициента Качества** равно 274,390.

Вычисленное значение **Декадного Коэффициента Качества** равно 5.44. Используя данный трансформатор, если все настроено должным образом, мы можем, по крайней мере, ожидать, что будет открыто 5.44 декады по частоте.

## 5-5 СОПРОТИВЛЕНИЕ ОБМОТОК

Полученные значения сопротивлений  $R_{ip}$  и  $R_{is}$  равны 37.8 и 0.16 Ом соответственно. Если выходное сопротивление каскада  $R_g$ , нагруженного на трансформатор, равно 1200 Ом, то тепловые потери в первичной обмотке не превысят 3 %, также не превысят 3 % потери во вторичной обмотке. При проведении дальнейших вычислений мы этими потерями пренебрегаем, и будем использовать простую формулу 2-4. Также воспользуемся линейной аппроксимацией  $ff(a2)$ .

## 5-6 ВЫЧИСЛЕНИЕ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ ПО УРОВНЮ -3dB

В этом трансформаторе величина  $C_{ip}$  выбрана так, чтобы характеристический импеданс первичной обмотки ( $Z_{ip}$ ) был почти равен ее импедансу. Вычисленное значение  $Z_{ip}$  - 1487 Ома, со вторичной стороны трансформатор нагружен сопротивлением 5 Ом, соответственно, нагрузка, приведенная к первичной обмотке  $R_{aa}$ , равна 1239 Ом. Значение  $\alpha$  равно 1.200 и, следовательно,  $\beta$  будет равно 0.969. По формуле 2-7 величина  $a2 = 1.453$  и  $Q = 0.688$ . Это - разумный компромисс между вариантом настройки на максимально плоскую частотную характеристику ( $Q = 0.577$ ) и Баттервортовской характеристикой ( $Q = 0.707$ ).

Из формулы 3-4 получим значение функции  $ff(a2)$  равное 0.979. Теперь можно вычислить значение **Коэффициента Настройки** ( $TF = 3.40$ ) и **Декадного Коэффициента Настройки** ( $TDF = 0.53$ ). Имея значения **Декадного Коэффициента Качества** и **Декадного Коэффициента Настройки**, вычисляем количество декад, перекрываемых трансформатором в частотной области, которое равно 5.97. Воспользовавшись формулами 3-1 и 3-2, определим низшую и высшую частоту, передаваемую трансформатором по



уровню -3dB, которые соответственно равны - 0.270 Гц и 252 кГц.

Если повторить все вычисления, не используя каких - либо упрощений, то мы получим значения частот 0.278 Гц и 251 кГц, соответственно. Использование аппроксимации  $f(a_2)$  и пренебрежение сопротивлениями  $R_{ip}$  и  $R_{is}$  приводит к незначительной ошибке в 2.9 % и 0.4 % соответственно. (См. рисунок 5-1).

Дальнейшие вычисления ширины полосы по уровню -3dB с использованием аппроксимации и без нее дают следующие результаты:  $^{10}\log(f_{3H}/f_{3L}) = 5.97$  и 5.96 декад соответственно, показывая отличное совпадение.

На рисунке 5-3 показаны расчетные (без аппроксимации) и измеренные частотные характеристики трансформатора. Измерения проводились в схеме замещения, показанной на рисунке 5-4, выходное сопротивление генератора  $R_g$  моделируется двумя сопротивлениями  $0.5.R_g$ , включенными последовательно с половинками первичной обмотки, на вход подавался сигнал с генератора с размахом 20V.

## 6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Ламповые усилители снова начинают интересовать потребителей. По этой простой причине очень важно заново изучить старые технологии, использовать накопленный ценный опыт и объединить его с современными технологиями. Мы попытались использовать этот подход, когда разрабатывались и создавались наши новые тороидальные выходные трансформаторы.

2) Для частотного анализа целесообразно заменить мощную выходную лампу источником напряжения с выходным сопротивлением, равным ее выходному сопротивлению. Эта простая модель позволяет легко оценить влияние лампы на передаточную функцию.

3) Для анализа можно использовать самую простую схему замещения выходного трансформатора, что упрощает вычисление передаточной функции. При таком упрощении полученные результаты, по крайней мере в пределах 90 %, совпадают с реальными.

4) Очень важно иметь следующие параметры трансформатора :  $T$ ,  $L_p$ ,  $L_{sp}$ ,  $C_{lp}$ ,  $R_{ip}$ ,  $R_{is}$ . С этим набором параметров можно вычислить передаточную функцию трансформатора и оценить влияние на нее параметров ламп  $R_g$  и сопротивления нагрузки ( $Z_L$ ). Для определения полных энергетических возможностей трансформатора достаточно знать величину нижней передаваемой частоты по уровню -3dB и номинальную выходную мощность.

5) Мы надеемся, что каждый производитель трансформаторов будет приводить эти параметры для своих изделий, что облегчит сравнение различных типов трансформаторов и даст возможность оптимизировать их использование.

6) Известный параметр - **Коэффициент Качества** достаточно полно определяет величину соотношения между индуктивностью первичной обмотки и индуктивностью рассеяния и не зависит от способа использования трансформатора.

7) Новый предложенный параметр - **Декадный Коэффициент Качества** преобразует величину **QF** к числу частотных декад, перекрываемых трансформатором. И позволяет более адекватно сравнивать качество трансформаторов различных марок при больших значениях **QF**.

8) Новый параметр трансформатора - **Коэффициент Настройки** характеризует оптимальность использования трансформатора в усилителе. Также, используя этот параметр совместно с **Коэффициентом Качества**, можно просто вычислить нижнюю частоту, на которой уровень передачи станет -3dB.

9) Новый параметр трансформатора - **Декадный Коэффициент Настройки** показывает ширину полосы пропускания трансформатора в декадах, которая может быть получена при максимальном значении **QDF**.

10) Полная полоса пропускания трансформатора по уровню -3dB определена **Частотным Декадным Коэффициентом**, являющимся суммой **QDF** и **TDF**. Представлена новая конструкция тороидального выходного трансформатора, который способен охватить почти 6 частотных декад и характеризуется отсутствием выбросов и колебаний на переходной характеристике (выброс возникает при  $Q > .7$ ).

## 7 БЛАГОДАРНОСТИ

Подготовка этой публикации была субсидирована двумя компаниями: [Plitron Manufacturing Inc](#) и [Amplimo b.v.](#) (или [amplimo.com](#)). Amplimo, которая осуществляет поставку новых "Vanderveen" тороидальных выходных трансформаторов для двухтактных усилителей в страны Бенелюкса (в том числе и в Россию), в то время как Plitron осуществляет поставки этих трансформаторов во всем мире.

Особая благодарность Филипу Мантику и Джеймсу Хейварду (Phillip Mantica и James Hayward) двум корректорам, которые помогли нам издать эту статью на Английском языке и разобраться с многочисленными комментариями.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- |  |   |
|--|---|
| <p>(1) : Jean Hiraga; Initiation aux Amplis a Tubes; 2-nd edition; Eyrolles; 61, bld Saint German, 75240 Paris, Cedex 05</p> <p>(2) : Glass Audio; Radio Amateur Publications, Inc.; 305 Union Street, Peterborough, NH 03458-176</p> <p>(3) : Sound Practices; Box 19302, Alexandria VA 22320</p> <p>(4) : HiFi News &amp; Record Review; June 1994</p> <p>(5) : Julius Futterman; An Output-Transformerless Power Amplifier; JAES; October 1954, Volume 2, number 4; pp-252-25</p> <p>(6) : Menno van der Veen; Het Vanderveen Buizen Bouwboek; book only available in Dutch at the moment, available at author</p> <p>(7) : Dr. H. de Waard; Electronica; W, de Kaan; Hilversum; vierde druk</p> <p>(8) : William M. Flanagan; Handbook of Transformer Design &amp; Applications; McGraw-Hill, Inc.; ISBN 0-07-021291-0</p> | <p>(9) : W. Marshall Leach, Jr; The Differential Time-Delay Distorsion and Differential Phase-Shift Distorsion as Measures of Phase Linearity; JAES, Volume 37, number 9, September 1989; pp.709-715</p> <p>(10) : Michael S. LaFevre; The Core Issues; Understanding Output Transformers, Part 1 of a series; Sound Practices, Fall 1992; pp.22-24</p> <p>(11) : Bill Perkins; A Little Input on Audio-Output Transformers; Audio Note 2.1; Pearl, 2510-19 St.S.W., Calgary Alberta, Canada T2T 4X3.</p> <p>(12) : Reuben Lee, Leo Wilson, Charles E. Carter; Electronic Transformers and Circuits; third Edition; John Wiley &amp; Sons; ISBN 0-471-81976-X</p> <p>(14) : R. zur Linde: Röhrenverstärker für Gitarren +• Hi-Fi; Elektor Verlag GmbH; ISBN 3-921608-41-4</p> |
|--|---|

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$a_2$	: Обратная величина Q	[ ]	$H(\omega)$	: Передаточная функция системы выходной трансформатор – выходные лампы	[ ]
$\alpha$	: Отношение $Z_{ip}$ и $R_{aa}$	[ ]	$i$	: Мнимая единица	[ ]
$B$	: Магнитная индукция в сердечнике	[T]	$I_a$	: Анодный ток лампы	[A]
$\beta$	: Коэффициент нагрузки, отношение $R_g$ и $R_{aa}$	[ ]	$L_p$	: Индуктивность намагничивания первичной обмотки выходного трансформатора	[H]
$C_{ip}$	: Эффективная емкость выходного трансформатора приведенная к первичной обмотке	[F]	$L_{sp}$	: Индуктивность рассеяния первичной обмотки выходного трансформатора	[H]
<b>FDF</b>	: <b>Частотный Декадный Коэффициент</b> = $\log(f_{3H}/f_{3L})$	[ ]	$N_p$	: Количество витков первичной обмотки выходного трансформатора	[ ]
$f_s$	: Частота при которой происходит насыщение сердечника если к нему приложено напряжение $v_R$	[Hz]	$N_s$	: Количество витков вторичной обмотки выходного трансформатора	[ ]
$f_{3H}$	: Верхняя частота среза по уровню -3dB	[Hz]	<b>Q</b>	: добротность фильтра низких частот второго порядка ( $=1/a_2$ )	[ ]
$f_{3L}$	: Нижняя частота среза по уровню -3dB	[Hz]	<b>QDF</b>	: <b>Декадный Коэффициент Качества</b> - $10\log(QF)$	[ ]
$f(a_2)$	: Функция, определяющая коэффициент передачи фильтра низких частот второго порядка по уровню -3dB, в зависимости от $a_2$	[ ]	<b>QF</b>	: <b>Коэффициент Качества Трансформатора</b> ( $=L_p/L_{sp}$ )	[ ]
<b>ff(a2)</b>	: Линейная аппроксимация функции $f(a_2)$ , действительна в диапазоне $1 < a_2 < 2$ , и имеет погрешность менее 5 %.	[ ]	$R_{aa}$	: Импеданс первичной обмотки трансформатора	[Ohm]
			$R_g$	: Эффективное эквивалентное сопротивление выходного каскада	[Ohm]

$r_i$  : Выходное сопротивление лампы в рабочей точке [Ohm]  
 $R_{ip}$  : Сопротивление провода первичной обмотки выходного трансформатора [Ohm]  
 $R_{is}$  : Сопротивление провода вторичной обмотки выходного трансформатора [Ohm]  
 $s$  : Крутизна характеристики лампы [A/V]  
 $T$  : Коэффициент трансформации выходного трансформатора [ ]  
 $TDF$  : Декадный Коэффициент Настройки =  $^{10}\log(TF)$  [ ]  
 $TF$  : Коэффициент Настройки [ ]  
 $V_{ak}$  : Напряжение между анодом и катодом лампы [V]

$V_{gk}$  : Напряжение между сеткой и катодом лампы [V]  
 $V_p$  : Общее переменное выходное напряжение каскада возбуждающего выходной трансформатор [V]  
 $\omega$  : Круговая частота [Hz]  
 $\omega_0$  : Резонансная круговая частота фильтра низких частот второго порядка [Hz]  
 $Z_{ip}$  : Характеристический импеданс первичной обмотки трансформатора возникающий в следствии наличия  $L_{sp}$  и  $C_{ip}$  [Ohm]  
 $Z_L$  : Импеданс нагрузки вторичной обмотки выходного трансформатора [Ohm]  
 $Z_{Ln}$  : Нормализованная нагрузка [ ]

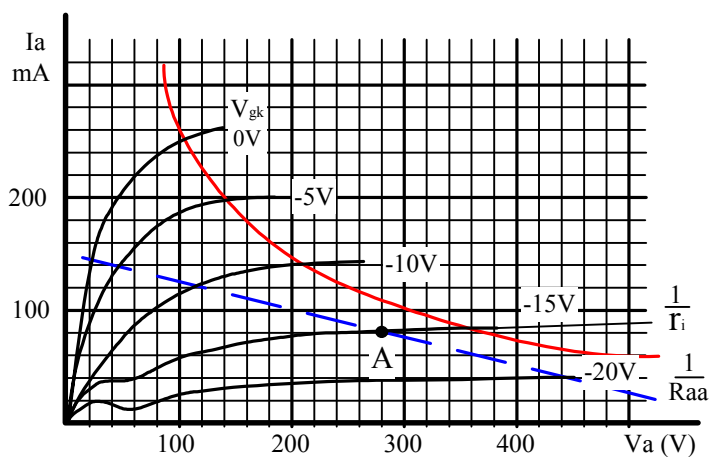


РИСУНОК 1-1: характеристики лампы EL34  
(Данные Elector lit.13)

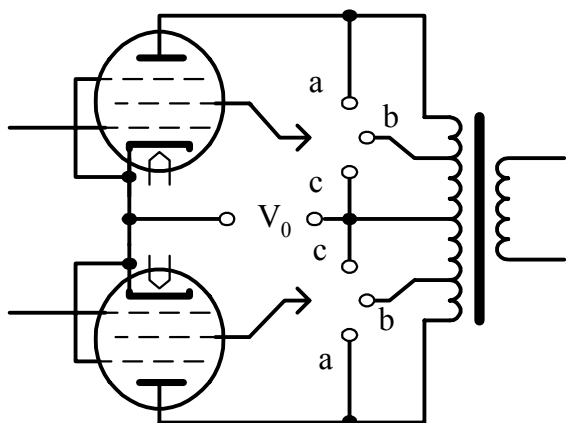


РИСУНОК 1-2: Различные варианты включения лампы в двухтактном выходном каскаде  
(а)- Триодное, (б)- Ультранинейное, (с)- Пентодное

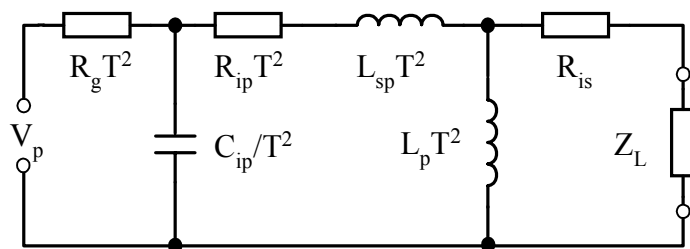


РИСУНОК 1-3: Эквивалентная схема понижающего выходного трансформатора

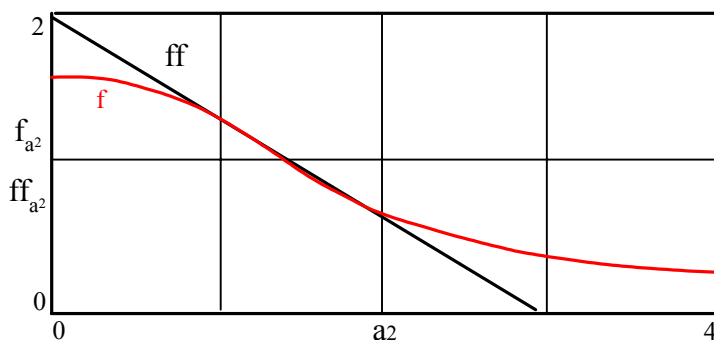


РИСУНОК 3-1: Функция  $f(a_2)$  и ее линейная аппроксимация  $ff(a_2)$   
для  $1 \leq a_2 \leq 2$  Погрешность  $f(a_2) < 5\%$

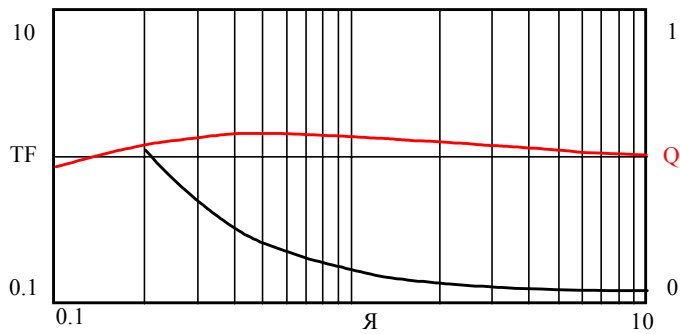


РИСУНОК 4-1: Коэффициент настройки (левая шкала) и добротность (правая шкала) при  $\alpha = 0.5$

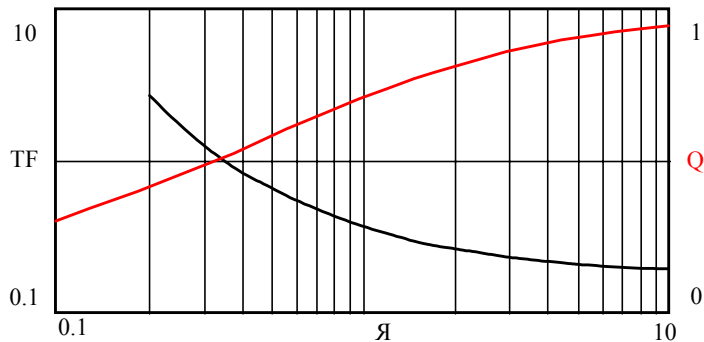


РИСУНОК 4-2 Коэффициент настройки (левая шкала) и добротность (правая шкала) при  $\alpha = 1$

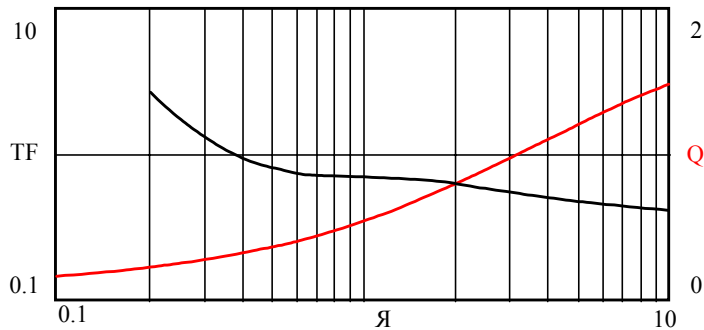


РИСУНОК 4-3: Коэффициент настройки (левая шкала) и добротность (правая шкала) при  $\alpha = 2$

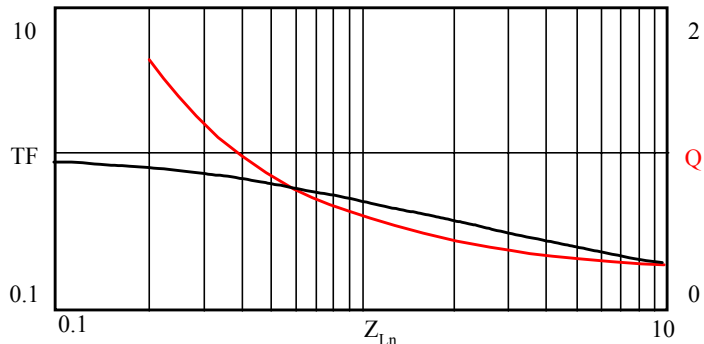


РИСУНОК 4-4: Коэффициент настройки как функция нормализованной нагрузки ( $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1$ ,  $Z_L = 1 \Omega$ ) Триодный режим

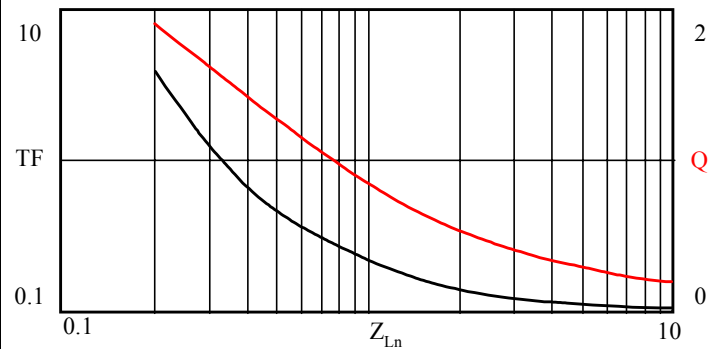


РИСУНОК 4-5: Коэффициент настройки как функция нормализованной нагрузки ( $\alpha = 1$ ,  $\beta = 3$ ,  $Z_L = 1 \Omega$ ) Ультрелинейный режим

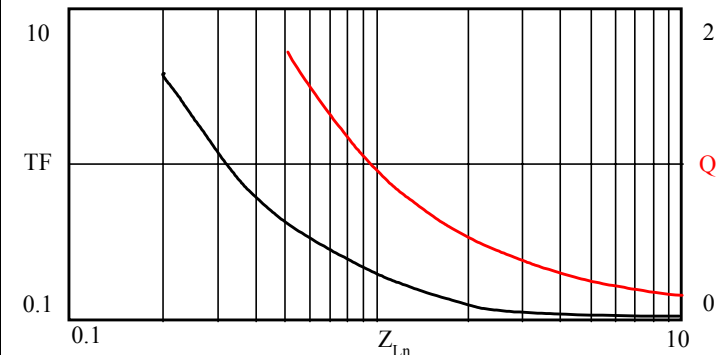


РИСУНОК 4-6: Коэффициент настройки как функция нормализованной нагрузки ( $\alpha = 1$ ,  $\beta = 10$ ,  $Z_L = 1 \Omega$ ) Пентодный режим

Модель	1080	2100	3070	6040	8020
$N_p/N_s$	15.74	19.42	23.48	34.29	40
Power W	80	100	70	40	20
$f_{-3db}$ power Hz	20.5	20.7	22.7	25	28.5
$L_p$ H	360	530	490	535	485
$L_{SP}$ mH	1.312	1.8	2.6	3.7	8
$C_{ip}$ pF	593	585	558	613	250
$R_{ip}$ Ohm	37.8	104	173.7	68.1	155.4
$R_{is}$ Ohm	0.16	0.18	0.168	0.158	0.161
$R_{aa}$ kOhm	1.239	1.885	2.756	5.878	8.000
$R_g$ kOhm	1.2	2.0	2.0	5.3	16.0
Q	0.682	0.695	0.639	0.496	0.671
$f_{-3L}$ Hz	0.278	0.304	0.400	0.847	1.793
$f_{-3H}$ kHz	251	217	187	99	132
QDF	5.44	5.47	5.28	5.16	4.78
TDF	0.52	0.38	0.39	-0.09	0.09
FDF	5.96	5.85	5.67	5.07	4.87

ТАБЛИЦА 5-1: Параметры трансформаторов и расчетные параметры без использования аппроксимации ( $Z_L = 5 \Omega$ )

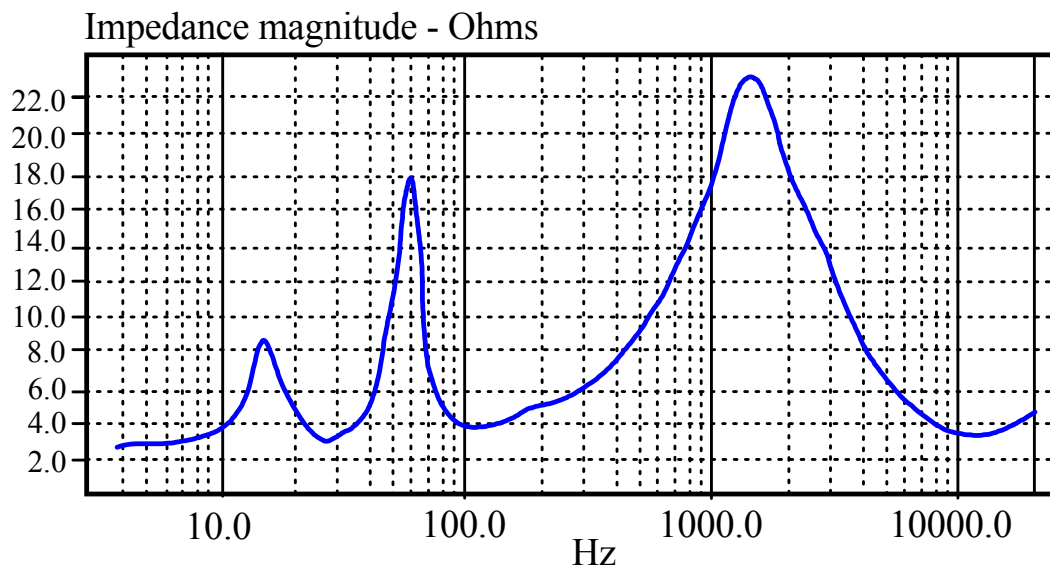


РИСУНОК 5-2: зависимость изменение импеданса динамика от частоты

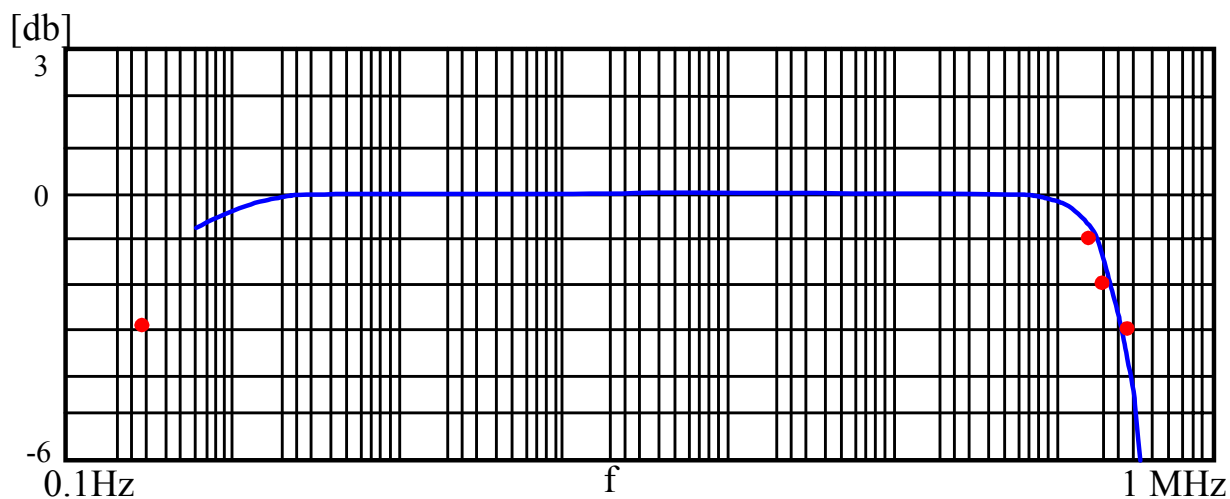


РИСУНОК 5-3: частотные характеристики трансформатора VDV 1080;  
линия - расчетные значения,  
точки – измеренные значения

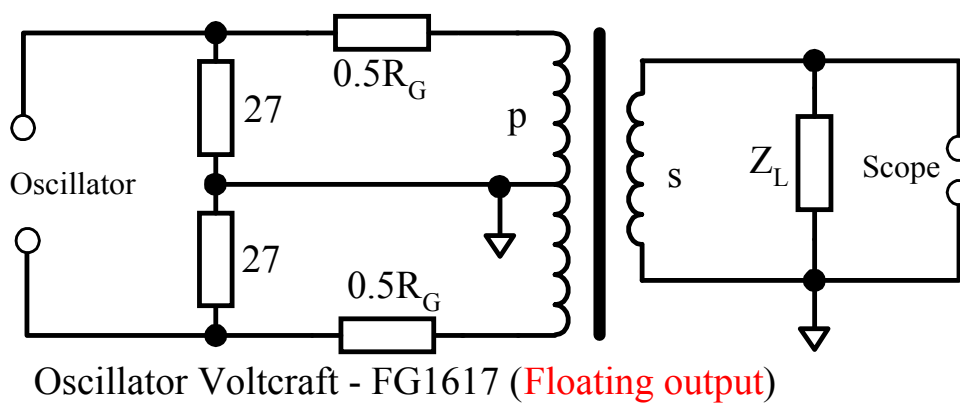


РИСУНОК 5-4: схема измерения частотных характеристик трансформатора