

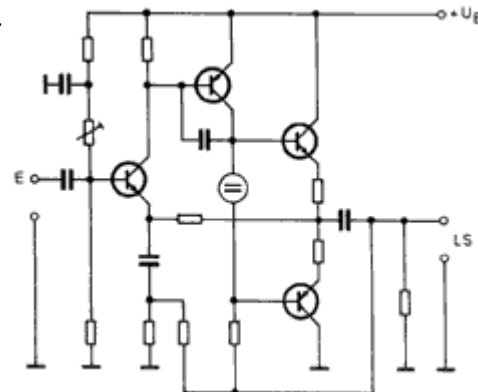
# Black Devil руководство по разработке (<http://de.yahoo.com>)

Дьявол кроется в деталях. Где ещё его можно найти, если схема на первый взгляд кажется довольно стандартной и при этом претендует на то, что она чертовски хороша?

Работа ведётся по высокочлассным правилам: все лишнее вылетает - каждый PN-переход является камнем преткновения для NF - ответной связи, которая всегда приходит слишком поздно. Остается только самое необходимое - и оно доведено до крайности.

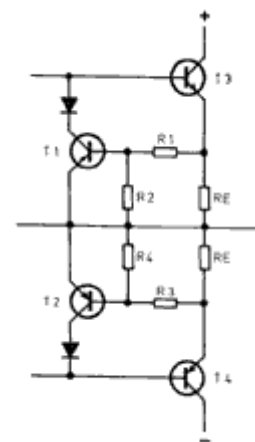
Ниже приводится описание конструкции усилителя. Технические требования для согласования усилителя включают в себя как можно более качественный синусоидальный генератор, осциллограф и, по крайней мере, точный мультиметр.

## Основная схема усилителя мощности...



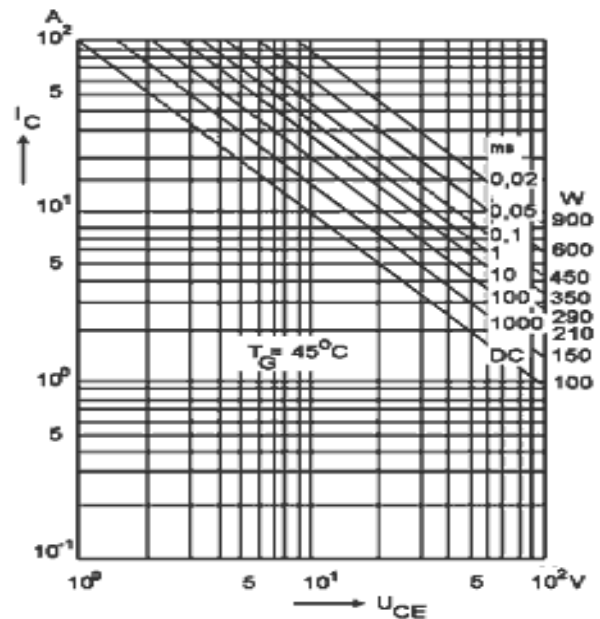
...в принципе, это вариант хорошо известной и распространённой схемы **концевого каскада**. Однако решающее значение здесь имеют расположение некоторых компонентов, размеры компонентов и способы их выбора. То, что на первый взгляд кажется очевидным, изначально представляет собой недостаток: полное отсутствие предохранителя от короткого замыкания, отсутствие дифференциала на входе, но зато отсутствие разъёма разъединения перед динамиком. Это может показаться странным, поскольку в наши дни симметричные усилители мощности, часто также подключаемые к постоянному току, стали обычным явлением в различных схемах ограничения тока.

Следовательно, сразу к ограничению тока, принципиальная схема которого показана на рисунке 2: для каждой полуволны сигнала предусмотрен силовой транзистор, на сопротивлении эмиттера которого измеряется ток коллектора RE. Создаёт ли ток достаточно большое падение напряжения, чтобы через делитель напряжения R1,2 и R3,4, соответственно, можно было переключать транзисторы T1 и T1 соответственно. Для управления T2 базовый ток соответствующего выходного транзистора и, следовательно, его максимальный ток коллектора также ограничены. Таким образом, усилитель мощности защищён от короткого замыкания, что, в принципе, тоже очень желательно. В противном случае коллекторные токи конечных транзисторов могли бы стать настолько большими при коротком замыкании из-за очень низкого внутреннего сопротивления, что транзисторы разрушились бы за доли секунды. В принципе, этот тип предохранителя от короткого замыкания - понятная и хорошо работающая вещь.



До тех пор, пока усилитель мощности не достигнет предела и пока сопротивление нагрузки не опустится ниже заданного значения, ограничение тока также не окажет отрицательного влияния на сигнал. Однако, если к кроссоверу подключена многолучевая акустическая система, усилитель мощности работает на сложной нагрузке, полное сопротивление которой отнюдь не является постоянным. Согласно DIN, номинальное сопротивление динамика или блока может быть ниже номинального на 20%. Для сложных аудиосигналов вполне нормально, что сильные импульсные всплески в программном материале возникают именно в том диапазоне частот, в котором номинальное сопротивление блока питания падает ниже допустимых 20%. Итак, здесь усилитель мощности должен был бы подавать большой ток в блок питания в течение нескольких миллисекунд, но не может этого сделать, поскольку становится активным ограничение тока. В звуке этот факт проявляется в некоторой шероховатости и скрипучести. Кроме того, ещё одним недостатком этого типа ограничения тока является его резкое включение, что также приводит к искажению звука.

Концевые каскады трубок полностью исключают возможность короткого замыкания, поскольку они имеют постоянное ограничение тока через выходной преобразователь. Уже само по себе медное сопротивление обмоток передатчика эффективно ограничивает ток, но также и железный сердечник, находящийся в состоянии насыщения. Таким образом, усилители мощности лампы плавно переходят в ограничитель, что приводит к более мягкому звуковому изображению. Таким образом, необходимо искать способы, с помощью которых эта мягкая форма ограничения может быть реализована в транзисторной технике.

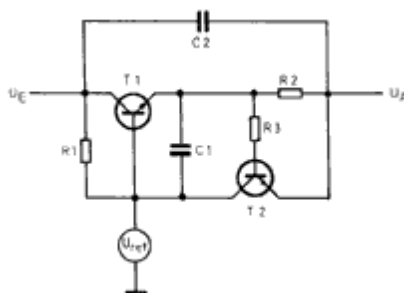


Для начала рассмотрим основные характеристики силовых транзисторов: на рисунке 3 показана типичная диаграмма SOA для силовых транзисторов. (Безопасная рабочая зона SOA = безопасная рабочая зона.) Если температура корпуса может поддерживаться на уровне  $45^\circ\text{C}$ , то при работе с постоянным током допускается максимальная рассеиваемая мощность 100 Вт. С другой стороны, при пониженном напряжении ток может увеличиваться до 15 А, а при пониженном токе напряжение может достигать значения 60 В. Следовательно, при рабочем напряжении 60 В ограничение тока должно быть установлено на уровне около 1,8 А - слишком малое значение для чистой передачи импульсных пиков.

Однако, как также видно из диаграммы, в течение 10 мс пиковый ток при полном напряжении может достигать 5 А. Если бы предел мощности был установлен на это значение, то уже был бы получен некоторый резерв. Однако, если транзистор должен быть включён до такой степени, что на блок 4 Ом подаётся напряжение 40 В, то даже ток 10 А должен быть способен протекать. Ограничение тока, конечно, предотвратило бы это, хотя транзистор мог бы выдержать это рабочее состояние в течение полных 100 мс, что было бы достаточно даже для самых низких частот.

Однако теперь существует ещё один способ ограничения тока, который, хотя и не ограничивает импульсы, тем не менее эффективно защищает транзисторы конечной ступени от разрушения:

Можно просто ограничить максимальную выходную мощность блока питания. Правда, с особой хитростью. Если бы выходная мощность блока питания была ограничена аналогично мощности конечных транзисторов, Вельзевул был бы изгнан - скрипучий звук от пиков управления остался бы.

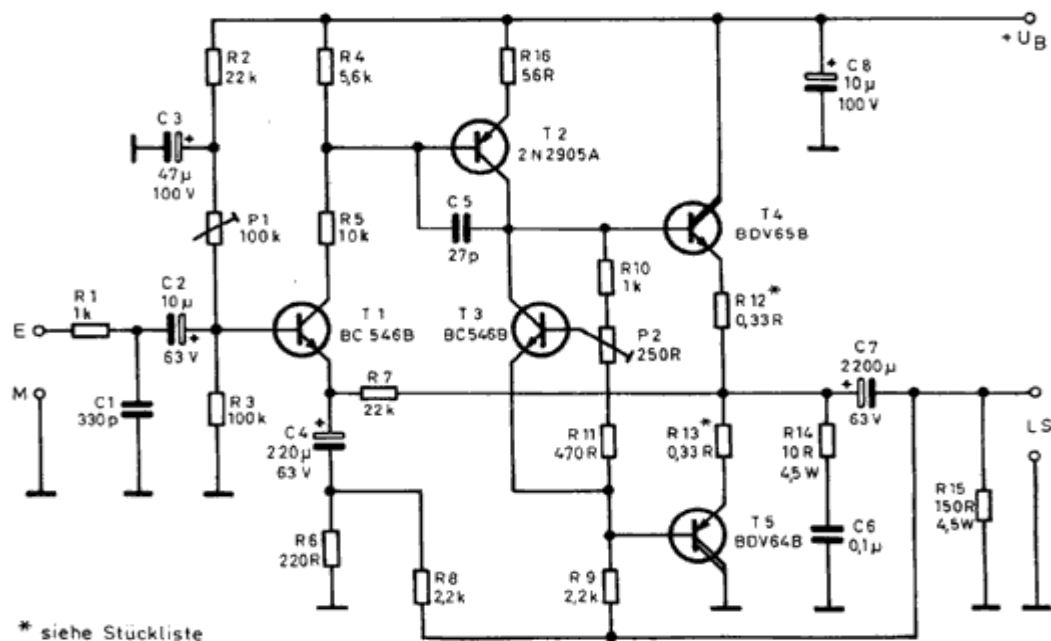


На рисунке 4 показана схема блока питания.  $T_1$  - продольный транзистор, основание которого находится под стабильным напряжением  $U_{REF}$ . Таким образом,  $U_A$  хорошо просеивается и

стабилен. При перегрузке на R2 падает такое большое напряжение, что T2 подаётся на токоограничивающий резистор R3, ограничивая базовый ток T1. Устройство настроено на фиксированный максимальный ток и устойчиво к постоянному короткому замыканию.

Однако для того, чтобы подключённый усилитель мощности получал достаточный ток в случае пиков управления, предусмотрены конденсаторы C1 и C2. C1 подавляет реакцию ограничения тока при коротких пиках сигнала, C2 с его большой ёмкостью соединяет всю сборку. Это позволяет при необходимости усилителю мощности на короткое время получать большой ток от источника питания, который используется для питания блока питания во время импульсных пиков. Таким образом, этот тип схемы защиты имеет преимущество постоянного ограничения тока без недостатка одновременного ограничения пикового тока.

После этих предварительных просмотров можно приступить к изучению фактической конечной стадии. На рисунке 5 показана полная принципиальная схема усилителя оптимального размера с номинальной выходной мощностью 50 Вт на 4 Ом, при которой были учтены все входные требования, упомянутые в начале.



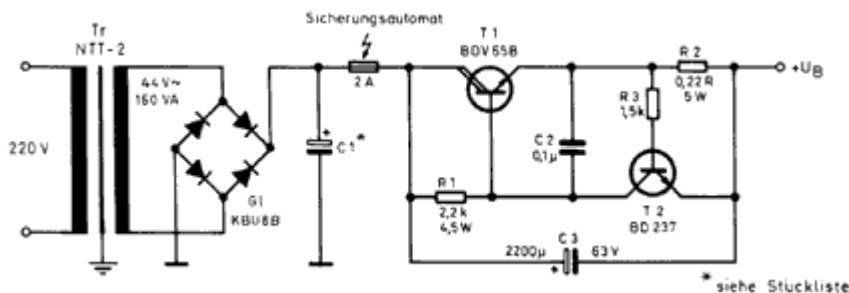
Следовательно, основное усиление всей цепи должно быть относительно низким, а основным коэффициент усиления без обратной связи должен быть как можно меньше. Поэтому на входе сознательно был использован простой входной каскад вместо дифференциального усилителя. Напряжение обратной связи возвращается через R7 к эмиттеру T1, который, таким образом, также отвечает за стабильность рабочей точки. За регулировку рабочей точки по постоянному напряжению отвечает P1. При этом R2 и C3 обеспечивают достаточное отключение от рабочего напряжения, так что на вход не могут попасть никакие частицы шума от напряжения питания. Регулировка P1 выполняется таким образом, что при перегрузке усилитель мощности переходит в ограничитель симметрично.

Как обычно для транзисторных усилителей мощности, ведущий транзистор должен обеспечивать основную часть усиления на усилителе мощности с минимальными искажениями, насколько это возможно. Таким образом, его характеристики в значительной степени влияют на общее качество усилителя мощности вместе с его контуром обратной связи. Здесь использовался маломощный транзистор с УКВ-характеристиками, работающий в режиме класса А. А именно, если T2 работает слишком медленно, реакция контура обратной связи будет задерживаться. Результатом будет ряд искажений. Конденсатор C5, расположенный между коллектором и базой, подавляет высокочастотные колебания.

От T2 сигнал, усиленный напряжением, поступает на два концевых транзистора Дарлингтона, T4 и T5. С помощью T3 ток покоя усилителя мощности регулируется и поддерживается постоянным. T3 должен быть термически соединён с радиатором концевых транзисторов. Основание T5 подключается непосредственно к выходу динамика через R9, а не к земле. Эта так называемая схема начальной загрузки приводит к тому, что база T5 питается от более

отрицательного напряжения, чем оно представляет собой потенциал заземления, при полном выключении. Это компенсирует падение напряжения на R9, вызванное базовым током T5. R15 обеспечивает разрядку C7 и перекрывает канал постоянного тока, если динамик не подключён.

**Обрыв, на котором часто заканчивается наслаждение музыкой, называется отсечением. Здесь её мягко избегают.**

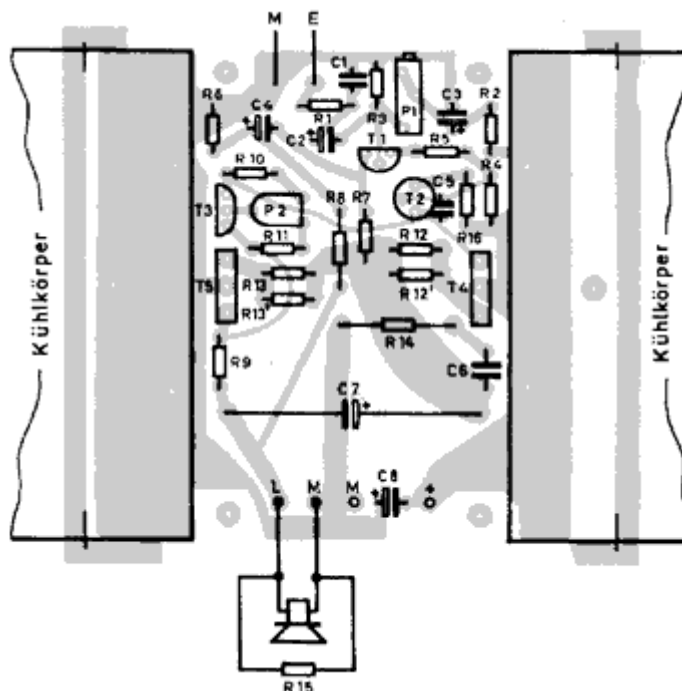


Усилитель мощности становится идеальным только в том случае, если блок питания подходит. На рисунке 6 показана принципиальная схема блока питания, размер которого также соответствует оптимальному. В принципе, отдельные компоненты и их влияние уже были рассмотрены при обсуждении рисунка 4. Компоненты, о которых следует упомянуть особо, - это автоматический предохранитель и зарядное устройство C1. Для монофонического режима C1 достаточно ёмкости 10 000 мкФ, а для стереофонического режима - 22 000 мкФ

Быть мкФ. Ограничитель тока в блоке питания надёжно защищает усилитель мощности в случае короткого замыкания в линии громкоговорителя и в случае перегрузки. Автомат предохранителя обеспечивает тепловую защиту. Эти автоматы настолько инертны, что не реагируют на кратковременные скачки напряжения, но отключаются через несколько минут - в зависимости от силы тока - при длительной перегрузке по току.

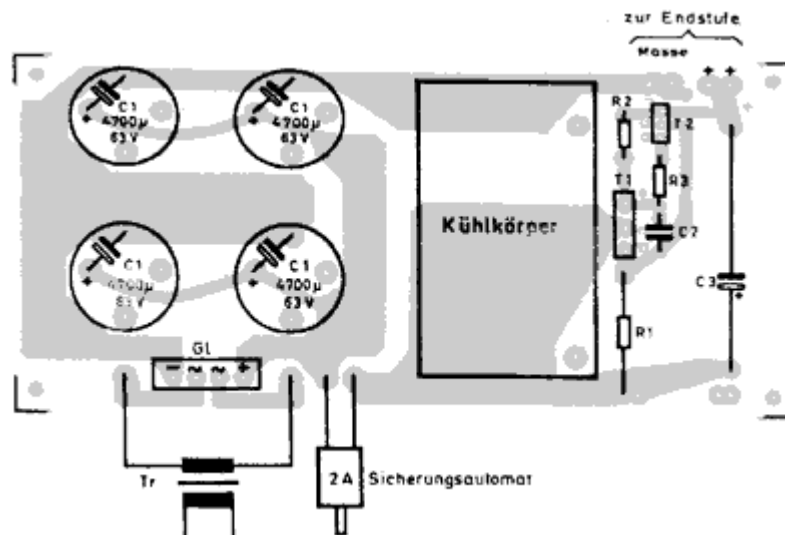
При установке схемы в корпус или даже в активную коробку рекомендуется установить под печатной платой вторую защитную пластину, покрытую медью, которая будет подключена к заземлению. Таким образом, рассеяние шума эффективно подавляется.

## Настройка и согласование



Если все детали собраны правильно, можно приступить к вводу в эксплуатацию. Для этого сначала устанавливают P1 и P2 в среднее положение, помещают амперметр между источником питания и усилителем мощности, затем подключают вольтметр к выходу источника питания и включают ток. Без сигнала рабочее напряжение должно составлять около 75 В, а ток покоя должен составлять от 30 до 100 мА. С помощью P1 напряжение на положительном выводе C7 устанавливается равным половине измеренного рабочего напряжения. Затем ток покоя доводится до 60 мА.

Теперь вы снимаете вольт- и амперметры и подключаете к выходу нагрузочный резистор 4 Ом с минимальной нагрузочной способностью 60 Вт. На вход подаётся синусоидальный сигнал частотой 1 кГц, амплитуда которого увеличивается до тех пор, пока усилитель мощности не достигнет предела. Теперь выполняется сопоставление с P1 до тех пор, пока синус не будет равномерно обрезан. Затем входной сигнал уменьшается до тех пор, пока при 4 Ом осциллограф не сможет измерить около 10 В<sub>е</sub> (28,28 В<sub>с</sub>). Это эквивалентно 25 Вт и, следовательно, половине выходной мощности. Таким образом, вы позволяете конечной ступени гореть в течение как минимум десяти минут. Затем вы удаляете генератор сигналов и снова выравниваете ток покоя и среднее напряжение на C7 описанным ранее способом. Таким образом, усилитель мощности готов к работе и не нуждается в сравнении со всем, что имеет рейтинг и название на рынке высококачественного Hi-Fi.



Результаты прослушивания в тех же условиях тестирования - и это, в конечном счёте, главное - могут быть "видны". С конечной ступени по этому образцу уже построено и протестировано большее количество единиц, и они используются ежедневно в домашних и профессиональных целях.

Звукорежиссёры, профессиональные музыканты классической музыки, преподаватели музыки и другие люди, профессионально занимающиеся музыкальными выступлениями, протестировали эту концепцию заключительного этапа в прямом сравнении с другими известными продуктами из студийного и элитного сегментов. В результате выбор пал на эту заключительную стадию. Это сбивает с толку, особенно если знать цены, которые обычно используются в сегменте элитного жилья.

На самом деле, этим было бы сказано все об этом руководстве по сборке. Но, возможно, все же возникает вопрос, почему многие люди, которым необходимо хорошо слышать в силу профессии, предпочли этот заключительный этап другим. Технические характеристики, указанные для усилителя рисунка, не могут быть единственной причиной. А именно, легко заметить, что на низких частотах выходное напряжение падает, а значения коэффициента шума не так низки, как обычно: для ряда усилителей высокого класса значения коэффициента лязга  $< 0,0001\%$  довольно распространены. Этот конечный уровень, в отличие от этого, является сравнительно скромным, со значениями в лучшем случае  $< 0,03\%$ . В конце концов, коэффициент лязга в 30 раз выше!

На первый взгляд, едва ли очевидно, что усилитель мощности с коэффициентом лязга  $0,03\%$  должен звучать лучше, чем усилитель с коэффициентом лязга всего  $0,0001\%$ . Секрет заключается в том, что коэффициент лязга  $0,03\%$  состоит в основном из  $k_2$  и имеет лишь небольшие остаточные доли  $k_3$  - тогда больше ничего не происходит! При настройке усилителя мощности, как описано выше, эти характеристики могут быть легко достигнуты. Те, у кого есть синусоидальный генератор высшего класса и соответствующий анализатор спектра, могут даже настроить этот усилитель мощности таким образом, чтобы общий низкий коэффициент шума состоял только из  $k_2$ ,  $k_3$  и более высокие доли больше не встречаются!

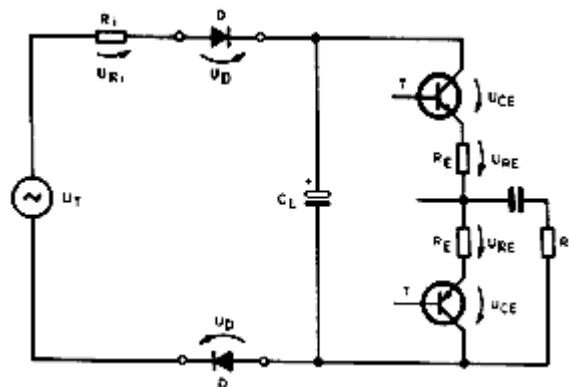
Но если лязгающий фактор состоит только из  $k_2$ , то есть его доли на октаву выше основного тона, то эти искажения гармонично вписываются в ряды обертонов инструментов без каких-либо

раздражающих диссонансов. Более высокие спектральные доли лязгающего фактора по отношению к соответствующим основным тонам создают меньшие интервалы (квинты, кварты, трети, секунды), которые вызывают больший диссонанс и искажение звука, чем меньше интервал. Усилители мощности обычной конструкции, хотя и имеют статически низкий коэффициент лязга, например, однако при частоте 1 кГц при выключенном управлении возникают динамические коэффициенты лязга, которые негативно влияют на звуковую картину и часто во много раз превышают статический коэффициент лязга. Хотя эта концепция конечной ступени имеет статически более высокий базовый фоновый коэффициент, он больше не изменяется при выключенном управлении.

Но есть и другие критерии качества: импульсная обработка упоминалась ранее несколько раз. Этому было уделено особое внимание при проектировании, поскольку, как известно, музыка состоит не из синусоидальных сигналов частотой 1 кГц, а из сложных сочетаний частот и амплитуд (музыкальные сигналы также могут содержать довольно сильно несимметричные части). Схема источника питания учитывает это так же, как и быстрая контурная обратная связь и быстрое реагирование на повышение сигнала.

Хорошие основные характеристики усилителя мощности могут быть использованы в полной мере только в том случае, если будет уделено достаточное внимание конструкции блока питания. Некоторые вычисления и соображения, а также таблица результатов измерений на схеме схемы доказывают важность правильного и продуманного проектирования.

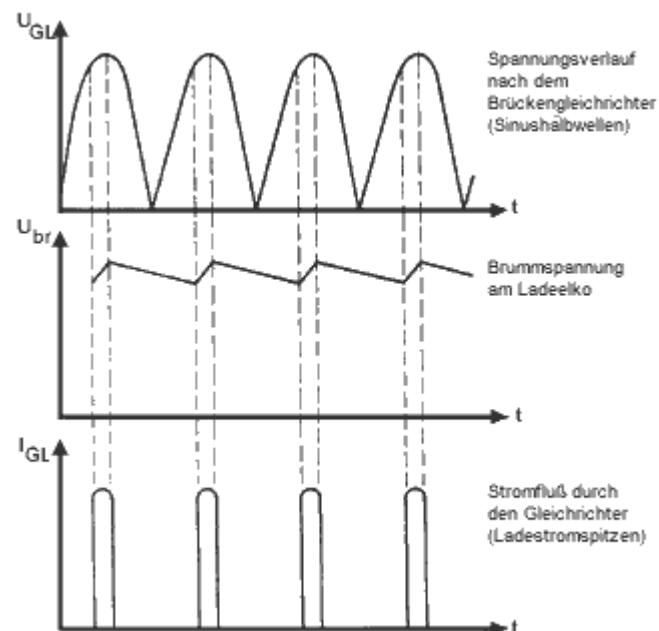
**Технические данные так же хороши, как и производящие их правила измерения. То, что вы слышите, всегда имеет свою значимость.**



Во-первых, цель состоит в том, чтобы изучить, как выглядят взаимодействия между источником питания и усилителем мощности. На рисунке 7 показан трансформатор с его напряжением холостого хода  $U_{Tr}$  и внутренним сопротивлением  $R_i$ , выпрямитель, характеризующийся двумя диодами  $D$ , зарядное устройство  $C_L$  и конфигурация транзисторов усилителя мощности. С его помощью можно обнаружить все основные компоненты, через которые протекают большие токи. Внутреннее сопротивление трансформатора, с одной стороны, сильно влияет на результат достигаемой выходной мощности, с другой стороны, оно в значительной степени определяет степень, в которой зарядный конденсатор может быть достаточно перезаряжен от сети. Только достаточная перезарядка обеспечивает достаточный запас энергии для мощных музыкальных импульсов. Конечные транзисторы с их эмиттерными резисторами обычно выбираются в зависимости от типов и размеров для наилучшей обработки сигнала. Сопротивление нагрузки обычно составляет 4 Ом или 8 Ом, так как именно так предлагается большинство коробок. Перепады напряжения на диодах мостового выпрямителя также фиксируются материалом кремний. Ladeelko  $C_L$  должен обладать низким RESR (= эквивалентным последовательным сопротивлением), а также иметь низкое кажущееся сопротивление при работе на более высоких частотах. Здесь Elko - это не то же самое, что Elko, и, что более важно, Elko - это не то же самое, что идеальный конденсатор. Для реактивного сопротивления конденсатора  $X_C$  применяется формула

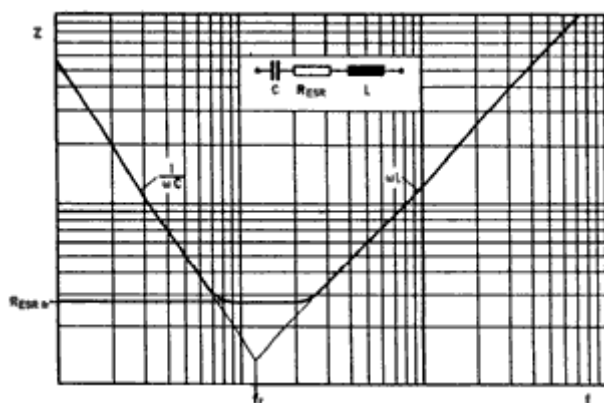
$$X_C = 1/(\omega C)$$

где, согласно этой формуле, реактивное сопротивление становится все меньше и меньше в направлении более высоких частот.



Несмотря на то, что Elkos по своим характеристикам далеки от идеального конденсатора, без них все же нельзя обойтись, поскольку только в этой технологии можно экономически производить большие ёмкости. Поэтому тем более необходимо уделять внимание поведению в рассматриваемом диапазоне частот. Здесь может последовать возражение, что Elko в блоке питания будет работать только на частоте 50 Гц и 100 Гц соответственно. Но далеко не все! Мостовой выпрямитель действительно выдаёт полуволны частотой 100 Гц, но они представляют собой только основную частоту. Поскольку они являются полуволновыми, а не чисто синусоидальными, это создаёт большой гармонический спектр, с которым Elko должен справиться.

Кроме того, Elko не будет разряжаться до 0 В каждый раз до прихода следующей волны  $U_{a1}$ . Он разряжается только на частичную величину и, когда выпрямитель размыкается, перезаряжается скачком напряжения. На рисунке 8 показаны эти соотношения. Когда с помощью рядов Фурье исследуется, какие частоты возникают, обнаруживаются гармоники вплоть до высоких частот. Что ещё более усложняет ситуацию, так это то, что Elko разряжается не постоянным током, а в ритме музыки. Таким образом, опять же, речь идёт о сложных разрядных токах. Таким образом, можно понять, почему некоторые модели Elkos подходят для усилителей мощности высокого класса, а другие - нет.



На рисунке 9 показан идеализированный график импеданса типичного Elkos и его схема замещения. Отдельные части схемы замены определяются следующим образом:

$$RESR = (\tan \delta) / (\omega CW)$$

где  $\tan \delta$  - коэффициент потерь, а  $CW$  - эффективная ёмкость. В идеальном случае конденсатор должен иметь смещение тока и напряжения по фазе на  $90^\circ$ . Коэффициент потерь - он должен быть как можно меньше - определяет, насколько реальный конденсатор отклоняется от этого идеала. Кажущееся сопротивление  $Z$  состоит из геометрической суммы ёмкостного реактивного сопротивления и  $RESR$ :

$$Z=[(RESR^2+(1/\omega C)^2)]^{1/2}$$

В этом виде вся структура представляет собой последовательный резонансный контур с затуханием. Ниже резонансной частоты  $f_r$  преобладает ёмкостная доля Elkos, вблизи резонансной частоты преобладает влияние RESR, а выше - индуктивная доля.

RESR образуется из всех линейных резисторов от выводов Elko до прокладок конденсатора, индуктивная часть образуется за счёт индуктивности выводов и, прежде всего, за счёт обмотки конденсатора, которая действует как катушка.

Для практического использования важно, чтобы RESR предполагаемого Elkos был очень низким, поскольку в противном случае он не может быть быстро заряжен или может доставить достаточное количество заряда за короткое время. Поэтому пригодные для использования экземпляры для этого усилителя мощности должны иметь значения значительно ниже 50 Мом. Резонансная частота должна быть порядка  $>20$  кГц. То, что линии электропитания от трансформатора через выпрямитель к Elko и далее к усилителю мощности должны иметь надлежащее сечение, является само собой разумеющимся.

Благодаря низкому внутреннему сопротивлению сетевого трансформатора можно добиться дальнейших улучшений. Чем он ниже, тем быстрее он может подавать зарядный ток на Elko, что ещё больше улучшает импульсные характеристики усилителя мощности. Поэтому было исследовано несколько типов трансформаторов с одинаковыми характеристиками, но разными сечениями сердечника, на предмет их внутреннего сопротивления, при этом тип трансформатора с наибольшим внутренним сопротивлением был установлен равным 100%. Это дало следующие результаты:

- M-Kern : 100%
- EI-Kern : 94%
- Кольцевой сердечник: 66%
- PM-Kern : 38%
- MD-Kern : 28%

Как видите, возникают серьёзные различия. Поскольку описанный усилитель мощности был разработан с учётом наилучших динамических характеристик, неправильный сетевой трансформатор может снова привести к потере многих характеристик, так что все усилия были напрасны. Данные, приведённые в техническом описании конечной ступени, были измерены с помощью оптимизированного MD-трансформатора. Тороидальный трансформатор также возможен, но для обеспечения максимальной токовой нагрузки он должен быть увеличен как минимум на 50%, чтобы достичь тех же характеристик!

### **Наконец, несколько замечаний по факторам демпфирования.**

Существует два способа определения коэффициента демпфирования. Один раз измеряется напряжение холостого хода усилителя, а затем напряжение с помощью нагрузочного резистора - обычный метод. При этом вы получаете очень большие рекламные значения коэффициента демпфирования. Более значимое значение получается, когда напряжение подаётся на выходной каскад через резистор с высоким сопротивлением. На практике это всегда будет иметь место, когда подключённый динамик воспроизводит резонанс и, таким образом, действует как генератор.

Именно здесь усилитель мощности должен как можно сильнее заглушать динамик. Коэффициенты демпфирования, измеренные таким образом, намного меньше, чем при первом методе. Для полноты и большей сопоставимости в данных усилителя мощности приведены оба параметра для различных NF-напряжений. Основы для всего вышесказанного можно найти здесь!