

# ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ В УСТРОЙСТВАХ “DISTORTION”

Авторы: В.Дисторшен и А.Овердрайв

*Статья ориентирована в первую очередь на тех, кто самостоятельно пытается разработать и изготовить эффект “distortion” (overdrive, дисторшн, дисторшен, овердрайв) для гитары.*

## Введение

В настоящее время многие пытаются построить подобные устройства на полевых транзисторах (ПТ, JFET), но некоторые специфические особенности этих электронных приборов зачастую отпугивают конструкторов, хотя эти транзисторы имеют много несомненных преимуществ в сравнении с биполярными транзисторами и электронными лампами (высокое входное сопротивление; малый шум; возможность питания напряжением 9V; плавность выходной ВАХ.

Основным недостатком полевых транзисторов является существенный разброс параметров в пределах даже одной партии, что создает определенные трудности при отладке устройств.

В статье анализируются каскады усиления на ПТ, приводятся формулы для расчета параметров этих каскадов, даются рекомендации по применению транзисторов в зависимости от назначения каскада.

## Основные параметры ПТ

Из всего многообразия полевых транзисторов мы остановимся на ПТ с каналом n-типа (JFET). Приборы с каналом n-типа имеют наилучшие шумовые характеристики в сравнении с МДП (МОП, MOS) транзисторами и аналогичными ПТ с каналом p-типа.

ПТ с каналом n-типа изображается на электронных схемах символом:

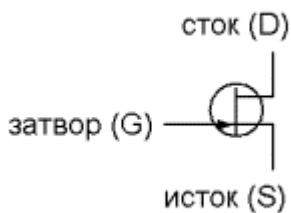


Рис.1. n-канальный ПТ (n-JFET).

Стоко-затворная и выходная вольт-амперные характеристики изображены на рис.2 и рис.3.

Рис.2. Стоко-затворная ВАХ ПТ (КП303Г  $U_0=-2V$ ,  $I_c=4mA$ ).

Зависимость тока стока от напряжения затвор-исток имеет квадратичный характер и с достаточной степенью приближения описывается выражением:

$$I_c = I_0 \left( 1 - \frac{U_{зи}}{U_0} \right)^2 \quad (1)$$

где  $I_0$  — начальный ток стока (ток стока при  $U_{зи}=0$ );

$U_0$  — напряжение отсечки (напряжение между затвором и истоком при котором ток стока менее 10мкА).

Из выражения (1) следует, что в «малосигнальном» режиме в спектре сигнала на выходе каскада на ПТ будет присутствовать в основном 2-я гармоника.

Семейство выходных ВАХ представлено на рис.3.

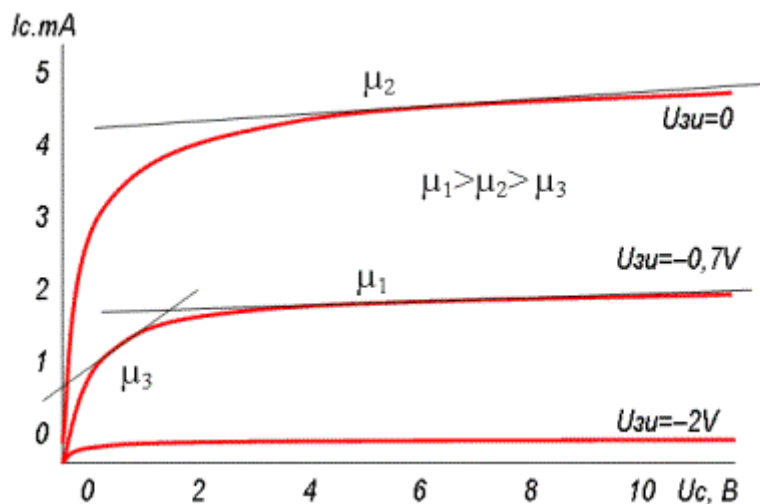


Рис.3. Выходные ВАХ n-канального ПТ

Анализируя выходные ВАХ ПТ, не будем углубляться в рассуждения о том, что здесь различают две области: резистивную и область насыщения – эту информацию можно почерпнуть из других источников. Обратим внимание на другой немаловажный параметр ПТ, не указываемый в паспорте, – собственный коэффициент усиления транзистора  $\mu$  (аналогичная характеристика есть и у ламп). На рис.3  $\mu$  – тангенс угла наклона касательной к рабочей точке на ВАХ. Конечность этого коэффициента обусловлена паразитной модуляцией сопротивления канала при изменении напряжения на стоке.

Примечание.

Приближенно для различных типов ПТ  $m$  можно определить по формуле:

$$\mu = \frac{k}{U_{отс}},$$

где  $U_{отс}$  – напряжение отсечки ПТ,  $k$  – коэффициент, зависящий от типа ПТ (для отечественных ПТ см.табл.1).

Таблица 1.

| $Tun$  | $k$ |
|--------|-----|
| КП302  | 50  |
| КП303  | 100 |
| КП307  | 150 |
| КПС104 | 200 |

Из семейства выходных ВАХ отчетливо видно, что при приближении к резистивной области (начальный участок ВАХ) собственное усиление транзистора начинает уменьшаться. Также хорошо видно, что  $\mu$  значительно выше на ВАХ, соответствующей работе при напряжениях затвор-исток близких к отсечке (нижняя кривая). Таким образом, мы приходим к выводу, что с точки зрения собственных усилительных свойств ПТ, лучше работать в области малых токов стока, т.е. при  $U_{зи}$  близких к напряжению отсечки.

В режиме начального тока стока ПТ следует использовать лишь при малых входных сигналах (амплитуда менее 0,3В) и необходимости получения наилучших шумовых характеристик.

Итак, при большом токе стока:

- ухудшаются усилительные свойства каскада на ПТ,
- потребляемый ток каждого такого каскада может составить 3-10mA, что значительно сокращает время работы от автономного источника питания.
- амплитуда входного напряжения ограничена для положительной полуволны значением около 0,3V (несколько варьируется в зависимости от типа ПТ). Т.к. сигнал с гитары имеет двойную пиковую амплитуду до 2-3V, то использовать такой режим в нашем случае нецелесообразно.

Кроме начального тока стока и напряжения отсечки, важной характеристикой ПТ является крутизна. В паспортных данных указывается максимальное значение крутизны (начальная крутизна), равное у большинства ПТ удвоенному отношению начального тока стока к напряжению отсечки:

$$g_{max} = 2 \frac{I_0}{U_0}.$$

Для заданного тока стока  $I_c$  крутизна ПТ определяется формулой:

$$g = \frac{2\sqrt{I_c I_0}}{U_0} \quad (2)$$

Часто используется обратная величина – сопротивление канала ПТ, которое численно равно:

$$R_{вых} = \frac{1}{g} = \frac{U_0}{2\sqrt{I_c I_0}} \quad (3)$$

Шумовые характеристики ПТ выше частоты сопряжения избыточного шума определяются именно сопротивлением канала. Шумовой ток ПТ очень мал и не практически сказывается при сопротивлении источника сигнала на входе менее 1МОм. Спектральная плотность ЭДС шума для ПТ (без учета низкочастотного избыточного шума) может быть определена из выражения:

$$e_w^2(f) \cong \frac{4}{3} kT \frac{|U_0|}{\sqrt{I_0 I_c}}.$$

Т.е теоретически ПТ с большой крутизной должны шуметь меньше, но в диапазоне частот до 3кГц (самый интересный для гитаристов) шумы ПТ в большей степени зависят от частоты среза избыточного шума, называемого еще фликкер-шумом. Ярким примером здесь являются отечественные ПТ серии КП302.

Теоретически эти ПТ с большой крутизной должны иметь спектральную плотность ЭДС шума около  $1 \frac{nB}{\sqrt{Гц}}$ , и давать общую ЭДС шума в звуковом диапазоне частот около 0,14мкВ. Реально же, шумы этих ПТ имеют в 6-15 раз больший уровень, что объясняется именно высокой частотой сопряжения избыточного шума (от 5кГц и выше). В конце статьи мы еще раз вернемся к вопросу шумов ПТ.

Далее рассматриваются распространенные (и не очень) схемы включения ПТ, и проводится анализ возможностей их использования при усилении и спектральном преобразовании сигнала гитары.

## Повторители на ПТ

Истоковый повторитель является аналогом эмиттерного и катодного повторителей. Повторители на ПТ имеют высокое входное сопротивление (>100МОм) и выходное сопротивление равное сопротивлению канала в рабочей точке. Сопротивление канала обратно пропорционально значению крутизны при рабочем токе

стока и определяется выражением (3). В отличие от повторителя на БТ, смещающего выходной сигнал «к земле» на 0,6 вольт, повторитель на ПТ смещает выходной сигнал относительно входа к «+» питания на величину:

$$U_{\text{зм}} = U_{\text{от}} T1 \left( 1 - \sqrt{\frac{I_{\text{с}}}{I_{\text{от}} T1}} \right) \quad (4)$$

где  $U_{\text{от1}}$  и  $I_{\text{от1}}$  напряжение отсечки и начальный ток стока Т1.

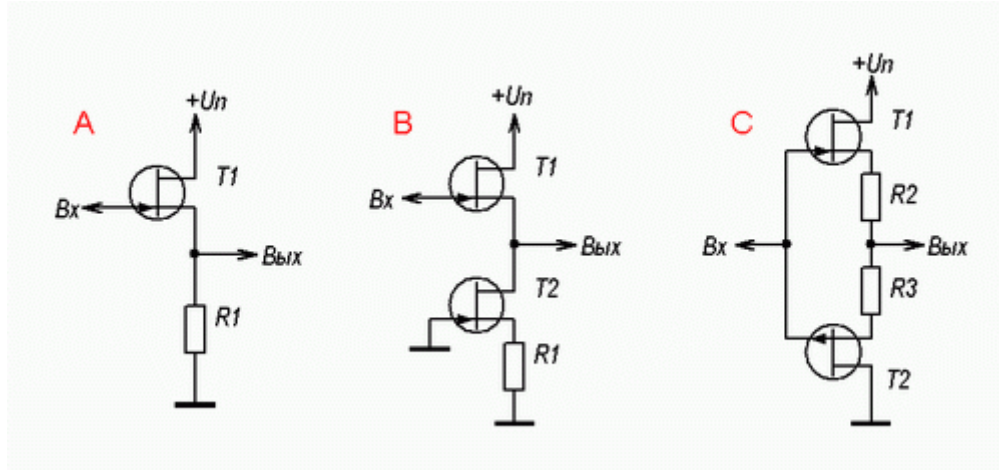


Рис.4. Истоковый повторитель

Наиболее распространен истоковый повторитель по схеме рис.4А. Т.к. ПТ нагружен на сопротивление  $R_1$ , то его сопротивление вместе с сопротивлением канала транзистора образуют делитель напряжения, уменьшающий  $K_u$  до значения 0,8-0,9 (типичные значения для подобных схем).

Коэффициент усиления по напряжению несложно приблизить к 1, заменив резистор в цепи истока источником тока (рис.4В). Кроме того, использование источника тока в цепи истока значительно снижает нелинейные искажения, вызываемые изменением сопротивления канала при работе с сигналами большого уровня.

Такой каскад можно рекомендовать как преобразователь импеданса для организации «байпаса» или при использовании в последующих каскадах маломощных ОУ на биполярных транзисторах и т.д.

И последняя схема (рис.3С) построена на ПТ с каналами разного типа. Среди отечественных ПТ такие пары образуют КП303Ж-КП103Ж; КП303А-КП103И; КП303В-КП103К. При использовании транзисторов с отсечкой менее 1V (КП303Ж-КП103Ж) и отличающихся друг от друга начальным током стока не более чем на 20%, резисторы  $R_2$  и  $R_3$  можно исключить совсем. Емкость затвор-исток ПТ с каналом р-типа в несколько раз выше входной емкости п-канальных ПТ, поэтому единственный недостаток такого повторителя – примерно в пять раз большая входная емкость. Выходное же сопротивление такого повторителя приблизительно в два раза ниже, чем на схемах 4А или 4В.

Ниже приведено несколько практических схем повторителей на ПТ.

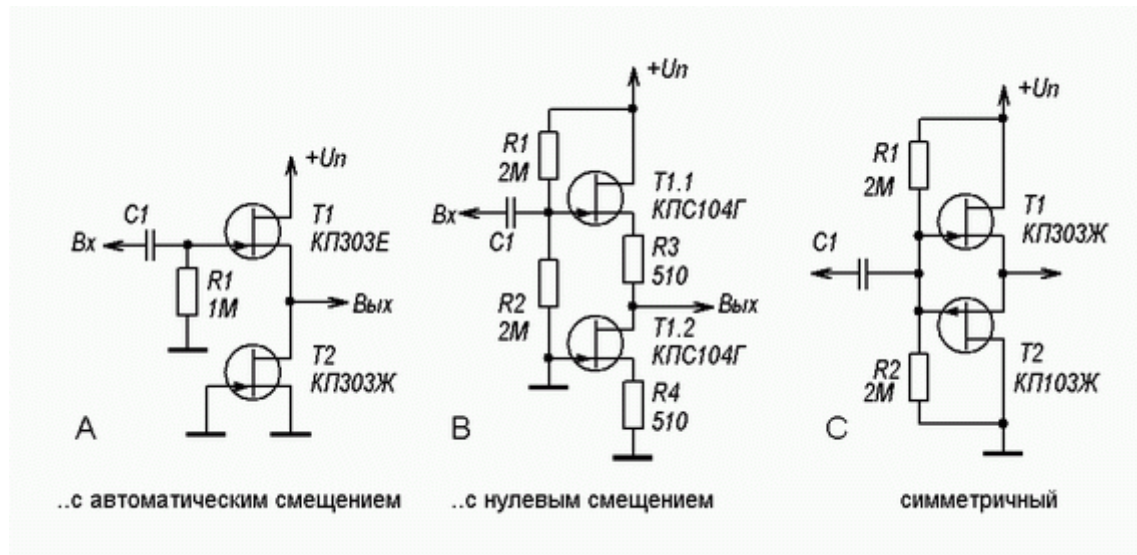


Рис.5. Практические схемы повторителей на ПТ.

На рис.5А использованы транзисторы с существенно разными напряжением отсечки и начальным током стока (для КП303Е  $U_0=3..6V/I_0=8..15mA$ , для КП303Ж  $U_0=0,5..0,8V/I_0=0,5..0,8mA$ ). Выходной сигнал согласно формуле (4) автоматически смещается «на верх», что позволяет подключать такой повторитель к источнику, гальванически связанному с землей (*н-р, непосредственно к ЗС гитары*). Максимальная амплитуда положительной полуволны в этом случае на 0,3V больше  $U_{зи}$  по формуле (4).

На рис.5В повторитель построен на сборке из двух почти одинаковых ПТ в составе сборки: повторитель имеет очень малые искажения и практически нулевой сдвиг выхода относительно входа. Выходное сопротивление – около 1кОм.

На рис.5С изображена практическая реализация простейшего пушпульного повторителя на ПТ (ограничивает сигнал в отличие от повторителя на БТ кругло). Из-за параллельного включения транзисторов по переменному току уровень шума теоретически снижается на 3дБ (*на практике 0..1дБ из-за более высокого шума р-канальных ПТ*). Входная емкость – 30пФ, выходное сопротивление – около 300 Ом.

Элементы  $R1, R2, C1$  в схемах по рис.5В и ри.5С при подключении непосредственно к каскадам с выходным потенциалом равным  $+1/2U_n$  следует исключить.

## Классическая схема с общим истоком (ОИ)

Внешне аналогична распространенной ламповой схеме с общим катодом.

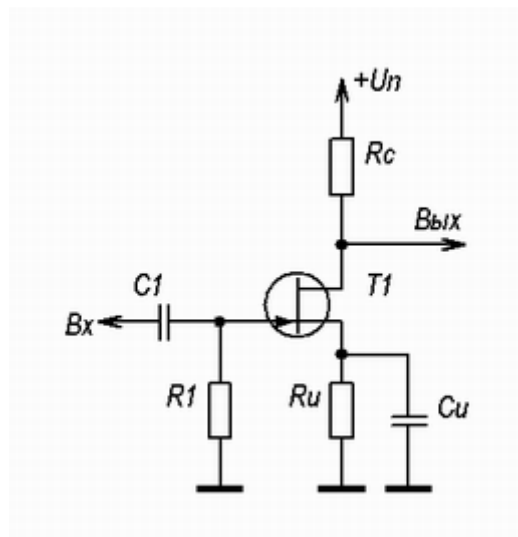


Рис.6. Схема с общим истоком.

Передаточные характеристики каскада с ОИ, определяются следующими выражениями:

Входное сопротивление:  $R_{вх}=R_1$ ,

Выходное сопротивление:

$$R_{вых} = \frac{r_i \cdot R_c}{r_i + R_c}$$

Коэффициент усиления:

$$K_U(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{g} + \frac{1}{\frac{1}{R_u} + j\omega C}} \cdot \frac{r_i \cdot R_c}{r_i + R_c} \quad (5)$$

где:  $R_c$  – сопротивление нагрузки в цепи стока;

$r_i$  – внутреннее сопротивление ПТ (*сопротивление канала, умноженное на  $\mu$* );

$g$  – крутизна ПТ при заданном токе стока.

Т.к. каскад с ОИ нагружен в цепи стока на резистор сравнительно небольшого номинала, то влиянием внутреннего сопротивления ПТ можно пренебречь, и для этого случая:

$$R_{вых} \approx R_c, \quad K_U(\omega) \approx \frac{R_c}{\frac{1}{g} + \frac{1}{\frac{1}{R_u} + j\omega C}} \quad (6)$$

(В схеме с общим катодом резистор в цепи анода имеет сопротивление, больше внутреннего сопротивления лампы, поэтому общее усиление каскада будет определяться в основном внутренним сопротивлением лампы).

Емкость в цепи истока влияет на АЧХ каскада. В итоге усиление на частотах ниже  $f_H$  определяется формулой:

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_u C}; \quad K_U \approx \frac{R_c}{R_u + \frac{1}{g}} \quad (7)$$

А на частотах выше  $f_B$  – выражением:

$$f_B = \frac{g}{2\pi C}; \quad K_U \approx g \cdot R_c \quad (8)$$

Подставим сюда выражение для крутизны и, приняв, за  $U_R$  – падение напряжения на  $R_C$  получим:

$$K_U \approx \frac{2U_R}{U_0} \sqrt{\frac{I_0}{I_c}} \quad (9)$$

Как видно из формулы (9) коэффициент усиления можно увеличить:

- выбрав ПТ с большим начальным током стока;
- выбрав ПТ с малым напряжением отсечки;

- увеличивая напряжение питания и сопротивление в цепи стока;
- уменьшая ток стока ПТ.

Реально достижимый коэффициент усиления по напряжению каскада с резистивной нагрузкой составляет в районе от 3 до 30 раз.

Наибольшее влияние на коэффициент усиления каскада оказывает выбор рабочего тока стока  $I_c$ , значение которого следует выбирать достаточно малым (0,1..0,3mA). Это достигается выбором  $U_{зи}$  близким к напряжению отсечки. В линейных устройствах такой режим не используется, т.к. для него характерен большой уровень нелинейных искажений, но в нашем случае это не недостаток, а скорее достоинство. Только надо иметь ввиду, что при уменьшении тока стока ухудшаются шумовые характеристики ПТ (пропорционально корню четвертой степени из тока стока), поэтому в самом первом (от гитары) каскаде ток стока лучше выбирать в районе  $\frac{1}{4}$  начального тока стока – в этом случае достигается максимальный динамический диапазон по входу. *(Рассуждения эти относятся не к этому конкретно каскаду, а ко всем каскадам на ПТ по схеме ОИ с любым типом нагрузки).*

При выборе  $U_{зи}=U_0-0,6V$ , кроме того, достигается наибольшая термостабильность рабочей точки.

Обычный каскад по схеме ОИ с резистивной нагрузкой (рис.6) имеет ряд недостатков, которые делают его малоприменимым для использования в гитарной электронике.

1. Невысокий коэффициент усиления каскада *(даже при использовании ПТ с малой отсечкой и высокой крутизной типа 2SK170, 2SK117 и им подобных усиление каскада редко достигает 30)*;
2. Необходимость установки режимов по постоянному току. Каскад, спроектированный под ПТ с определенными параметрами, вообще не будет работать как усилительное устройство при установке ПТ с  $U_0$  или  $I_0$ , большими или меньшими более чем на 25%. С учетом того, что разброс параметров ПТ в пределах одной серии и типа может превышать 50% – каскад будет неработоспособен (без подстройки) в половине *(а то и больше)* случаев при использовании других ПТ этой же серии;
3. Спектр ограниченного таким каскадом сигнала имеет много высокочастотных составляющих, не самым благоприятным образом украшающих звук.

Единственным и достаточно сомнительным достоинством такого каскада является его относительная простота. Из всего вышесказанного следует, что применение таких каскадов для обработки сигнала гитары не является самым лучшим решением.

## Мю-каскад с автоматической установкой режимов по постоянному току

Заменив резистор в цепи стока источником тока, имеющим большое сопротивление по переменному току, можно значительно увеличить коэффициент усиления каскада по напряжению *(приблизить его к собственному коэффициенту усиления ПТ – мю)*. Существует несколько вариантов реализации источника тока на втором ПТ. Наиболее подходящей с точки зрения отсутствия необходимости последующей настройки режимов по постоянному току является схема, изображенная на рис.7:

*(данная схема, как мю-каскад или мю-повторитель, известна достаточно давно – еще с ламповых времен, применительно к ПТ упоминается, например, в книге А.Г.Милехина «Радиотехнические схемы на полевых транзисторах». МРБ,1976. стр.30. Подобное решение также использовано в статье «Полевой транзистор во входном каскаде малошумящего УЗЧ», автор С.Федичкин, Радио№10,1988. Именно такая схема была опубликована в одной из совковых брошюр аж в далеком 1983г (сходите на <http://www.sugardas.lt/~igoramps/article29.htm>).*

*У буржуев с конца 90-х годов прошлого столетия такая схема активно культивируется неким J.Orman-ом, видимо неожиданно открывшим для себя ее).*

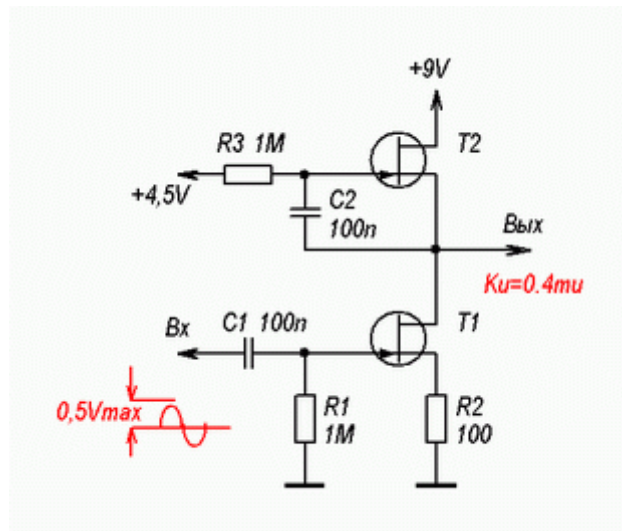


Рис.7. Схема с ОИ и повторителем в качестве динамической нагрузки

Режимы работы по постоянному и переменному току в этой схеме устанавливаются независимо друг от друга. По переменному току повторитель на T2 является динамической нагрузкой для T1, (т.е. представляет собой электронный резистор с сопротивлением  $\mu R_{кан T2}$ ), а по постоянному току он автоматически устанавливает на своем истоке напряжение, большее, чем на затворе на величину:

$$U_{ист T2} = U_{0 T2} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{0 T2}}} \right) \quad (10)$$

Кроме того, такая схема является фильтром высоких частот, что позволяет осуществлять одновременно и некоторую частотную обработку сигнала.

Для наглядности ниже приведена АЧХ подобного каскада на КП303В ( $m=55$ ) для конкретных значений  $R$  и  $C$ .

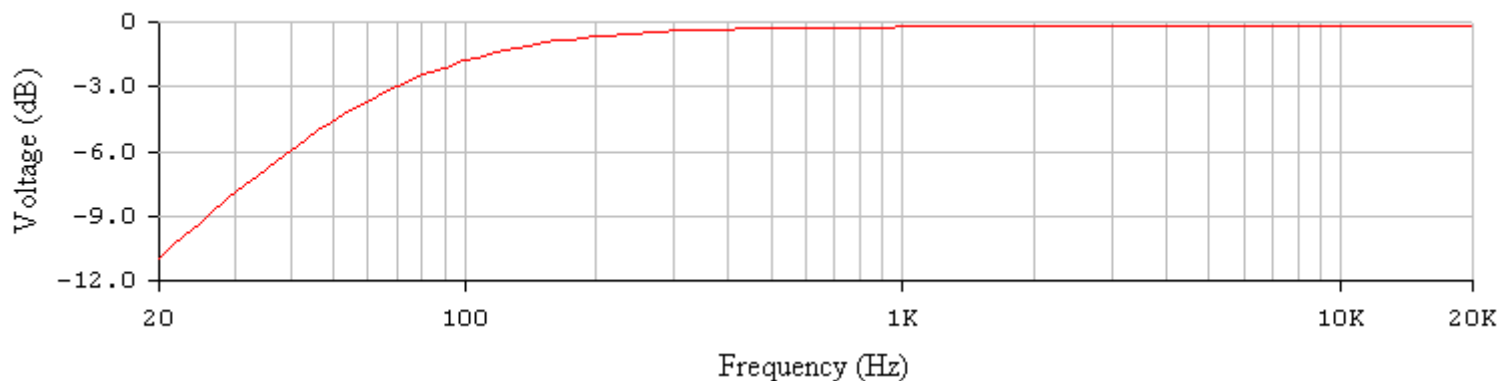


Рис.8. АЧХ каскада по рис.7. ( $R=1MOм$ ,  $C=0,1мкФ$ ).

Как видно из рисунка, АЧХ имеет спад в сторону низких частот. Подбором  $R$  и  $C$  можно изменять частоту среза образовавшегося фильтра и устанавливать желаемую окраску звука.

Ориентировочно частоту среза схемы на рис.7 можно определить по формуле:

$$f_H = \frac{R_3 \cdot C_2}{2\pi \cdot K_U}$$

где  $K_U$  – коэффициент усиления каскада выше частоты среза (математическими выкладками утомлять не будем).

Схема по рис.7 имеет два недостатка.

Во-первых, максимальная амплитуда положительной полуволны входного сигнала в лучшем случае ограничена значением 0,4-0,5V, и при дальнейшем увеличении сигнала на входе выходной сигнал начинает напоминать ограничение на БТ. Сопротивление со стороны входа также резко уменьшается, приводя к ограничению уже входного сигнала. При параллельной обработке входного сигнала несколькими устройствами это не допустимо. Иногда для смягчения этого эффекта в цепь затвора включают резистор сопротивлением 68кОм (аналогично ламповым схемам), что не является самым оптимальным решением с точки зрения шумовых характеристик.

Во-вторых, коэффициент усиления такого каскада, называемого часто мю-каскадом, составляет на самом деле лишь около 0,4μ (т.е. получается в районе 30-100). Часто этого недостаточно для получения нужной чувствительности каскада.

Диапазон входных напряжений проще всего расширить, увеличив напряжение смещения затвора относительно истока. Достичь этого можно включением в цепь истока Т1 резистора сопротивлением 1..2кОм, диода или светодиода (в зависимости от  $U_0$  используемого ПТ). В случае использования диода, ток в цепи истока формирует напряжение  $U_{zi}=0,5..0,6V$ . Дифференциальное сопротивление диода мало (50..200Ом), что по переменному току эквивалентно подключению в цепь истока резистора с таким же сопротивлением, поэтому усиление каскада в основном будет определяться сопротивлением канала ПТ.

При использовании в качестве Т1 ПТ с напряжением отсечки 2-3V, вместо диода целесообразно включить несколько диодов последовательно или светодиод. Дифференциальное сопротивление светодиодов меньше (20-30Ом), поэтому они даже предпочтительнее, т.к. обеспечат несколько большее усиление.

В таблице 2 приведены ориентировочные значения падения напряжения для диодов и светодиодов.

Таблица 2.

| Тип прибора       | Падение напряжения |
|-------------------|--------------------|
| Германиевый диод  | 0,2...0,3V         |
| Кремниевый диод   | 0,5...0,6V         |
| ИК-светодиод      | 1,0...1,1V         |
| Красный светодиод | 1,3...1,4V         |
| Зеленый светодиод | 1,7...1,8V         |

При использовании для создания смещения резистора уменьшается общее усиление каскада, но увеличивается его линейность.

Применяемое в ламповых схемах включение параллельно катодному резистору конденсатора улучшает характеристики только ламповых схем. В случае ПТ при подключении конденсатора в цепь истока параллельно истоковому резистору лишь увеличивается усиление каскада. Перегрузочная же способность для входного сигнала как и в случае работы каскада при начальном токе стока (без  $R_H$ ) становится равной около 0,4V. Кроме того, значительно ухудшается линейность каскада. По этим причинам использовать конденсатор в цепи истока в гитарных схемах на ПТ не целесообразно.

Что касается второго недостатка, то увеличить усиление такого каскада несложно включением в цепь истока Т2 дополнительного резистора.

Динамическое сопротивление источника тока на Т2 определится в этом случае сопротивлением канала ПТ и резистора  $R$  в цепи истока:

$$r_i = \mu \cdot \left( \frac{l}{g} + R \right) \quad (11)$$

где  $m$  – собственный коэффициент усиления ПТ, ограниченный внутренней обратной связью транзистора.

Сопротивление источника тока при этом возрастет в несколько раз и он будет лишь в малой степени шунтировать сопротивление со стороны стока нижнего по схеме ПТ.

После таких нововведений (рис.9) усиление каскада увеличивается до  $0,8\mu$ , а максимальная амплитуда положительной полуволны входного сигнала возрастает до  $1V$ , чего достаточно в подавляющем большинстве случаев. (При использовании зеленого светодиода и ПТ с отсечкой  $-3V$  максимальный входной сигнал без ограничения по входу может достигать  $4V$  двойной амплитуды.)

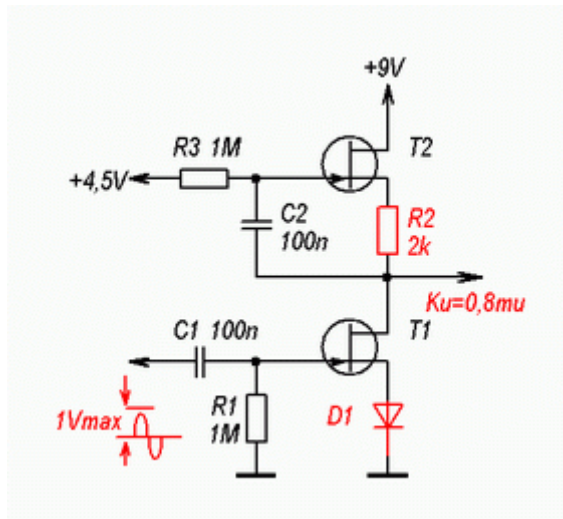


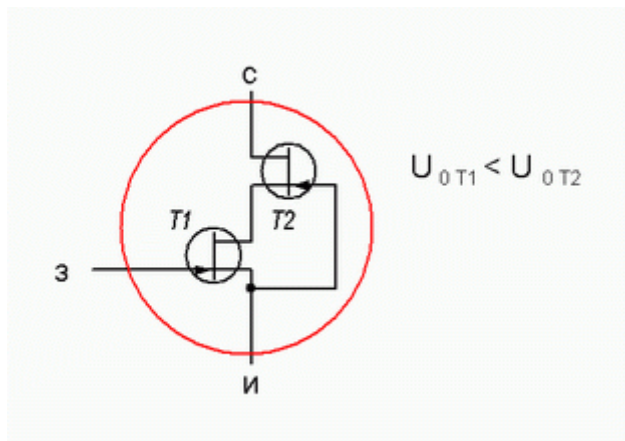
Рис.9. Каскад с динамической нагрузкой и усилением  $0,8\mu$ .

Диод D1 в цепи истока из-за своей нелинейности ухудшает общую линейность каскада, поэтому такую схему следует использовать в основном в искажающих устройствах. При необходимости обеспечения линейности усиления (н-р, в канале Clean) диод D1 лучше заменить резистором с сопротивлением равным сопротивлению R2. Усиление каскада снизится при этом до  $0,5\mu$ .

При необходимости спектральный состав выходного сигнала схем по рис.7 и рис.9 можно изменять в сторону повышения уровня четных гармоник смещением потенциала точки  $+4,5V$  в ту или иную сторону. Того же можно достичь, изменяя сопротивление R2 (в ламповых устройствах этого достигают изменением сопротивления резистора в цепи анода).

## Мю-каскад на каскодных ПТ

Дальнейшее увеличение усиления возможно при использовании составных ПТ, включенных по каскодной схеме (это тоже не открытие, схема на каскодных ПТ описана, например, в журнале Радио №11 за 1984г., стр.28-29, автор В.Поляков, «Каскодный и дифференциальный усилители на полевых транзисторах»). Да и наш американский друг, сиамский близнец Хоровец-Хилл, тоже регулярно, в каждом переиздании, вскользь упоминает такое включение при описании источников тока на ПТ).



Преимуществом каскодных схем на ПТ является их простота, поэтому добавив всего два транзистора в схему по рис.9, мы получаем усилительный каскад (рис.10) с качественно новыми характеристиками: коэффициент усиления по напряжению увеличивается до 3000 раз в полосе частот от 100Гц (определяется емкостью C2) до 10кГц и более (т.к. выходное сопротивление схемы составляет несколько МОм, то верхняя граница полосы частот определяется в основном емкостью следующего каскада).

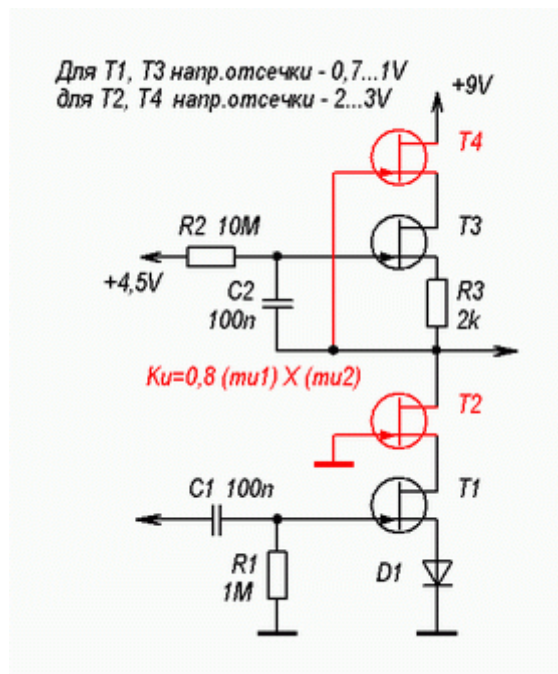


Рис.10. Каскодная схема с динамической нагрузкой (Задание на внимание: найди 10 отличий в схемах 8 и 10)

Для нормальной работы каскода напряжения отсечки дополнительных транзисторов T2, T4 должны быть в 2-4 раза больше чем у T1 и T3. Усиление такой схемы составляет около  $0,8\mu_{T1}\mu_{T2}$ . Для достижения высокого коэффициента усиления каскада сопротивление резистора R2 должно быть порядка 10МОм. На выходе каскада обязательно использование буфера с высоким входным сопротивлением и малой входной емкостью (*повторитель на 2SK117, например, здесь использовать не стоит*). Емкость C2 следует выбирать в районе 47..330п, при этом частота среза низких частот будет составлять приблизительно 300..50Гц.

## Усилители на ПТ в режиме ограничения сигнала

Кроме усиления, каскады в гитарной электронике иногда должны еще и красиво ограничивать сигнал, оставляя его при этом музыкальным.

Характер ограничения выходного сигнала определяется в первую очередь выходными ВАХ используемых в ограничителе активных элементов: электровакуумных ламп, биполярных (БТ) или полевых (ПТ) транзисторов. Всенародная любовь к ламповым устройствам такого рода вызвана именно плавностью ограниченного лампой сигнала, что снижает уровень высокочастотных гармоник и продуктов интермодуляционных искажений. Наиболее жесткое ограничение формируют биполярные транзисторы, у которых, как известно, крутой переход из режима усиления в режим насыщения.

ПТ, имея ВАХ, подобную ВАХ пентода, занимают промежуточное положение между ламповыми триодами и биполярными транзисторами. Но использование динамической нагрузки, позволяет получить ограничение каскадов на ПТ, подобное ограничению лампового каскада.

Рассмотрим характер ограничения сигнала рассмотренными ранее каскадами на ПТ.

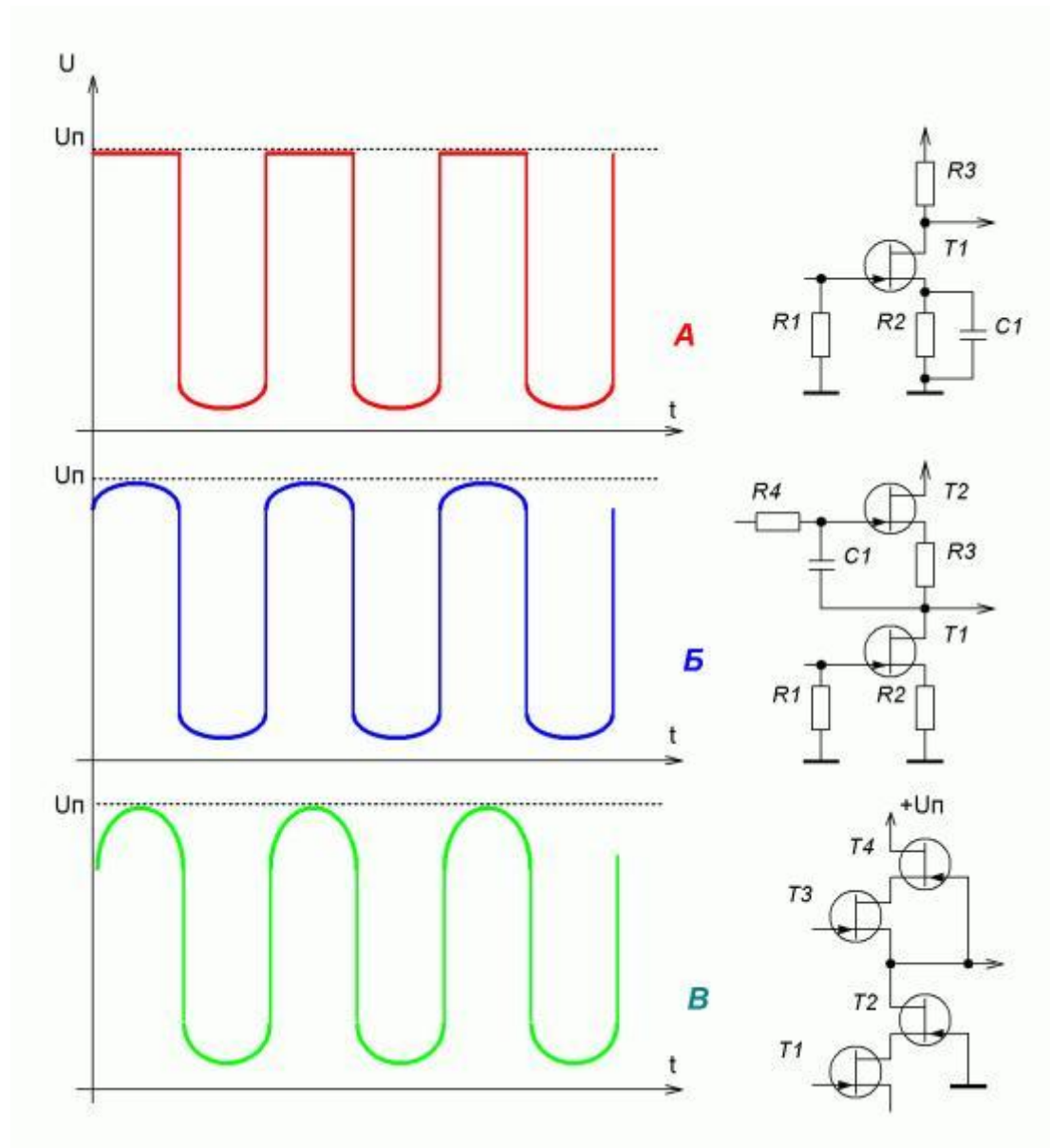


Рис.11. Выходной сигнал каскадов на ПТ.

Как видно из рисунка, форма сигнала на выходе классического каскада с резистором в качестве нагрузки плавно ограничена снизу и жестко – сверху (рис.11А). Спектр выходного сигнала содержит большое количество нечетных и четных высокочастотных гармоник (так называемый «песок»).

Гораздо более приятное ограничение сверху формирует каскад с динамической нагрузкой, схематично изображенный на рис.11Б. Эффект закругления верхней полуволны наблюдается из-за уменьшения  $\mu$  верхнего ПТ при приближении сигнала на выходе к «+питания» (см.рис.3). Такой каскад в зависимости от типа ПТ обеспечивает усиление в линейной области от 20 (для ПТ с высоким напряжением отсечки  $U_0$ ) до 400 (для ПТ  $U_0=0,3...0,4V$ ). Использование ПТ с большим  $U_0$  требует применения трех таких каскадов для обеспечения достаточного усиления, использование же ПТ с низким  $U_0$  во-первых, ограничивает максимальную амплитуду положительного полупериода входного сигнала значением 0,6-0,8 вольт, во-вторых, формирует достаточно протяженную «линейную» область (от 0,05 до 0,95 напряжения питания). Т.е. переход от почти вертикальной части выходного сигнала к горизонтальной части, соответствующей полностью открытому или закрытому ПТ, происходит всего за 1/20 напряжения питания, что излишне увеличивает уровень высокочастотных гармоник в спектре выходного сигнала.

*(Картинки ограничения сигнала полевыми транзисторами, моделированные в средах типа EWB или Multisim отдалено, но похожи на сигналы на экране реального осциллографа).*

Наиболее мягко по форме выходной сигнал ограничивает каскад на составных ПТ по схеме каскада, схематично изображенный на рис.11В. Усиление такого каскада в линейной области (0,3-0,7 $U_{пит}$ ) составляет до 3000 и более, плавно уменьшаясь до единиц при приближении рабочей точки на выходе к «+ $U_{пит}$ » или «земле». (Страшно и неудобно произносить эти слова, но ограничение такого каскада ничем

не отличается от ограничения лампы с резистором в цепи катода и с резистивной нагрузкой. Для любителей ламп: плевки с мониторов лучше вытирать ватным тампоном, смоченным смесью 1:3 ректифицированного и гидролизного спиртов).

## Измерение параметров транзисторов

Практически все схемы, приведенные ниже, будут работоспособны при установке любого исправного ПТ указанного на схеме типа, но при построении некоторых каскадов подбор транзисторов с определенными параметрами весьма желателен.

Измерить основные параметры ПТ несложно. Для этого необходимы лишь резистор в районе 200кОм...1МОм, источник питания +9V и вольтметр-миллиамперметр (подойдет любой, хоть китайский за 3\$). Далее по приведенным на рис.12 схемам измеряются  $I_0$  и  $U_0$ .

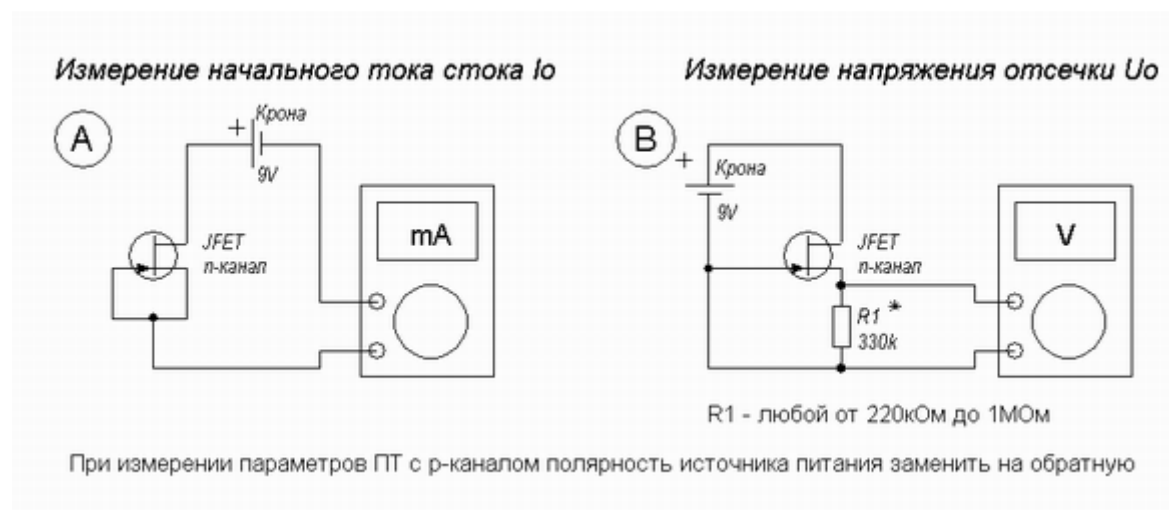


Рис.12. Схемы измерения  $I_0$  и  $U_0$  полевых транзисторов.

При необходимости для любого конкретного ПТ по этим параметрам можно вычислить: начальную крутизну  $g_0$ , крутизну в рабочей точке  $g$ , ток стока  $I_c$  при заданном  $U_{зи}$ , смещение потенциала истока относительно затвора  $U_{зи}$  при заданном  $I_c$  (см. формулы 1, 2, 4 в начале статьи).

## Схемы

Не будем вдаваться в пространные рассуждения о том, как получает свой звук тот или иной производитель искажающих устройств. Большинство искажителей строят по стандартной схеме:

*Входной усилитель* → *ограничитель* → *темброблок*.

### Входной усилитель

Входной усилитель осуществляет предварительное усиление сигнала гитары, проводя заодно (но не всегда) и частотную обработку сигнала: завал частот ниже 100..700Гц или выделение полосы частот в районе 0,6..1,5кГц или выше. При реализации искажающих устройств на ОУ обычно используют резонансные цепи (обычно на гираторах, ибо так проще, а что оно шипит – так бох с ним..), настроенные на частоты 0,7-1кГц делающие звук однообразно гнусаво-певучим, но зато с четкой атакой и без выраженных хрипов (будем избегать дефекационной терминологии, хотя она здесь вполне уместна). В ламповых устройствах резонансные фильтры применять не принято, т.к. при этом во многом теряется тембровая выразительность самой гитары, да и звук перегруженной лампы не так безобразен, как звук ОУ в режиме ограничения (и даже ОУ с диодами в ООС). При использовании ПТ разумнее использовать «ламповый» подход к вопросам тембровой обработки сигнала, т.е. применять для формирования тембра лишь простые RC цепи.

С функцией входного усилителя прекрасно справляется схема по рис.9 с добавленным на выходе повторителем.

## Ограничитель

После входного усилителя сигнал обрабатывается ограничителем. Для построения псевдолампового ограничителя наиболее подходит каскодная схема по рис.13. *(независимо от стиля исполняемой музыки)*:

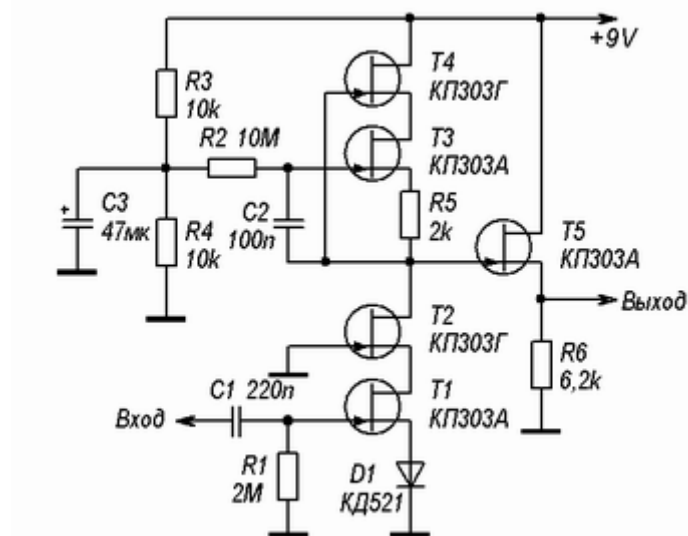


Рис.13. Ограничитель по каскодной схеме с динамической нагрузкой.

Т.к каскад по схеме рис.13 способен на огромное усиление, то даже одного такого каскада достаточно для получения овердрайва с красивым и приятным ограничением и высокой чувствительностью *(ниже такая схема приводится)*.

В качестве Т2 и Т4 желательно использовать ПТ с  $U_{отс}=2...3В$  (КТ303Г,Д,Е; J202;2N5458 и т.д.,) в качестве Т1, Т3 – КТ303А,Б; J201, и т.п. (отсечка должна быть в пределах 0,7-1V). Наилучшие результаты с точки зрения коэффициента усиления каскада получаются для случая, когда  $U_{отс}$  Т2,Т4 приблизительно в три раза больше  $U_{отс}$  Т1,Т3 .

Диод в цепи истока Т1 служит для увеличения максимальной амплитуды входного сигнала до приблизительно 2V двойной амплитуды.

АХЧ схемы по рис.13 при усилении около 3000 имеет спад -6дБ/окт на частотах выше 10кГц. В качестве Т5 не стоит использовать ПТ с большой входной емкостью, например, 2SK117 и подобные, *(т.к верхняя частота может уменьшиться до 3кГц и ниже)*.

Частота среза нижних частот усилителя-ограничителя определяется емкостью С2, и при указанных номиналах составляет около 150Гц.

Для снижения уровня входных шумов обязательно применение малошумящих транзисторов. Из отечественных в качестве малосигнальных Т1 и Т3 наиболее подходят КТ303А. Нормированная производителем и указанная в справочниках спектральная плотность шума этих транзисторов - 30нВ/корень(Гц) приведена для частоты 20Гц. На частотах выше 500Гц ни один из имеющихся у автора 50 транзисторов из разных партий не имел плотность шума более 5нВ/корень(Гц). Это соответствует ЭДС шума на входе ПТ в полосе 80-5000Гц около 0,35мкВ. КТ303Б, Ж при аналогичных вольт-амперных характеристиках имеют в этой же полосе уровень шума примерно в 2-3 раза выше *(из-за высокой частоты сопряжения избыточного шума)*.

Т.к. коэффициент усиления по напряжению транзистора Т1 составляет единицы, то большое значение с точки зрения шума всего каскада имеет правильный выбор транзисторов Т2, Т4. В качестве «сильносигнального» выбран малошумящий КТ303Г, предназначенный для применения в зарядочувствительных усилителях. ЭДС шума этого транзистора не превышает 0,3мкВ (80-5000Гц). КТ303Д,Е имеют, как правило, высокую частоту сопряжения избыточных шумов и поэтому их использование нежелательно *(ЭДС шума до 1,5мкВ)*. По той же причине нежелательно использование приборов КТ302. Шумовые параметры КТ307 исследованы автором в

недостаточном объеме, но судя по имеющимся экземплярам они в области частот до 2-3кГц хуже, чем у КП303В,Г. Российские КП303А и Г по шумовым параметрам, ВАХ и  $\mu$  в целом соответствуют зарубежным J201 и J202, и поэтому при напряжении питания ниже 25 В могут заменять друг друга в большинстве схем. И еще одно преимущество отечественных ПТ серии 303 – в типе корпуса. Он у них металлический, с выводом от корпуса, что тоже немало помогает в нелегком деле борьбы с наводками. В качестве Т1 вполне подойдут и знаменитые 2SK170 и даже 2SK117, они обеспечат примерно на 10дБ меньший уровень шума (*но только при замкнутом накоротко входе*), а влияние на АЧХ повышенной проходной емкости этих ПТ будет нейтрализована каскодной схемой, в которой, как известно, эффект Миллера отсутствует. (*Только убедитесь, что отсечка используемого ПТ в пределах 0,7-1V*).

**Внимание!!!** Мю-каскад на каскодных ПТ малочувствителен к пульсациям питающего напряжения, но чувствителен к наводкам сети переменного тока частотой 50Гц, поэтому обязательно его размещение внутри металлического экрана (*наводки устраняются полностью*).

## Темброблок.

На выходе ограничителя стандартным устройством является темброблок. При построении «примочек» на ПТ можно непосредственно использовать хорошо зарекомендовавшие себя обычные пассивные темброблоки ламповых устройств. Схему темброблока можно построить по классической «маршаловской» (3 ручки, обычно для утяжеленного звука) или «фендеровской» (три ручки, обычно чистый канал). Можно использовать также вариант «хотбокс» с двумя регуляторами либо собрать упрощенный вариант с одним.

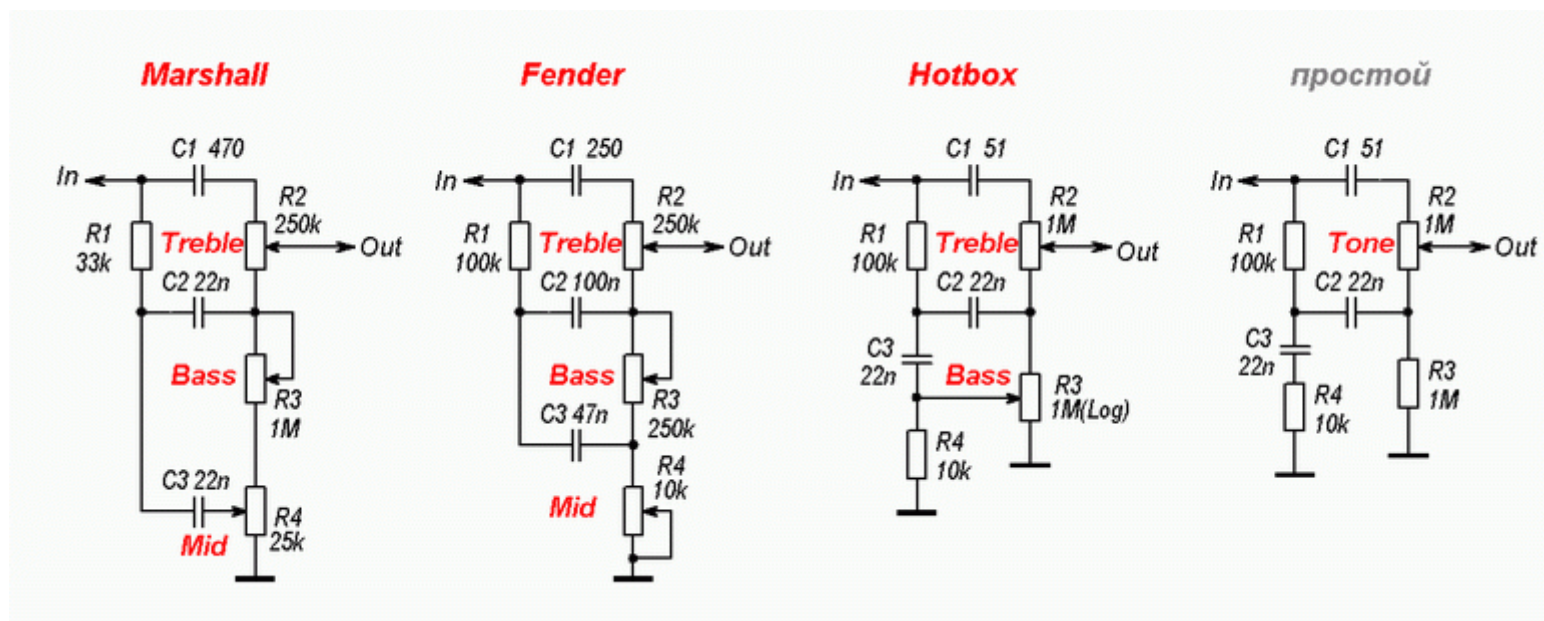


Рис.14. Пассивные формирователи тембра.

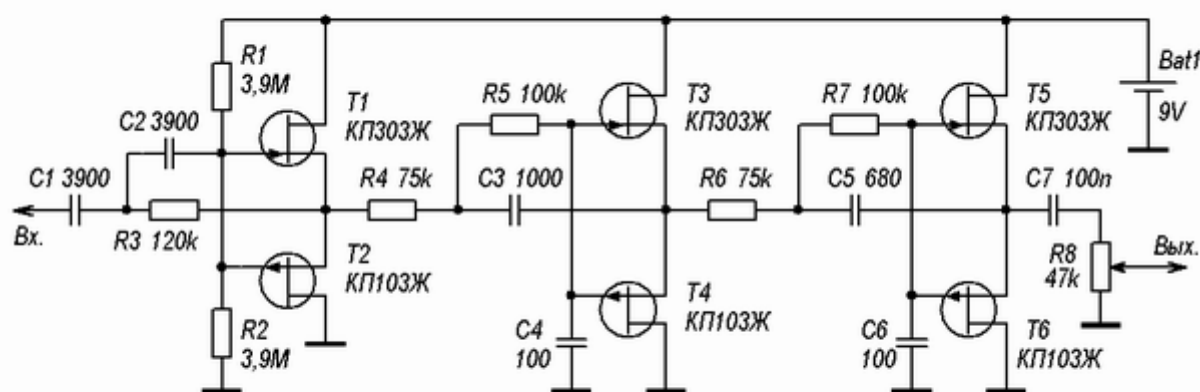
(Не будем рассматривать различные вариации с ручками «Пресенс» и т.д. При необходимости – самостоятельно воспользуйтесь вариантами регуляторов тембра известных устройств.)

После регуляторов тембра, имеющих большое выходное сопротивление, всегда полезно установить повторитель. Т.к. выход темброблока гальванически связан с «землей», то наиболее подходит здесь повторитель по схеме рис.4А или еще лучше рис.5А.

Если предполагается игра в гитарный кабинет (*с правильной АЧХ*), то на выходе этого повторителя следует установить регулятор уровня и на этом успокоиться. Если же предполагается использовать обычный кабинет, то с выхода повторителя сигнал стоит обработать фильтром низких частот, ослабляющим частоты выше 5кГц. Лучшие результаты получаются при использовании фильтров Бесселя или Баттерворда 3-го и более порядка со спадом 18 и более дБ на октаву. Схемы таких фильтров на ОУ-повторителях известны, как и формулы расчета частот среза, поэтому мы их здесь не приводим. Вместо ОУ в такие фильтры можно ставить повторители на ПТ. Следует лишь иметь в виду, что, так как выходное сопротивление повторителей на ПТ составляет 0,2..1кОм, то номиналы сопротивлений в RC-цепях лучше выбирать в районе 47..470кОм.

При необходимости играть «в линию» в любую схему полезно добавить «эмулятор кабинета», который можно собрать полностью на полевых транзисторах, например по схеме рис.15:

**Эмулятор гитарного кабинета на комплементарных ПТ**



на истоках всех ПТ должно быть около +4,5V

Рис.15. Эмулятор кабинета на комплементарных ПТ.

Преимуществом использования здесь ПТ вместо ОУ является мягкость ограничения при перегрузе, которое при использовании комплементарных ПТ – симметричное. Чтобы перегрузить устройство, напряжение на входе должно быть не менее 4-5V двойной амплитуды. На *T1, T2* собран ФВЧ-2, с «резонансом» в области 100Гц. Сместить частоту резонанса, например вниз, можно пропорционально увеличив номиналы *C1* и *C2*. На *T3, T4, T5, T6* собран ФНЧ четвертого порядка с подъемом в области 3-4кГц, и спадом на 26дб/окт на частотах выше 5кГц. АЧХ устройства подобна характеристикам эмуляторов в известных устройствах типа «SunsampGT2» «MarshallSpeakersimulator»

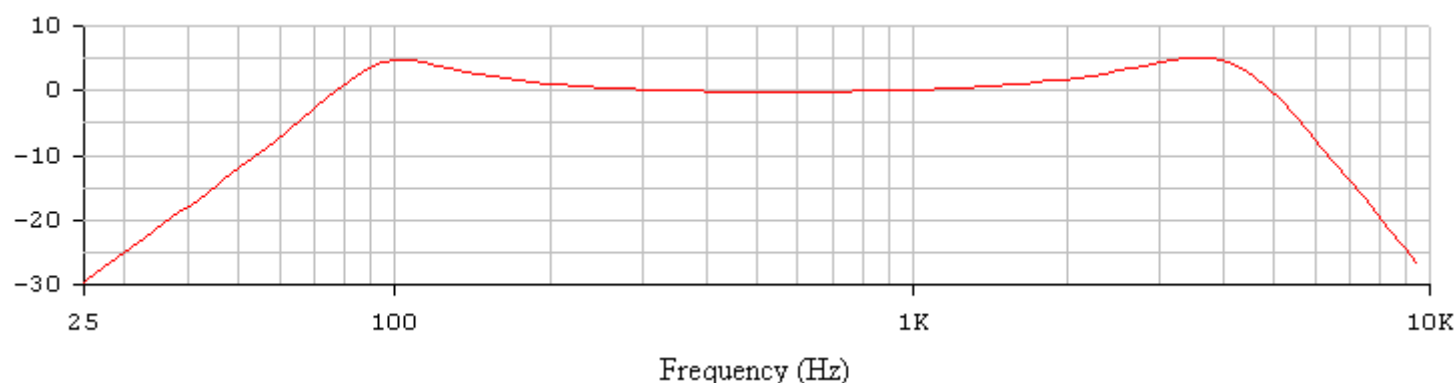


Рис.16. АЧХ эмулятора кабинета (моделирована в EWB5, совпадает с реальной).

Высоту НЧ «резонанса» можно снизить, увеличив сопротивление *R3*, при этом понизится и частота среза фильтра. В области верхней середины тембр можно смягчить уменьшив емкость *C3* и *C5* в 1,5 раз, и во столько же раз увеличив емкость *C4* и *C6*.

## Практические схемы

Приведенные ниже схемы – это различные комбинации рассмотренных ранее каскадов, использованных в обычных для искажающих устройств узлах.

Начнем с самой простой схемы, формирующей сигнал на выходе, подобный сигналу на выходе двухкаскадного лампового ограничителя, в котором первая лампа усиливает сигнал, вторая - ограничивает.



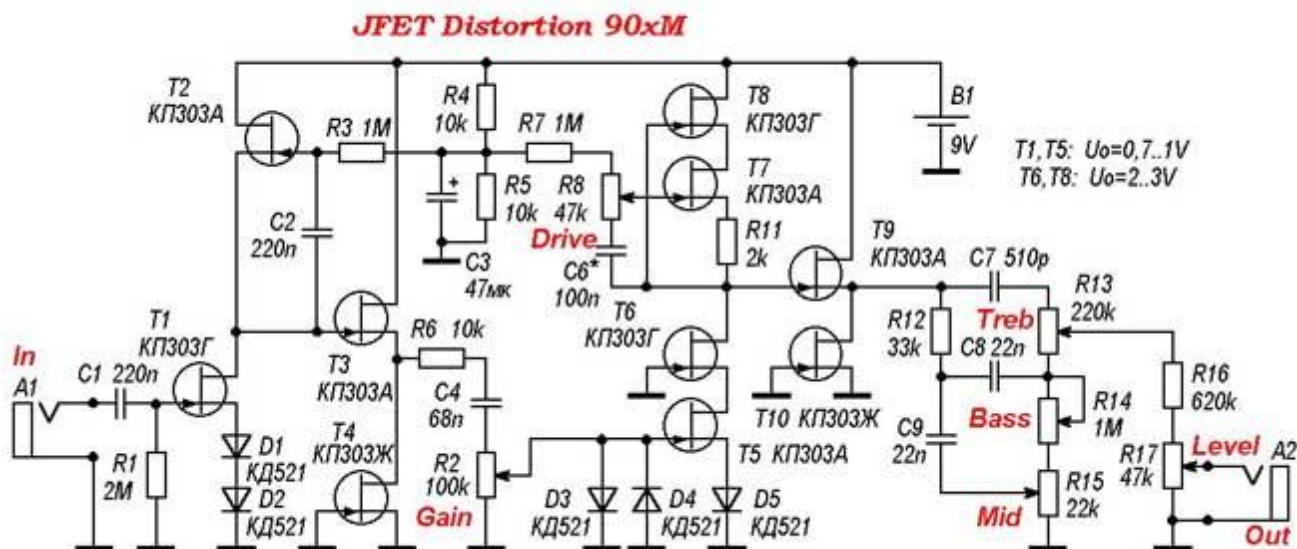


Рис.19. Вариант для использования с обычными (не гитарными) кабинетами.

Для получения более плотного звука, на входе добавлен предварительный усилитель на T1-T2 по схеме рис.9. Максимальный входной сигнал каскада – до 3V двойной амплитуды. В качестве T1 желательно выбрать ПТ с отсечкой 1,5-2V. На выходе добавлен простейший буферный каскад на двух ПТ. Начальный ток стока у T4 должен быть меньше чем у T3. При использовании типов ПТ, указанных в схеме это требование удовлетворяется практически всегда (для КП303Ж обычно  $I_0=0,5..0,8mA$ , для КП303А обычно  $I_0=0,8..2mA$ ).

Диоды D2//D3 ограничивают амплитуду сигнала на входе второго усилителя уровнем 1V двойной амплитуды. Исключение этих диодов приводит из-за перегрузки по входу второго усилителя к гораздо менее музыкальному звуку на выходе. Кроме того цепь C4-R6-D2//D3 формирует атаку сигнала, т.к для небольших сигналов частота среза ФВЧ, состоящего из C4(R9+R10) составляет около 70Гц, а для больших сигналов диоды D2//D3 шунтируют R9+R10, повышая частоту среза фильтра и формируя таким образом четкую атаку. (Не пугайтесь наличия в схеме встречно-параллельно включенных диодов, так нередко поступают в своих ламповых преампах и именитые производители: взять, к примеру, ламповый Marshall 900 preamp – только там диоды включены смешной кучей из пяти штук, но ограничивают сигнал точно так же).

Далее сигнал с движка регулятора степени искажений поступает на каскодный усилитель с динамической нагрузкой, собранный на T5-T10. Максимальный коэффициент усиления каскада снижен до 700 установкой R7 небольшого номинала, главное же качество каскада – плавное ограничение – при этом сохранилось. Коэффициент усиления каскада регулируется с помощью R8 в районе 20..700.

Далее схема повторяет предыдущую. Байпас организуется также аналогично предыдущей схеме. Звук обеих схем может быть значительно облагорожен, если на выход добавить эмулятор кабинета по рис.15.

Если необходим тяжелый и плотный звук при игре в обычный кабинет, и есть коробочка с четырьмя дырочками для крутилок, то есть смысл обратить внимание на схему на рис.20:

### JFET Distortion D90x2

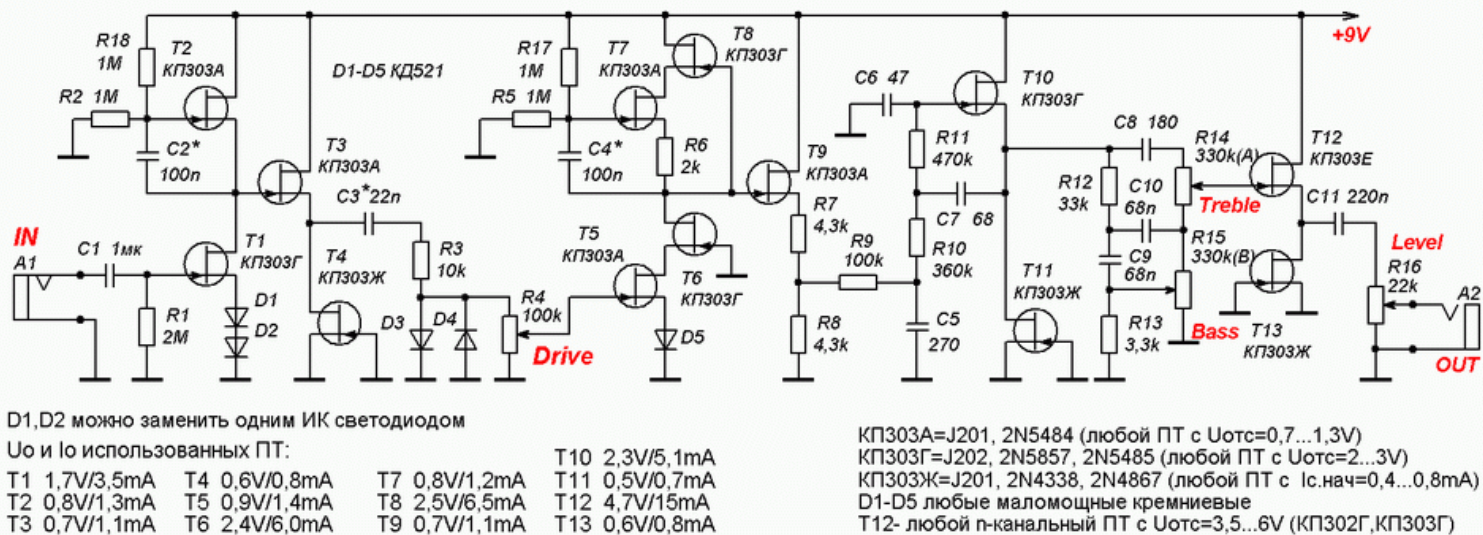


Рис.20. Вариант «ограничитель1–ограничитель2–ФНЧ3–тембр2»

Первая половина схемы практически повторяет предыдущую, за исключением того, что первый транзистор в первом каскаде – «сильноточный», маломощный КП303Г с двумя диодами в цепи истока для создания смещения около 1V. Максимальный сигнал без ограничения по входу – 3V двойной амплитуды. Усиление каскада около 40. Регулятор усиления установлен непосредственно на входе второго каскада.

На T10, T11 собран ФНЧ-3 Бесселя с частотой среза около 5кГц, который убирает лишние высокие при работе с негитарным ккабинетом. При использовании гитарного кабинета этот каскад можно исключить. Далее тембр формирует известный вариант двухручного регулятора Treble-Bass. (С учетом того, что в стандартной боссовской коробочке, имеющейся в распоряжении авторов, всего четыре дырочки для регуляторов – на тембр выделили две).

На рис.20 указаны параметры использованных ПТ, которые служат лишь для ориентировки и вполне могут отличаться на 20%.

Для любителей схем попроще ниже приводится еще одна «утяжеленная» схема без архитектурных излишеств (три крutiлочки) также на отечественной элементной базе:

### JFET\_Overdrive

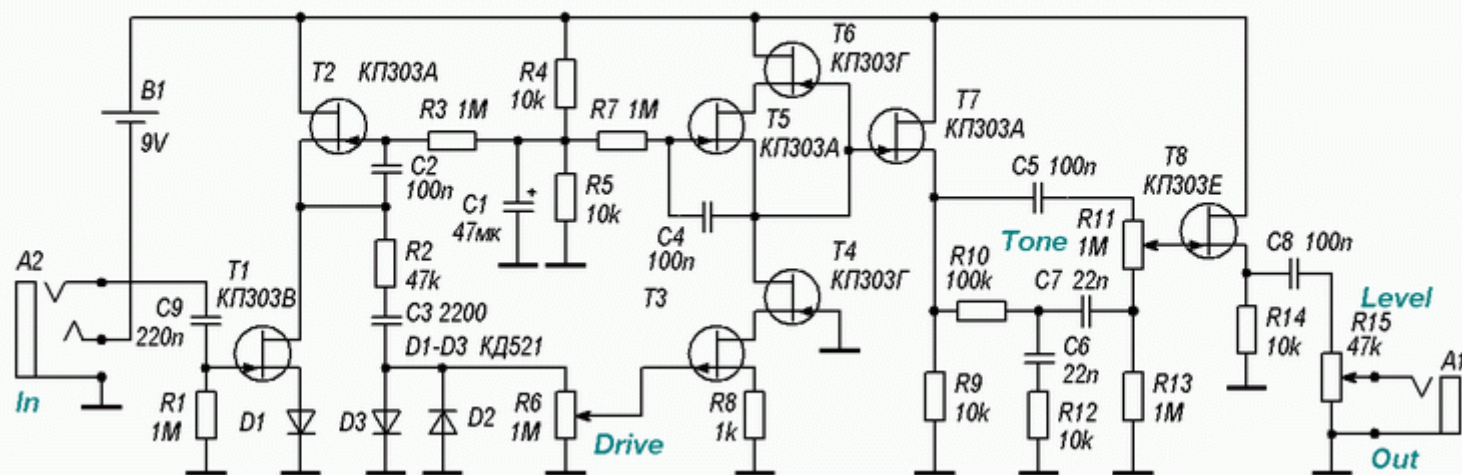


Рис.21. Упрощенный вариант предыдущей схемы.

Такой вариант при работе с гитарным кабинетом более чем устроит начинающего паяльника-музыканта.

# Заключение

Каждая из схем не является истиной в последней инстанции, и может быть доработана с учетом индивидуальных потребностей.

Многое из того, что предлагается в статье строить на ПТ, можно сделать и на ОУ. Но ОУ – это материал для производства в первую очередь ширпотреба. Уникальные качества ПТ – низкий шум при работе с высокоимпедансными источниками, плавность выходных ВАХ при грамотных схемотехнических решениях позволяют собрать на них гораздо более качественно звучащие устройства. Причем, как и в ламповых устройствах, в устройствах на ПТ имеются огромные возможности по индивидуальной отстройке.

Цель настоящей публикации была показать, что качество звука искажающих устройств в гораздо большей степени зависит от схемотехники, нежели от характеристик использованных в них элементов, хотя и характеристики элементов играют важную роль.

Тем, кто искренне считает, что в каком-нибудь J201 электроны движутся быстрее, чем в нашем КП303А, помочь трудно. Но мы надеемся, что умным людям статья что-нибудь полезное дала.