

# 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  $U_0=-2V$ ,  $I_0=4mA$ ).

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

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

где  $I_0$  – начальный ток стока (ток стока при  $U_{zu}=0$ );

$U_0$  – 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.

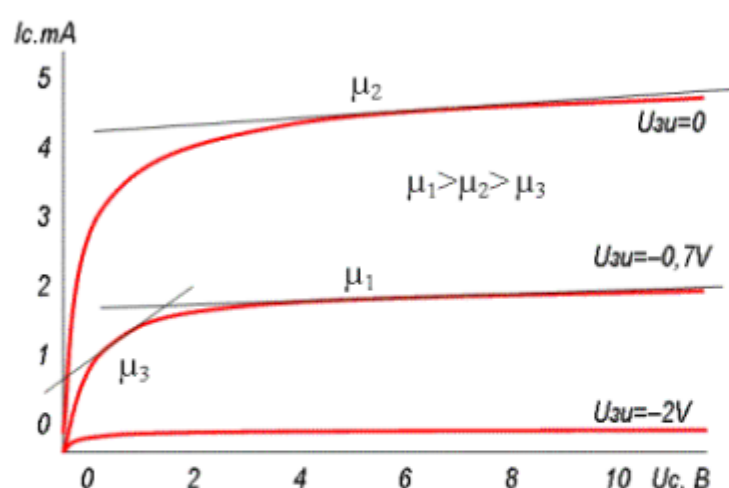


Рис.3. Выходные ВАХ n-канального ПТ

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.

$T_{un}$	$k$
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:

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

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:

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

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  $1 \frac{nV}{\sqrt{Гц}}$ , 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

тока 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:

$$U_{из} = U_{от1} \left( 1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{от1}}} \right) \quad (4)$$

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

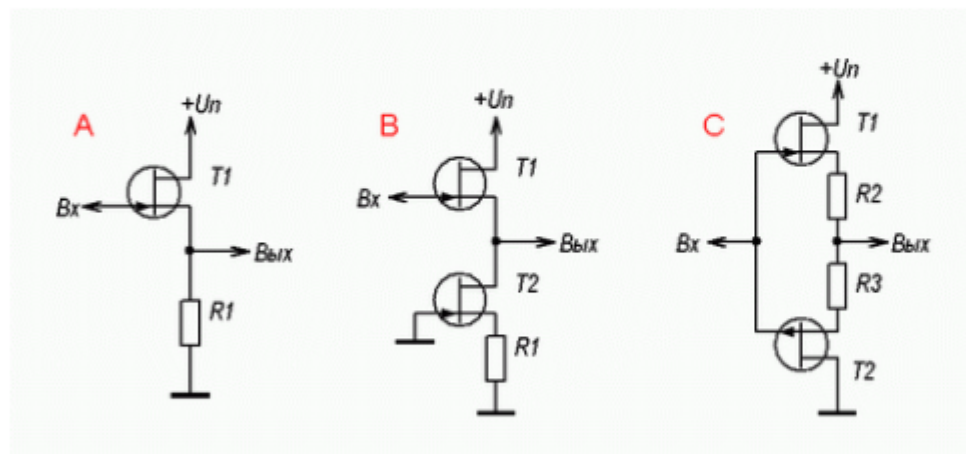


Рис.4. Источковый повторитель

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 n-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.

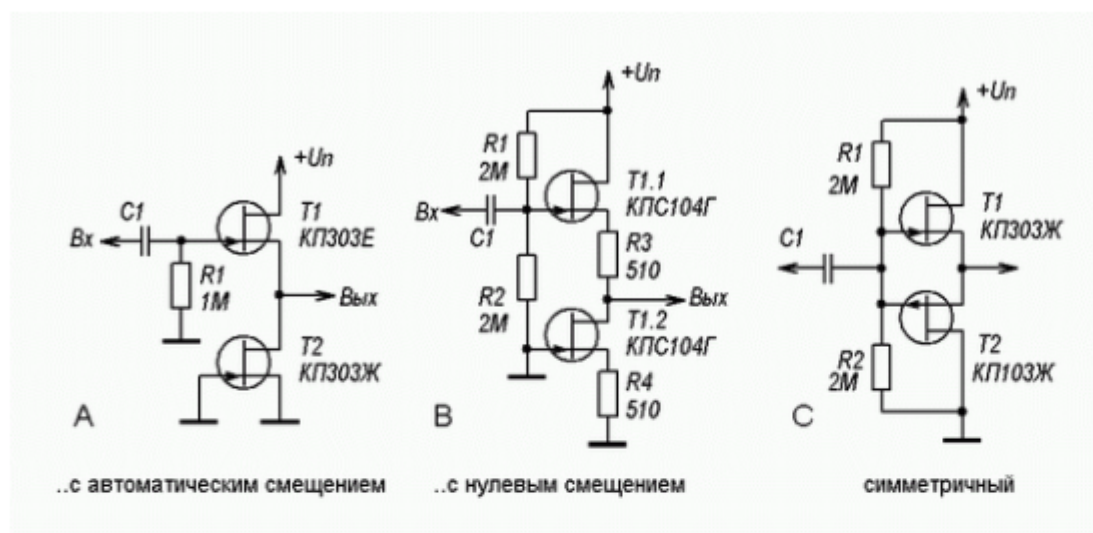


Рис.5. Практические схемы повторителей на ПТ.

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  $1k\Omega$ .

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 *p-канальных ПТ*). Входная емкость –  $30пФ$ , выходное сопротивление – около  $300\Omega$ .

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.

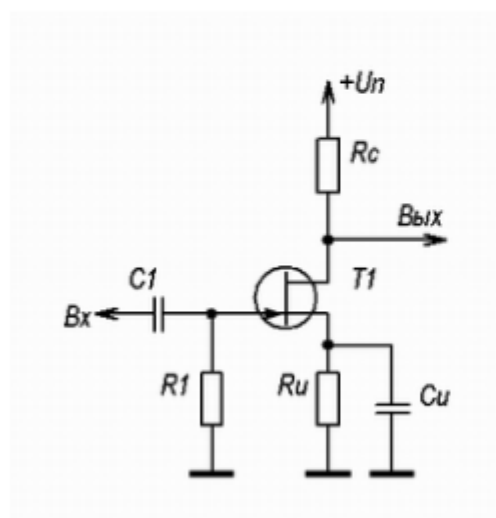


Рис.6. Схема с общим истоком.

Передаточные характеристики каскада с ОИ, определяются следующими выражениями:

Входное сопротивление:  $R_{\text{вх}} = R_l$ ,

Выходное сопротивление:

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

Коэффициент усиления:

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

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:

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

(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 ¼ 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

Заменяв 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 маломощного УЗЧ», автор С.Федичкин, Радио№10,1988. Именно такая схема была опубликована в одной из совковых брошюр аж в далеком 1983г (сходите на )*.

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