

Особенности применения полевых транзисторов

Полевые транзисторы (ПТ) широко применяются в аналоговой электронике, как в виде дискретных элементов, так и в составе интегральных микросхем. В отличие от биполярных транзисторов (БТ) полевые транзисторы имеют множество разновидностей, отличающихся по принципу действия, технологии производства и, как следствие, по внешним характеристиками, обуславливающим их схемотехническое использование. Классификация ПТ приведена на рис. 1.

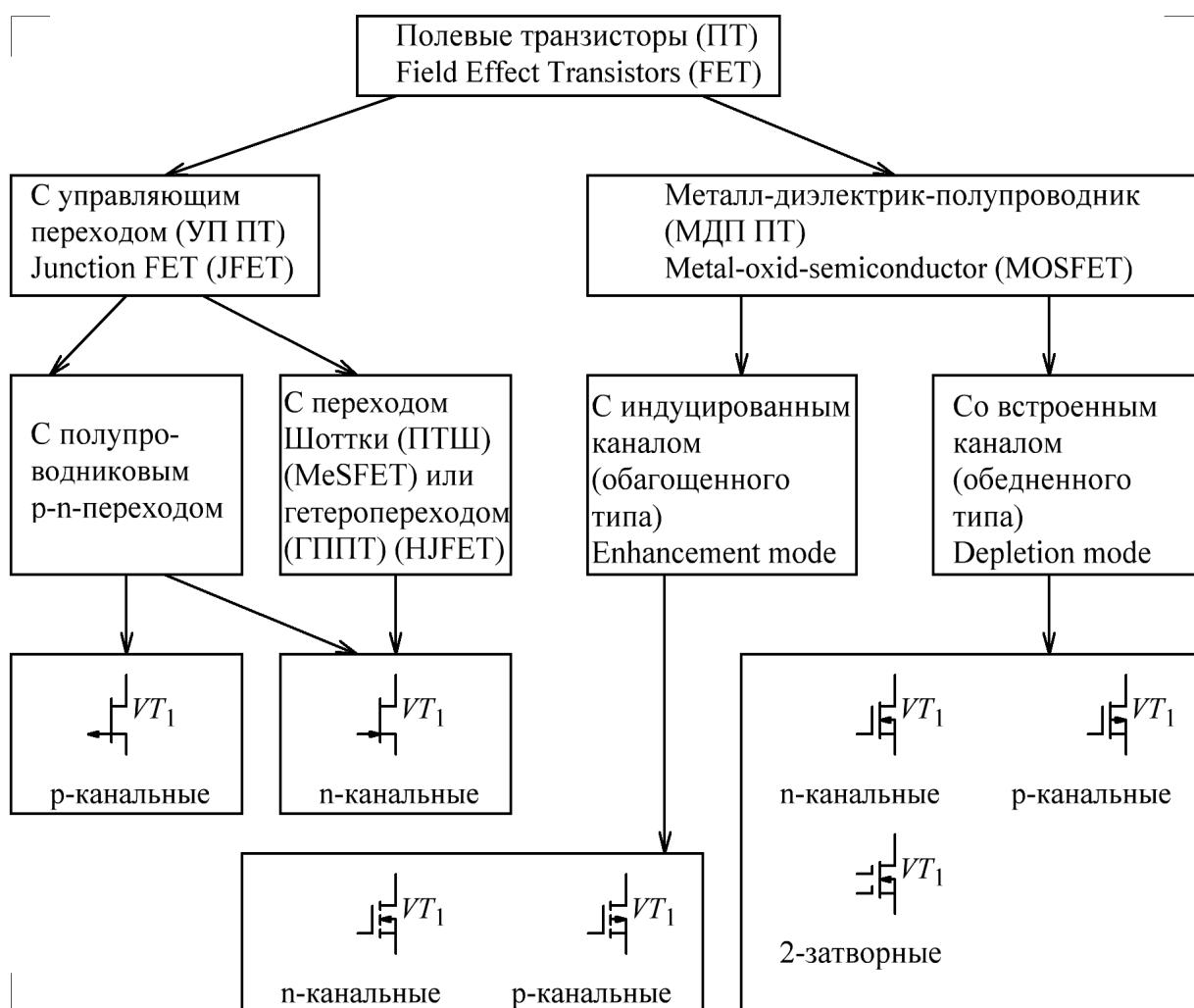


Рис. 1

ПТ делятся на две большие группы. Одна из них представлена приборами с управляющим переходом, причем управляющий переход может быть как обычным полупроводниковым $p-n$ -переходом, так и переходом со структурой металл-полупроводник, называемым также переходом Шоттки или даже гетеропереходом, представляющим собой многослойную структуру.

Другая большая группа ПТ представлена приборами с изолированным за-

твором со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Этот класс ПТ также представлен двумя подгруппами – приборами со встроенным каналом (обедненного типа) и приборами с индуцированным каналом (обогащенного типа). Как следует из названия канал приборов первого типа находится в проводящем состоянии при нулевом напряжении на затворе. Приборы второй группы требуют для перевода канала в проводящее состояние приложения к затвору отпирающего напряжения, полярность которого, соответствует полярности напряжения на стоке относительно напряжения на истоке.

По типу проводимости канала каждая из разновидностей ПТ также делится на 2 большие подгруппы с каналом n - или p -типа, что отражается на условных графических обозначениях направлением стрелки (рис. 1).

Для n -канальных ПТ напряжение на стоке должно быть положительным относительно напряжения на истоке. Для ПТ с каналом p -типа полярность должна быть обратной. В этом смысле n -канальные ПТ соответствуют биполярным n - p - n -транзисторам, а p -канальные биполярным транзисторам p - n - p -типа.

В общем случае работа ПТ описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, моделирующих как статические свойства прибора, так и его динамические характеристики. В инженерной практике для наглядности часто рассматривают две относительно независимые ситуации – работа транзистора на постоянном токе, т. е. при воздействии на электроды транзистора постоянными токами и напряжениями и функционирование транзистора на переменном токе в малосигнальном приближении в окрестности исходной рабочей точки (ИРТ).

Свойства транзистора на постоянном токе математически описываются системой нелинейных алгебраических уравнений или в графическом виде семействами статических вольт-амперных характеристик (ВАХ).

На переменном токе в малосигнальном приближении схема считается линейной, возможно использование метода комплексных амплитуд, полупроводниковый прибор характеризуется набором малосигнальных частотно зависимых комплексных параметров, а работа схемы оценивается комплексными частотными характеристиками.

Рассмотрим сначала работу ПТ на постоянном токе.

Разнообразие типов ПТ приводит к некоторому разнообразию статических ВАХ, и описываемых их параметров. Поскольку ток затвора ПТ имеет очень малую величину, входные ВАХ для ПТ не имеют практического смысла. Применяются выходные и проходные ВАХ. Семейство проходных ВАХ представляет собой зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при различных напря-

жения на стоке относительно истока. Семейство выходных ВАХ строится как зависимость тока стока от напряжения сток-исток при различных напряжениях на затворе.

Схемы для измерения или вычисления ВАХ приведены на рис. 2.

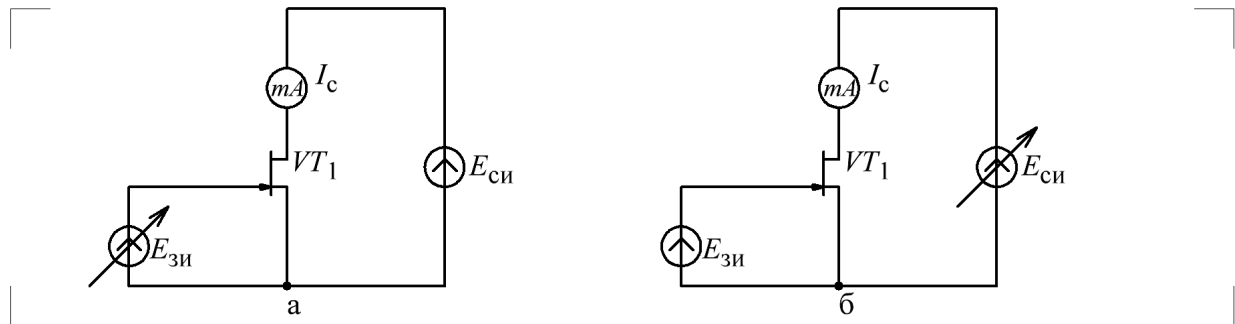


Рис. 2

В схеме рис. 2а варьируемым параметром является напряжение затвор-исток, зависимой величиной служит ток стока, а параметром является напряжение сток-исток. Поэтому с помощью данной схемы измеряется проходная ВАХ. Схема рис. 2б служит для измерения выходных ВАХ.

Вид проходной характеристики зависит от класса ПТ. Для ПТ с управляющим переходом и МДП ПТ со встроенным каналом характерны так называемые левосторонние характеристики (рис. 3а).

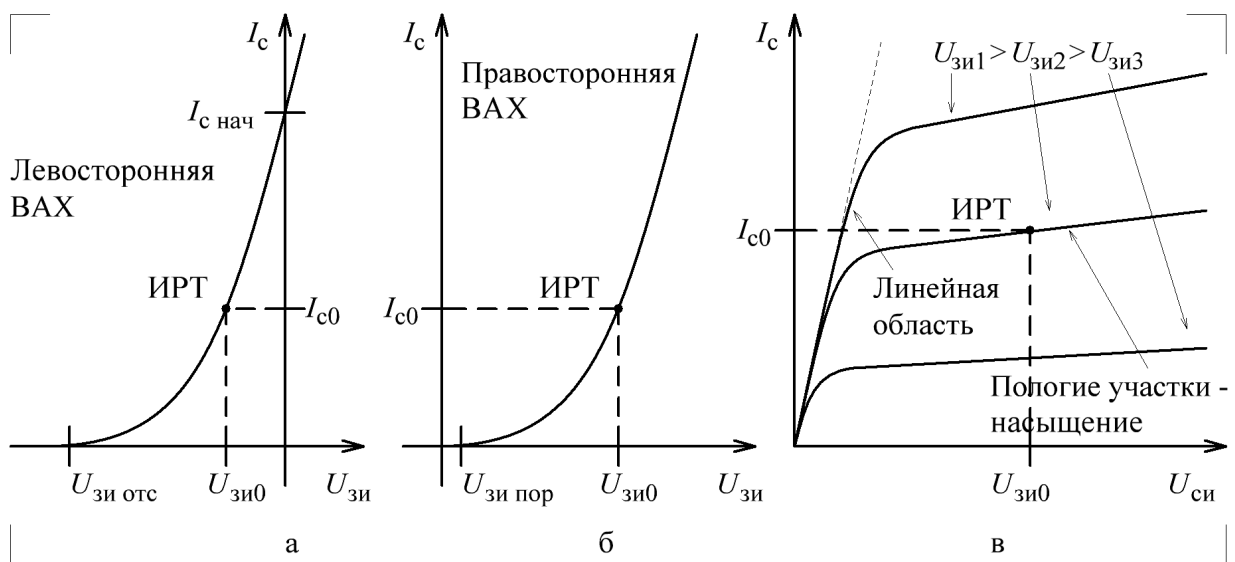


Рис. 3

В этом случае нулевое напряжение на затворе соответствует току стока, называемому начальным $I_{c \text{ нач}}$, близким к максимально допустимому значению для данного прибора. В процессе работы рабочая точка перемещается по проходной характеристике слева от вертикальной оси, соответствующей нулевому напряжению на затворе. Напряжение затвор-исток, при котором ток стока

уменьшается до некоторой малой величины (остаточный ток стока $I_{C\text{ ост}}$), называется напряжением отсечки $U_{\text{зи отс}}$.

Строго говоря проходные ВАХ представляют собой семейство характеристик при различных напряжениях сток-исток. Однако в рабочем режиме влияние напряжения сток-исток на ход проходной характеристики невелико, линии почти сливаются в одну и на рис. 3а для наглядности приведена лишь одна кривая.

На рис. 4 в качестве примера приведены статические проходные ВАХ мало мощного малощумящего транзистора *NE3210S01* компании *NEC*.

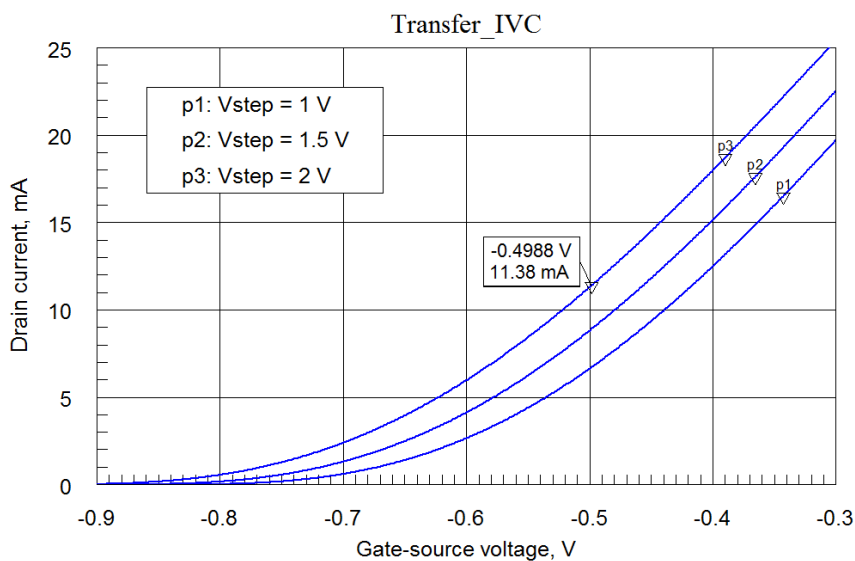


Рис. 4

Он относится к классу ПТ с управляющим переходом, поэтому имеет левосторонние проходные ВАХ. Видна также зависимость тока стока от напряжения на стоке.

Для транзисторов с индуцированным каналом характерны так называемые правосторонние характеристики (рис. 3б). В этом случае при нулевом напряжении на затворе ток через транзистор не протекает, а напряжение на затворе, при котором ток стока равен остаточному току стока, называется пороговым $U_{\text{зи пор}}$. Рабочая точка располагается справа от вертикальной оси, соответствующей нулевому напряжению на затворе.

Для этой же группы транзисторов возможен вариант, когда положение ИРТ соответствует нулевому напряжению на затворе, а в процессе работы РТ перемещается как в область положительных, так и в область отрицательных напряжений затвор-исток.

На рис. 5 в качестве примера приведены проходные ВАХ мощного высоко-

кочастотного транзистора SP201 компании Polyfet.

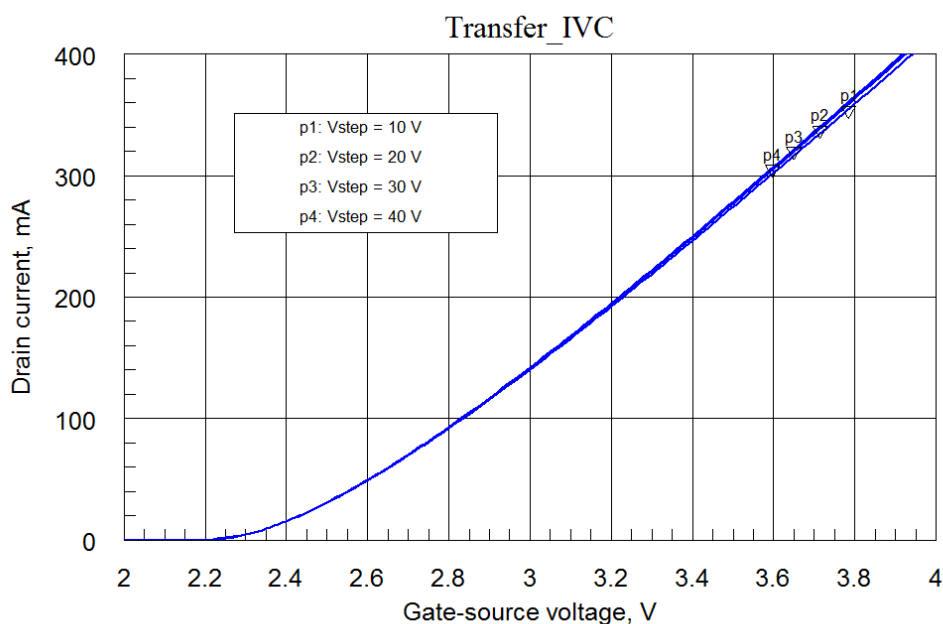


Рис. 5

Этот прибор относится к классу МДП-транзисторов с индуцированным каналом. Поэтому $U_{зи пор} > 0$. Видно также, что для данного прибора при изменении напряжения на стоке от 10 до 40 В положение проходной ВАХ практически не меняется.

Аналитическое выражение, связывающее ток стока и напряжение затвористок ПТ с управляющим переходом имеет следующий вид:

$$I_c = I_{c нач} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи ост}} \right)^2,$$

где $I_{c нач}$ – начальный ток стока при $U_{зи} = 0$, $U_{зи ост}$ – напряжение затвористок, соответствующее остаточному току стока $I_{c ост}$.

Для транзисторов с изолированным затвором формула проходной характеристики выглядит следующим образом:

$$I_c = k \left(U_{зи} - U_{зи пор} \right)^2,$$

где k – технологический параметр, $U_{зи пор}$ – напряжение затвористок, соответствующее остаточному току стока $I_{c ост}$.

Выходные ВАХ ПТ всех типов имеют сходный вид (рис. 3в) и различаются абсолютными значениями напряжений затвористок, являющимися для данного семейства характеристик параметрами. Эти напряжения могут быть положительными или отрицательными в зависимости от типа прибора. Принципиально то, что линия, соответствующая более высокому напряжению на затворе распо-

лагается выше линии, соответствующей низкому напряжению затвор-исток.

В отличие от биполярных транзисторов область крутого участка выходных ВАХ ПТ называется линейной областью, а область пологих участков – насыщением.

На рис. 6 в качестве примера приведено семейство выходных ВАХ транзистора *NE3210S01*, упоминавшегося ранее.

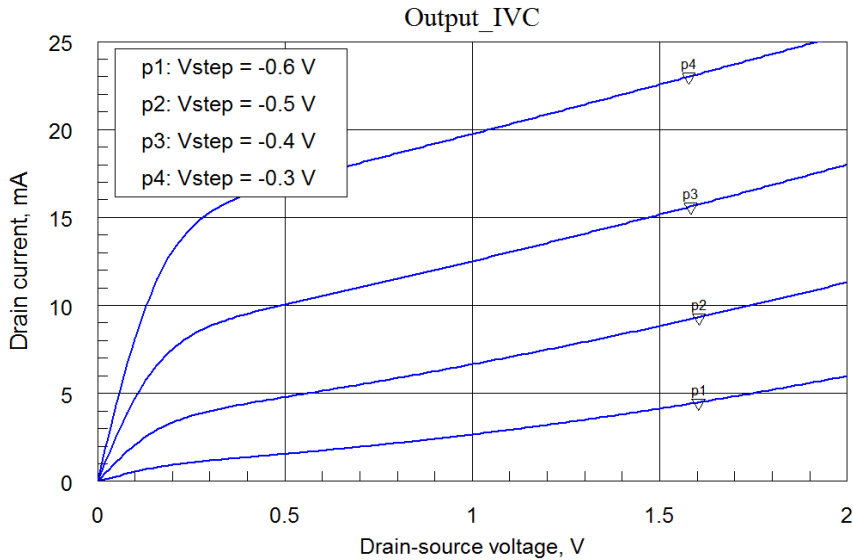


Рис. 6

На этом рис. кривые соответствуют напряжениям затвор-исток от минус 0,3 до минус 0,6 В с шагом 0,1 В.

Методы обеспечения положения ИРТ зависят от типа ПТ. Для ПТ с левосторонними проходными ВАХ на затворе требуется обеспечить отрицательный потенциал относительно истока, например с помощью дополнительного источника (рис. 7а).

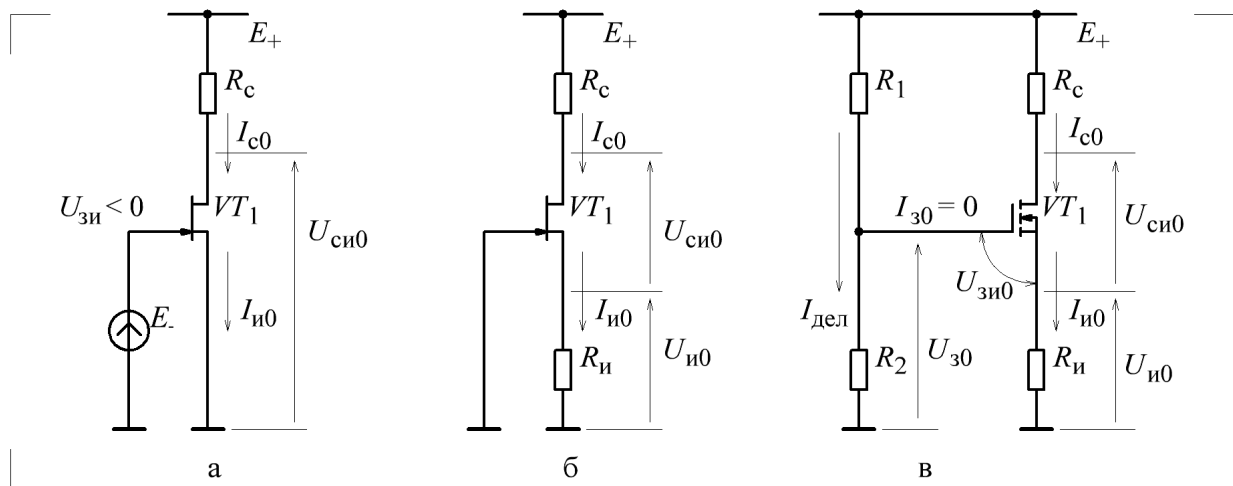


Рис. 7

Если отрицательное напряжение в схеме отсутствует, можно использовать падение напряжения на резисторе, устанавливаемом в цепь истока (рис. 7б). В этой схеме потенциал затвора равен нулю, а потенциал истока выше его на величину падения напряжения на резисторе $R_{и}$.

В случае ПТ с правосторонними проходными ВАХ схема стабилизации положения ИРТ аналогично той, что применяется для биполярных транзисторов (рис. 7в). Отметим, что в этой схеме напряжение $U_{зи0}$ определяется типом прибора и может быть в большой степени произвольным. Кроме того поскольку $I_{з0} = 0$, ток резистивного делителя $I_{дел}$ может иметь очень малую величину, а резисторы делителя соответственно – большое сопротивление.

Для стабилизации положения ИРТ широко применяется отрицательная обратная связь (ООС) на постоянном токе, следящая за током стока и вырабатывающая управляющее воздействие на затвор транзистора. Датчиком тока стока в простейшем случае является резистор, устанавливаемый в цепь стока. Для повышения коэффициента петлевой передачи в цепь обратной связи вводит усилители постоянного тока (УПТ). Поскольку при передаче напряжения от затвора к стоку происходит инверсия, то одним из основных требований к УПТ становится неинвертирующий характер усиления.

При работе в небольшом диапазоне температур хорошо работает схема с УПТ на БТ по схеме с общей базой (ОБ), как показано на рис. 8а.

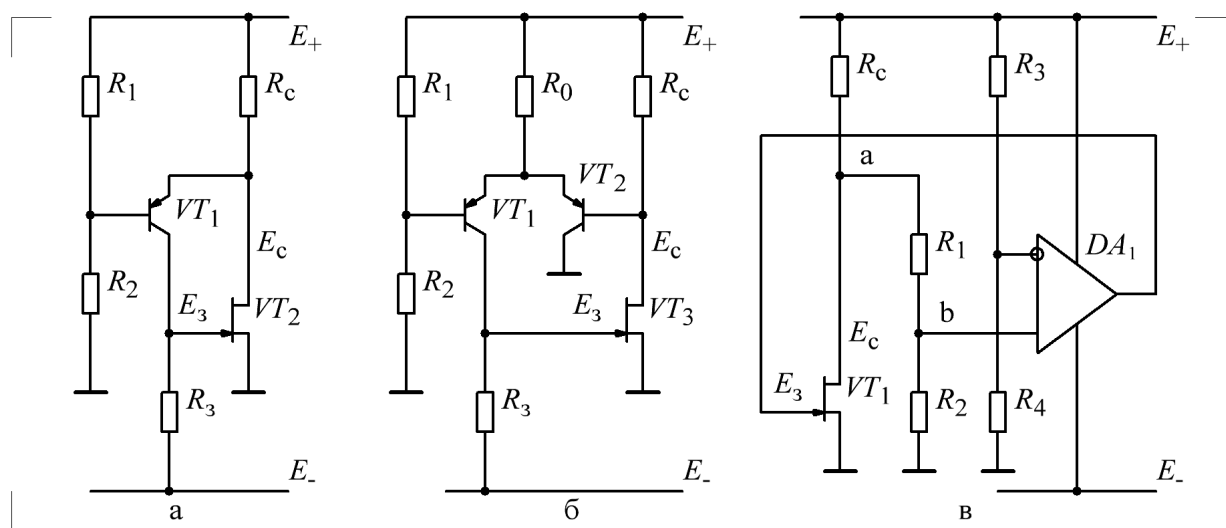


Рис. 8

В этой схеме при изменении тока стока изменяется падение напряжения на резисторе в цепи стока, а следовательно и потенциал стока. Эти изменения воздействуют на БТ, который вырабатывает компенсирующее воздействие на потенциал затвора. К недостатку данной схемы можно отнести невысокую темпера-

турную стабильность, поскольку температурные изменения номинального напряжения база-эмиттер БТ непосредственно складываются с сигналом ошибки ООС.

Для компенсации температурной составляющей можно применить УПТ на дифференциальном усилителе (ДУ) как показано на рис. 8б. В таком включении схема является неинвертирующей, а температурные изменения не влияют на разность напряжений на базах БТ, которая является сигналом ошибки.

В мощных каскадах на ПТ при работе с большими токами стока на резисторе R_c может рассеиваться большая мощность, и сопротивление приходится выбирать небольшим. Малое падение напряжения на резисторе (доли вольта) может оказаться недостаточным для нормальной работы транзисторного УПТ по схемам рис. 8а или рис. 8б.

В этом случае можно воспользоваться схемой с операционным усилителем (ОУ) в цепи ООС (рис. 8в). В этой схеме потери сигнала ошибки при передаче его из точки a в точку b схемы компенсируются большим коэффициентом усиления ОУ, а высокое входное сопротивление ОУ позволяет использовать высокоомные резисторы R_1 , R_2 с малым током через них.

Следует заметить, что промышленностью серийно производятся специальные интегральные микросхемы, предназначенные для работы в качестве УПТ стабилизации тока, у которых согласованные пары резисторов, соответствующие R_1 , R_2 , R_3 , R_4 на схеме рис. 8в, располагаются непосредственно на кристалле. Такие микросхемы иногда называют усилителями датчиков тока (*Current sense amplifier*). В ряде случаев применение таких микросхем оказывается более оправданным, нежели включение ОУ широкого применения.

Как упоминалось ранее работа ПТ на переменном токе описывается системой малосигнальных параметров. На низких частотах комплексные частотно-зависимые параметры становятся вещественными, не зависящими от частоты.

Для грубых оценок на низких частотах при использовании параметров проводимости можно полагать, что $g_{11} = 0$, $g_{12} = 0$. g_{22} вычисляется исходя из напряжения Эрли, которое в первом приближении можно принять равным 100...200 В, или находится по наклону выходной ВАХ. g_{21} указывается в справочных данных. На сверхвысоких частотах (СВЧ) используются s -параметры, также называемые параметрами рассеяния. Они измеряются экспериментально или извлекаются из полной нелинейной модели транзистора.

Работа на переменном токе обеспечивается включением блокировочных и разделительных конденсаторов, в результате чего на переменном токе формируется схема с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) или общим затвором

(ОЗ). На рис. 9 в качестве примера приведены схемы каскадов ОИ (рис. 9а) и ОС (рис. 9б) на ПТ с управляющим переходом.

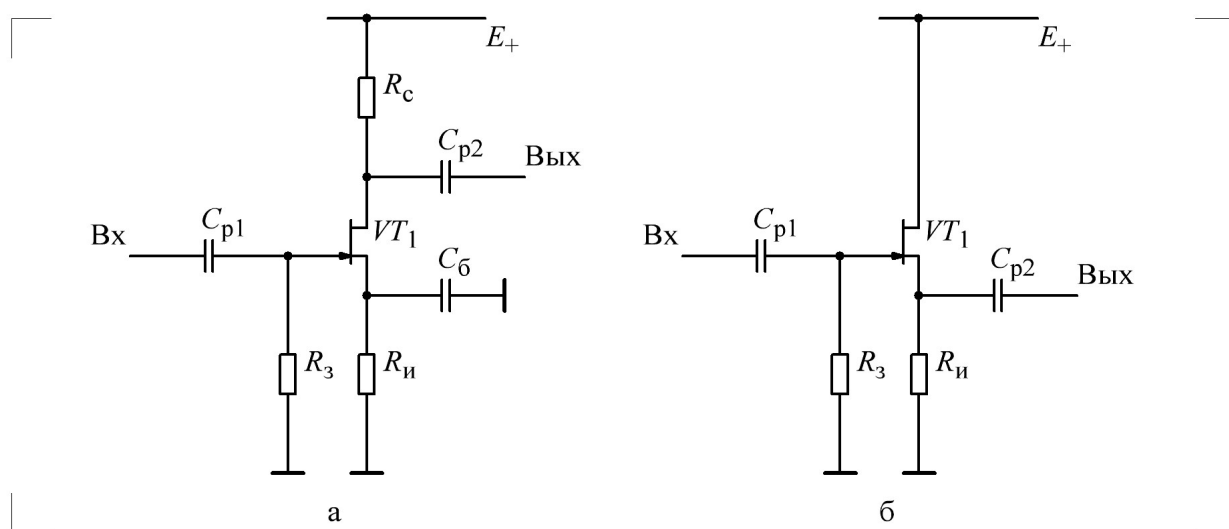


Рис. 9

Следует заметить, что при использовании ПТ с управляющим переходом в цепи затвора обязательно должен быть установлен элемент, обеспечивающий протекание малого тока утечки. В данных схемах для этой цепи служит резистор R_3 . В ПТ с изолированным затвором аналогичный резистор служит для устранения статического заряда, способного вызвать пробой тонкой области диэлектрика между затвором и каналом.

Построение других схем аналоговой электроники на ПТ также имеет ряд особенностей.

На рис. 10а приведена схема генератора стабильного тока на ПТ с левосторонней проходной ВАХ.

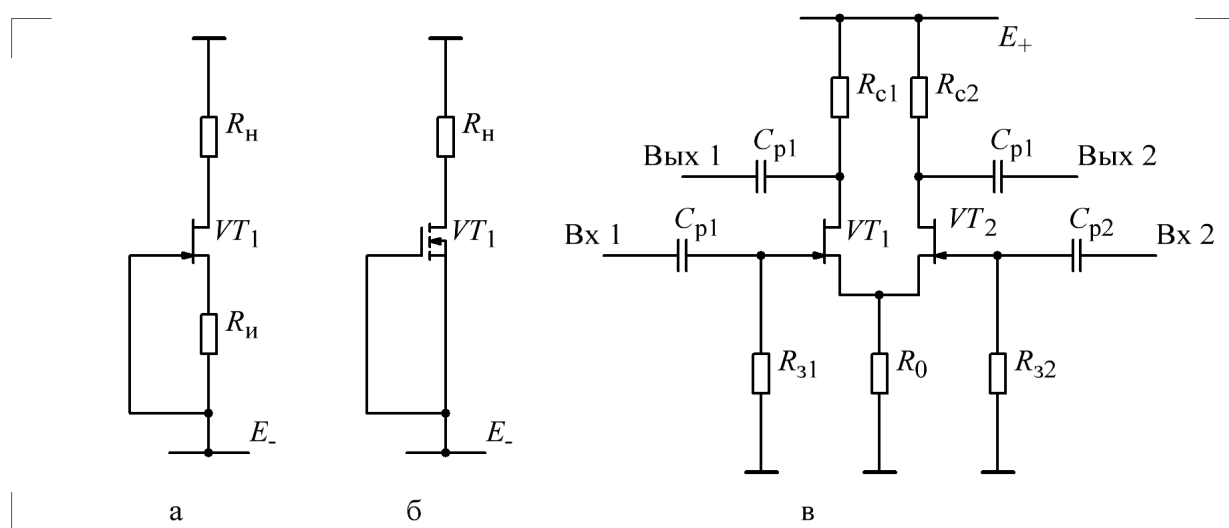


Рис. 10

Поскольку ток стока здесь формируется за счет резистора $R_{и}$, а потенциал затвора ниже потенциала истока, то ГСТ, формирующий требуемый ток в сопротивлении $R_{н}$, фактически является 2-полюсником. Еще более простой вид схема ГСТ приобретает при использовании ПТ с индуцированным каналом. Если пороговое напряжение транзистора таково, что требуемый ток стока образуется при нулевом напряжении затвор-исток, то схема ГСТ становится такой, как показано на рис. 10б.

Схема ДУ на ПТ, показанная на рис. 10в также имеет свои особенности. Если используются транзисторы с левосторонними проходными ВАХ, то резистивные делители в цепях затворов не требуются, достаточно установить одиночные резисторы утечки на землю.

Интересной особенностью начального участка выходных ВАХ ПТ является то, что при малых напряжениях сток-исток ПТ ведет себя как управляемый напряжением затвора линейный резистор (рис. 11а).

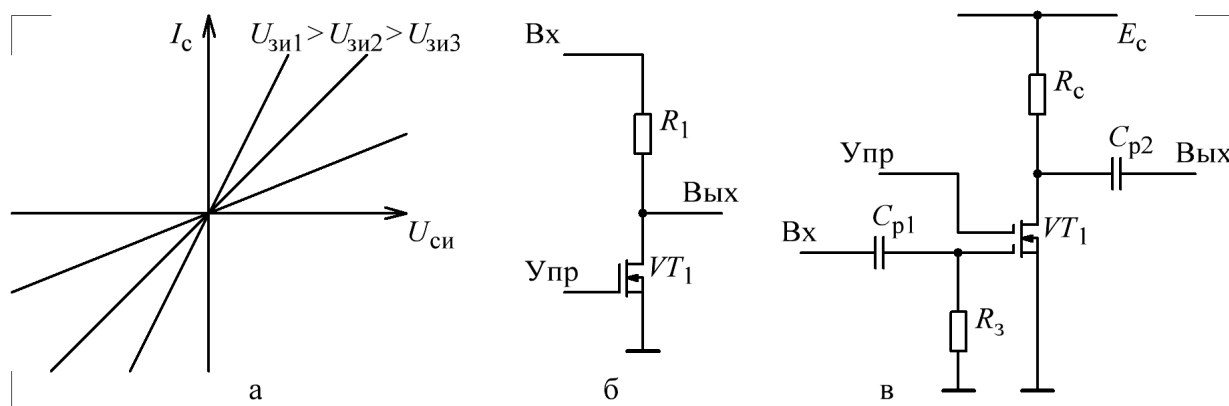


Рис. 11

В простейшем случае включив ПТ в схему резистивного делителя можно получить управляемый аттенуатор (рис. 11б). На этом принципе основаны и более сложные схемы управляемых резисторов, в которых используются специально разработанные для работы в этом качестве типы ПТ.

Отдельной разновидностью ПТ являются приборы с двумя затворами. В этом случае ток стока зависит от напряжений на обоих затворах, т. е. формируется как результат нелинейного взаимодействия этих напряжений. Пример проходной ВАХ двухзатворного транзистора, как функции тока стока от напряжения на первом (нижнем по схеме) затворе при различных напряжениях на втором (верхнем по схеме) затворе, приведен на рис. 12.

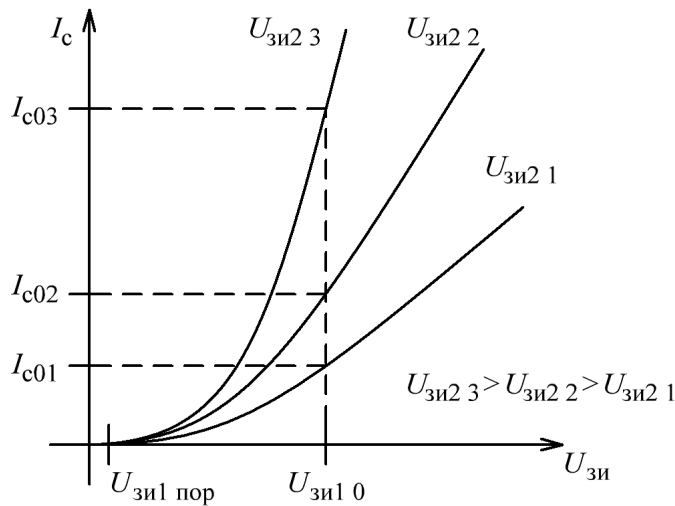


Рис. 12

Как следует из рисунка крутизна проходной характеристики существенно образом зависит от напряжения на втором затворе. Это позволяет организовать схему электронной регулировки усиления (рис. 11в). В этой схеме полезный сигнал подается на первый затвор, а на второй затвор подается управляющее напряжение. Выходной сигнал выделяется на резисторе в цепи стока и через конденсатор поступает на выход. В этой схеме для простоты предполагается, что требуемое положение ИРТ достигается при нулевом напряжении на первом затворе.

На рис. 13 приведено семейство проходных ВАХ 2-затворного высокочастотного транзистора *BF998* компании *NXP*.

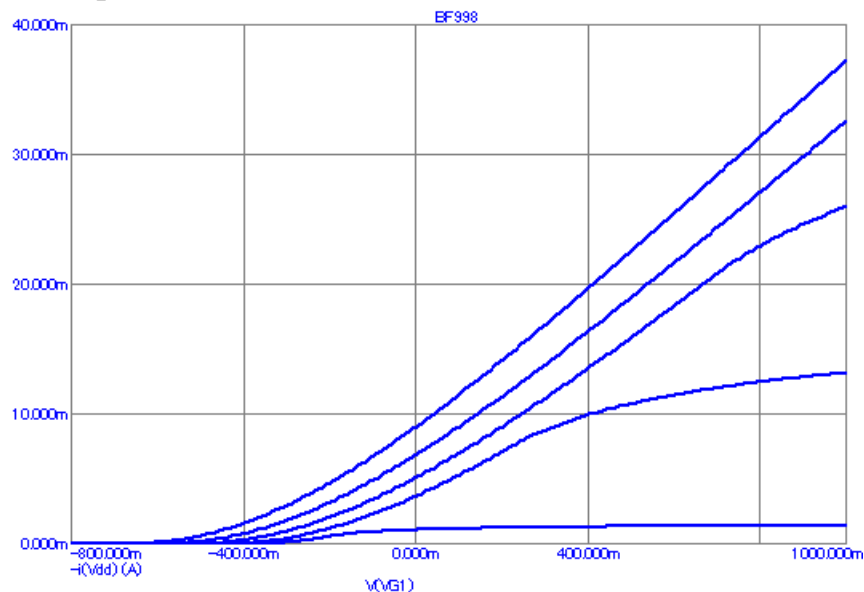


Рис. 13

Как и на рис. 12 параметром здесь является не напряжение сток-исток, а напряжение на втором затворе. На этом рис. кривые соответствуют напряжениям на втором затворе, равным 0, 1, 2, 3 и 4 В. Напряжение сток-исток равно 5 В.

Еще одно распространенное применение двухзатворных транзисторов – перенос спектра сигнала в другую частотную область. В этом случае на первый затвор подается полезный сигнал, а на второй – сигнала местного генератора (гетеродина). В результате нелинейного взаимодействия полезного сигнала с сигналом гетеродина в цепи стока образуются множественные побочные спектральные составляющие, наибольший интерес из которых представляют суммарная и разностная частоты. Интересующая частотная составляющая выделяется линейным частотно-избирательным фильтром.

В радиотехнике этот процесс называется переносом или преобразованием частоты, а устройство, на выходе которого образуются различные частотные составляющие – смесителем частот.