

Анализ работы усилительного каскада с помощью ВАХ

В статическом режиме связь между токами и напряжениями на электродах транзистора описывается системой нелинейных алгебраических уравнений. Графически эта система может быть представлена семействами вольт-амперных характеристик (ВАХ).

Входная ВАХ – это зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером. Для транзистора $n-p-n$ -структуры схема измерения входной ВАХ и типичный вид этой зависимости представлены на рис. 1.

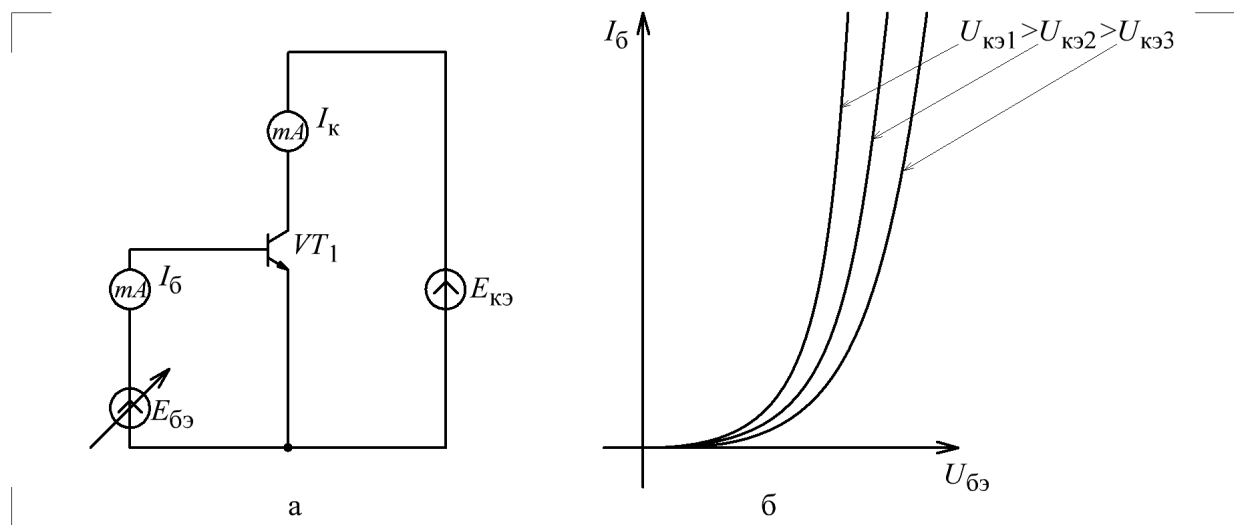


Рис. 1

В силу того, что для транзистора $I_к = \beta I_б$ проходная характеристика транзистора (зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером) имеет вид, аналогичный рис. 1б.

При отрицательных напряжениях база-эмиттер транзистор закрыт и ток базы не протекает.

Выходная ВАХ – это зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при фиксированном токе базы (рис. 2).

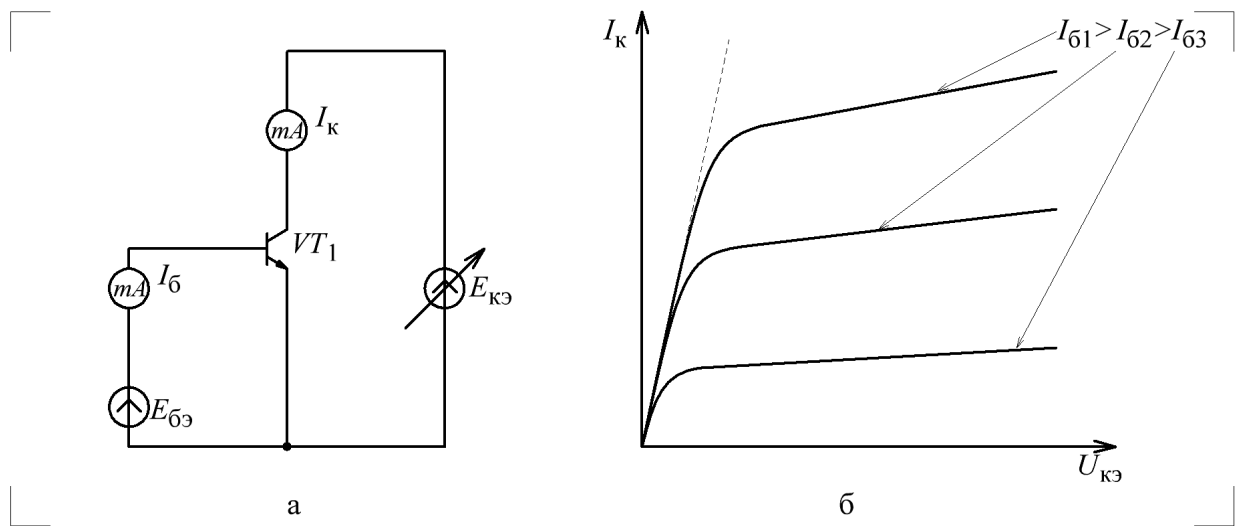


Рис. 2

Возможность использования транзистора для усиления сигналов объясняется тем, что имеет место пропорциональная зависимость между слабым током базы и сильным током коллектора $I_{\text{к}} = \beta I_{\text{б}}$. Поэтому, если источник сигнала включить в базовую цепь, а нагрузку – в цепь коллектора, то можно ожидать усиления сигнала по мощности. Для иллюстрации этого факта рассмотрим схему, изображенную на рис. 3а.

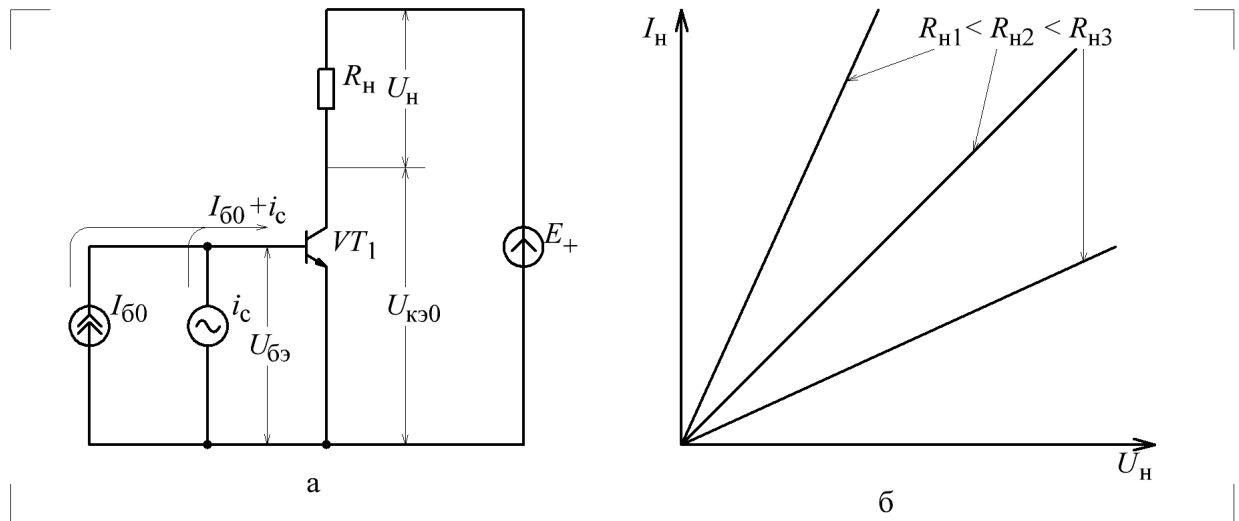


Рис. 3

Для того чтобы обеспечить протекание постоянного тока базы, соответствующего прямой ветви входной ВАХ, приложим к переходу база-эмиттер источник открывающего тока $I_{\text{б0}}$. Параллельно с ним включим источник сигнального тока i_c . Для упрощения геометрических построений предположим, что источники идеальные (не имеют внутренних сопротивлений). В коллекторную цепь, помимо источника питания E_+ , включим резистор нагрузки, имеющий ли-

нейную ВАХ (рис. 3б). Тогда при отсутствии сигнальных воздействий $i_c = 0$ в коллекторной цепи установится ток $I_{к0}$, а напряжение источника питания распределится между двумя потребителями U_H и $U_{кэ0}$. Токи и напряжения при отсутствии сигнальных воздействий будем называть начальными.

В процессе сигнальных воздействий ток коллектора и напряжение между коллектором и эмиттером будет меняться. Точка на плоскости выходных ВАХ, связывающая текущие значения тока и напряжения, называется рабочей точкой (РТ).

Точка $(I_{к0}, U_{кэ0})$ на плоскости выходных ВАХ, соответствующая отсутствию сигнальных воздействий, называется исходной рабочей точкой (ИРТ). Ее положение определяется не только начальным током базы, но и сопротивлением R_H в коллекторной цепи, точнее ее ВАХ (рис. 4).

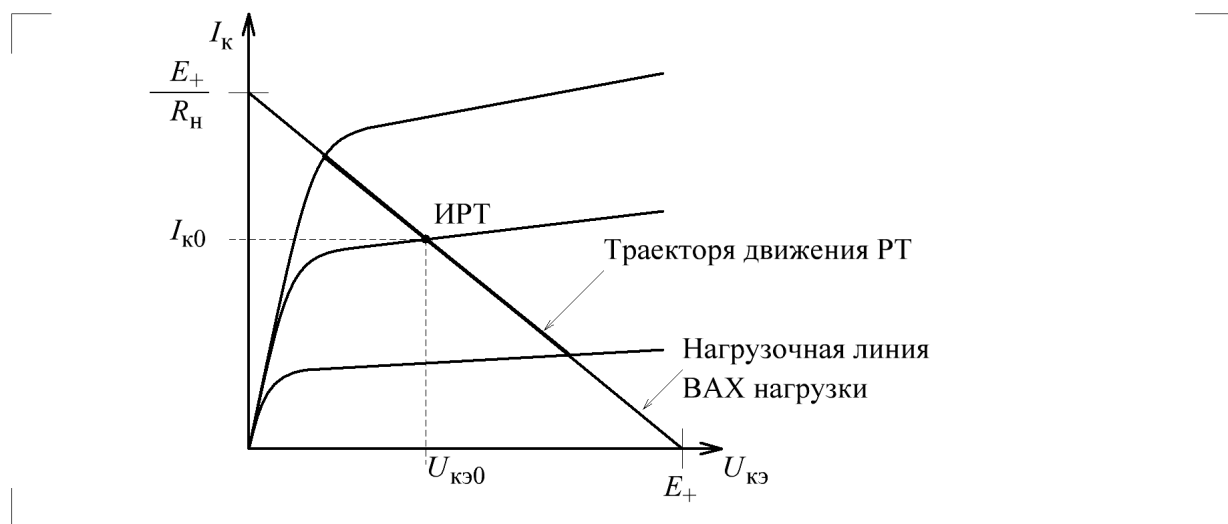


Рис. 4

Поскольку падение напряжения на резисторе R_H вычитается из напряжения источника питания, то на плоскости выходных ВАХ линия, связывающая ток и напряжение резистора нагрузки, должна быть отложена зеркально относительно вертикальной прямой, соответствующей напряжению источника. ВАХ нагрузки, изображенная на плоскости выходных ВАХ, называется нагрузочной линией или нагрузочной характеристикой.

В процессе усиления РТ перемещается по плоскости выходных ВАХ не произвольным образом. Ее траектория зависит от управляющего тока базы и сопротивления резистора в коллекторной цепи. Иначе говоря, РТ перемещается по нагрузочной характеристике в соответствии с управляющим током базы. На рис. 4 траектория перемещения РТ отмечена жирной линией.

Если базовый ток под действием источника сигнала изменяется по гармо-

ническому закону, как это изображено на рис. 5 справа, то РТ перемещается последовательно вверх и вниз по нагрузочной линии, и напряжение между коллектором и эмиттером также изменяется по гармоническому закону. Следует заметить, что увеличению базового тока соответствует уменьшение напряжения коллектор-эмиттер, а уменьшению базового тока – увеличение выходного напряжения.

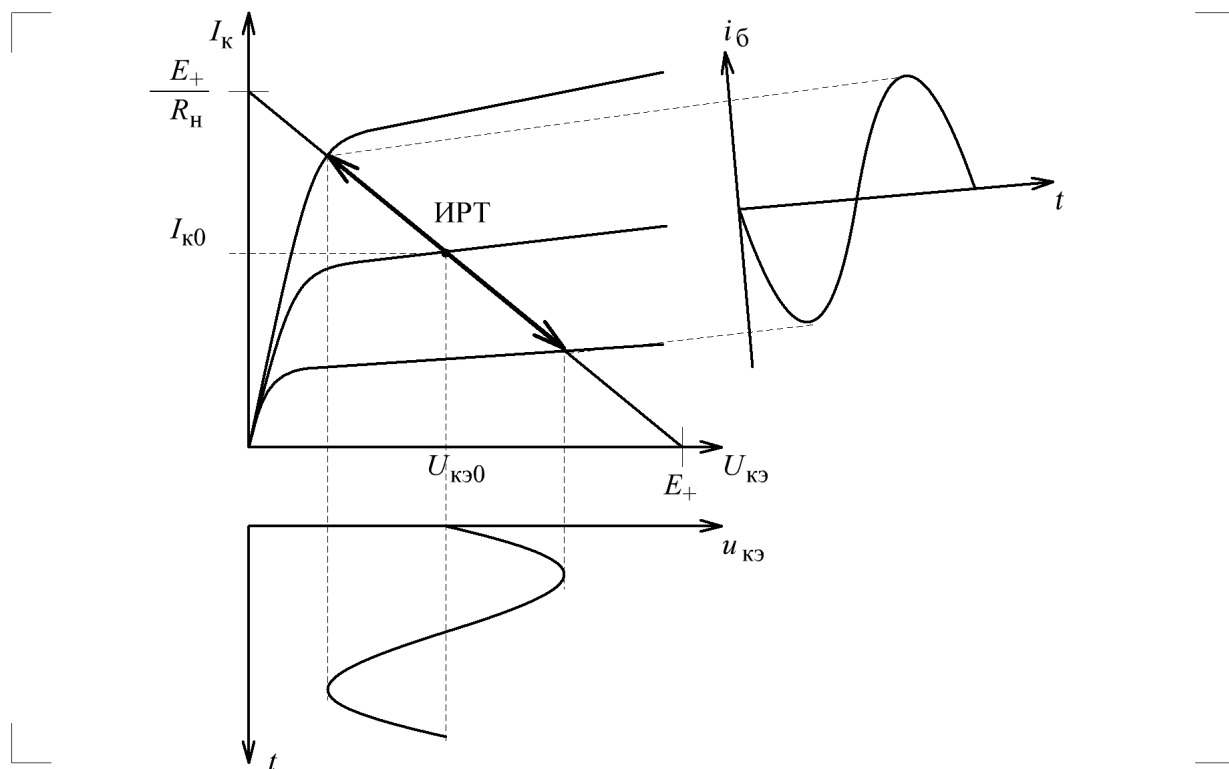


Рис. 5

Таким образом, изменения слабого тока базы приводят к пропорциональным изменениям большого тока коллектора, что и обеспечивает усиление тока сигнала. Источник сигнального тока создает на переходе база-эмиттер входное напряжение, а ток коллектора, протекая через сопротивление нагрузки, создает на нем падение выходного напряжения, что при определенных условиях можно рассматривать как усиление по напряжению.

Если источник сигнала имеет конечное внутреннее сопротивление, то он отдает во входную цепь транзистора конечную мощность. Поскольку ток коллектора много больше тока базы можно рассчитывать, что и мощность, выделяющаяся в нагрузке, окажется много больше мощности, отбираемой входной цепью транзистора от источника сигнала.

Вернемся к схеме рис. 3а и сделаем ряд замечаний.

1. В схемотехнике широко используется понятие "земли", "общей точки" или "точки нулевого потенциала". В соответствии с этим подходом потенциал

какого-либо узла схемы принимается за нулевой, а потенциалы всех остальных узлов отсчитываются от потенциала выбранного узла. Этот узел с нулевым потенциалом называют общей точкой или землей схемы. Выбор общей точки в большой степени произволен. Удобно выбирать его таким образом, чтобы к нему сходилось максимальное число ветвей. Как правило, в качестве точки нулевого потенциала можно выбрать отрицательный вывод источника питания. На схемах земля обозначается жирной чертой (рис. 6а).

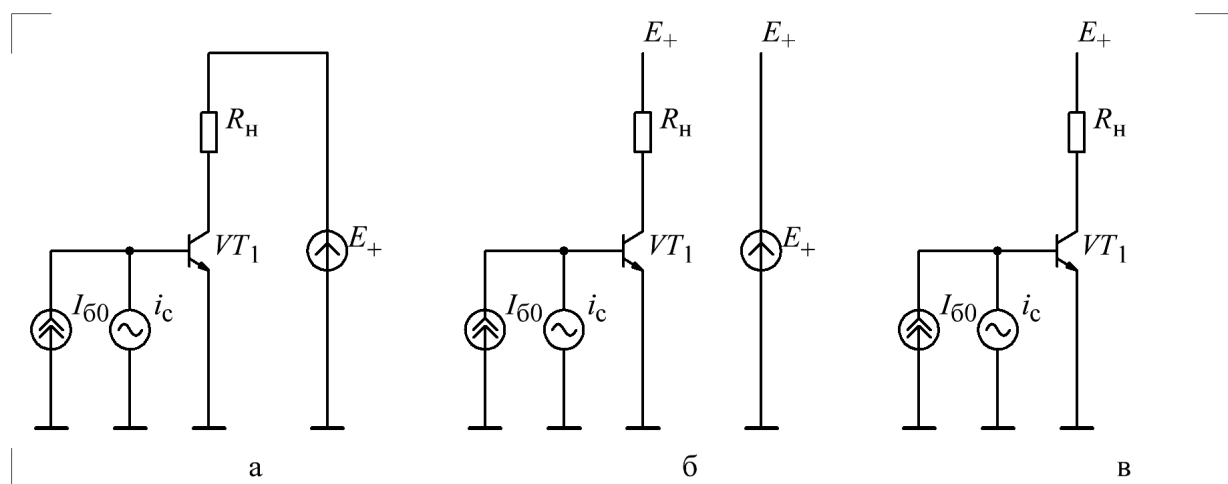


Рис. 6

2. Для уменьшения количества изображаемых проводников и их пересечений на схемах часто используется обозначение электрических связей с помощью буквенно-цифровых обозначений. Тогда считается, что проводники, имеющие одно и то же обозначение электрически связаны. На рис. 6б точки, обозначенные E_+ электрически связаны – источник питания подключен к верхнему выводу резистора нагрузки.

3. Для простоты начертания источники постоянной ЭДС на схемах иногда не изображают, а факт подсоединения узла схемы к источнику напряжения указывают каким-либо наглядным обозначением, например E_+ (рис. 6в).

Принципиальным моментом на всех приведенных модификациях схемы являлось включение сопротивления нагрузки в цепь последовательно с источником питания. Однако нагрузка схемы как потребитель мощности, например вход следующего каскада, может потребовать иного включения, в частности заземления одного из выводов. Тогда возникает 2 задачи. С одной стороны каким-то образом обеспечить подачу постоянного напряжения питания на коллектор, изолировав источник питания с нулевым внутренним сопротивлением от сигнальной цепи. С другой стороны необходимо передать сигнал с коллектора в нагрузку, исключив постоянное напряжение питания.

Если сигнал не содержит постоянной составляющей, то вторая задача ре-

шается с помощью специально организованной цепи связи, в простейшем случае с помощью конденсатора (рис. 7а). При правильном выборе емкости конденсатор обеспечивает изоляцию нагрузки от цепи коллектора по постоянному току, передавая в нагрузку переменный сигнал.

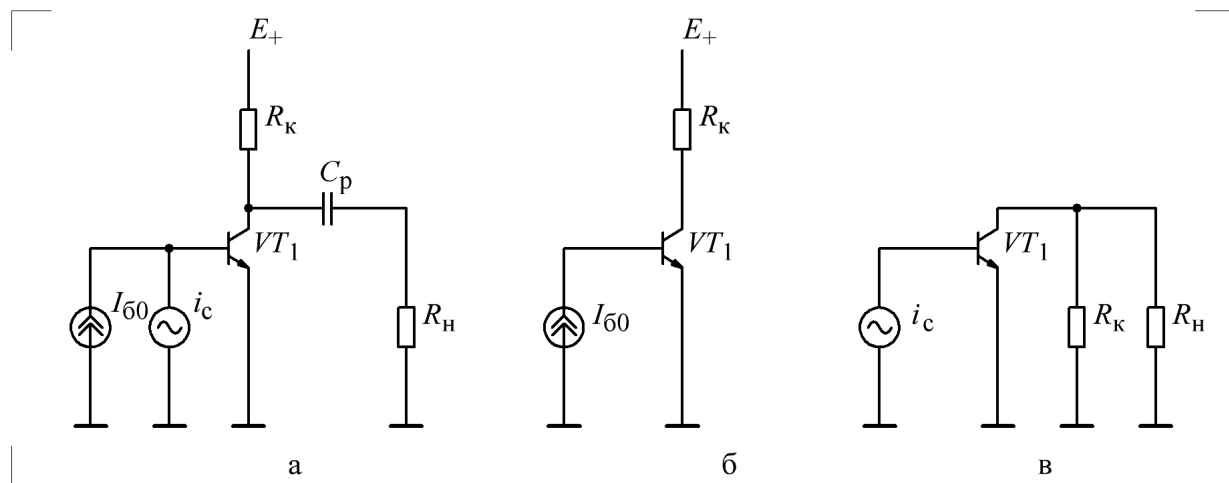


Рис. 7

Для подачи питания на коллектор транзистора на рис. 7а использован специальный резистор R_K . Важным следствием такого решения является тот факт, что положение ИРТ на плоскости выходных ВАХ определяется сопротивлением, связывающим коллектор транзистора с источником питания, а движение РТ в процессе сигнальных воздействий определяется не только R_K , но и R_H .

Для анализа подобных явлений в схемотехнике используется понятие эквивалентных схем для постоянного и переменного токов.

Для постоянных воздействий все конденсаторы и источники сигнального тока в схеме представляют собой разрывы в цепи, все индуктивности и источники сигнальной ЭДС – короткие замыкания. Для схемы рис. 7а эквивалентная схема на постоянном токе приведена на рис. 7б.

Для переменных сигнальных воздействий все конденсаторы достаточно большой емкости и источники постоянного напряжения в схеме представляют собой короткие замыкания цепей, все катушки с достаточно большой индуктивностью и источники постоянного тока – разрывы. Для схемы рис. 7а эквивалентная схема на переменном токе приведена на рис. 7в. При этом предполагается, но не изображается на схеме наличие всех необходимых постоянных потенциалов на электродах транзистора и токов через них.

Из последней схемы наглядно видно, что для переменного тока нагрузкой транзистора является параллельное соединение резисторов R_K и R_H . Нагрузочные характеристики для этих режимов приведены на рис. 8а.

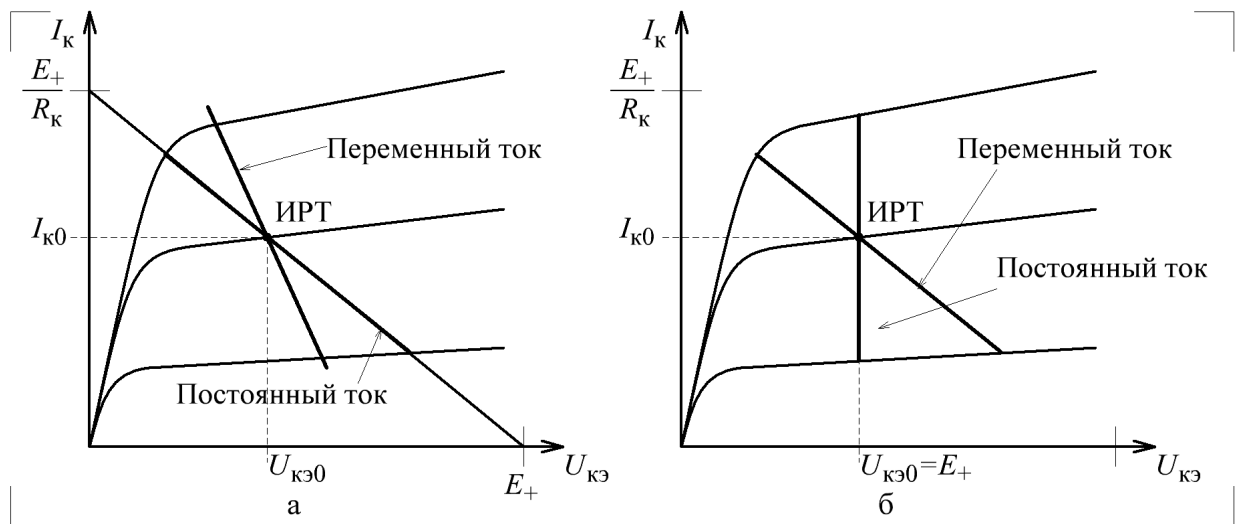


Рис. 8

Важный вывод – нагрузочные линии для постоянного и переменного токов могут отличаться.

Как видно из схемы мощность сигнала в данной схеме выделяется не только на сопротивлении нагрузки. Часть ее бесполезно тратится на сопротивлении R_k . Для снижения этих потерь в ряде случаев в цепь коллектора вместо резистора устанавливают индуктивный элемент – дроссель (рис. 9а).

Эквивалентные схемы для постоянного и переменного токов приведены на рис. 9б и 9в соответственно, а нагрузочная линия для постоянного и переменного токов приведена на рис. 8б.

В данном случае для переменного тока нагрузочная характеристика вертикальна, и начальное напряжение коллектор-эмиттер равно напряжению питания, а для постоянного тока наклон нагрузочной характеристики определяет резистор нагрузки.

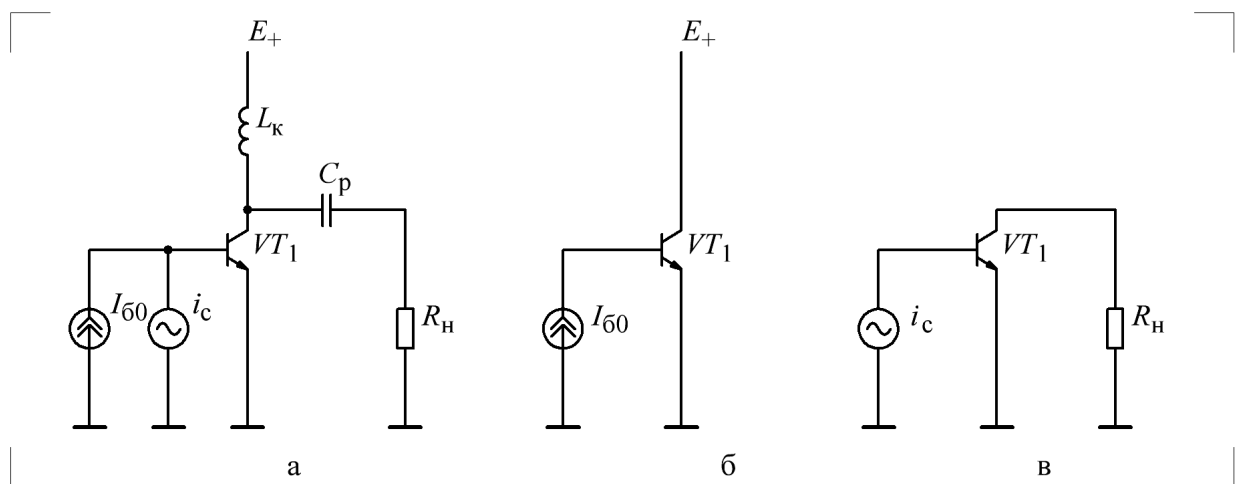


Рис. 9

Другой пример выходной цепи связи представлен на рис. 10а.

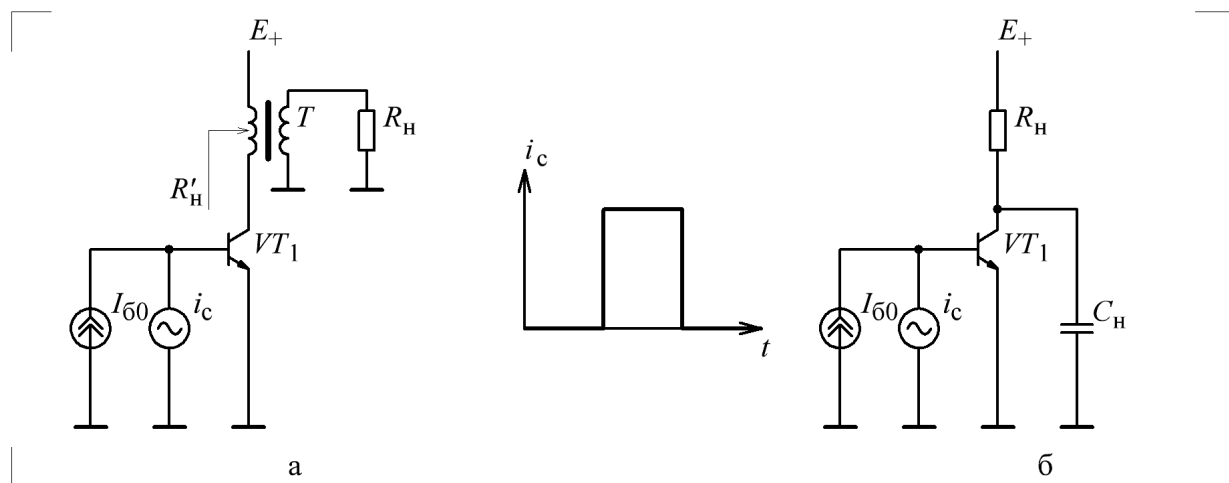


Рис. 10

Здесь развязка по переменному и постоянному токам, а также преобразование сопротивлений осуществляется трансформатором. Поведение нагрузочной линии аналогично приведенному на рис. 8б за тем исключением, что наклон линии для переменного тока определяется сопротивлением R'_H в первичной цепи трансформатора.

В случае более сложных цепей нагрузки, содержащих реактивные элементы, нагрузочная характеристика может существенно отличаться от прямой линии. Для примера подобного поведения рассмотрим случай, когда нагрузка, включенная в коллекторную цепь, зашунтирована емкостью (рис. 10б), а на вход воздействует прямоугольный импульс тока.

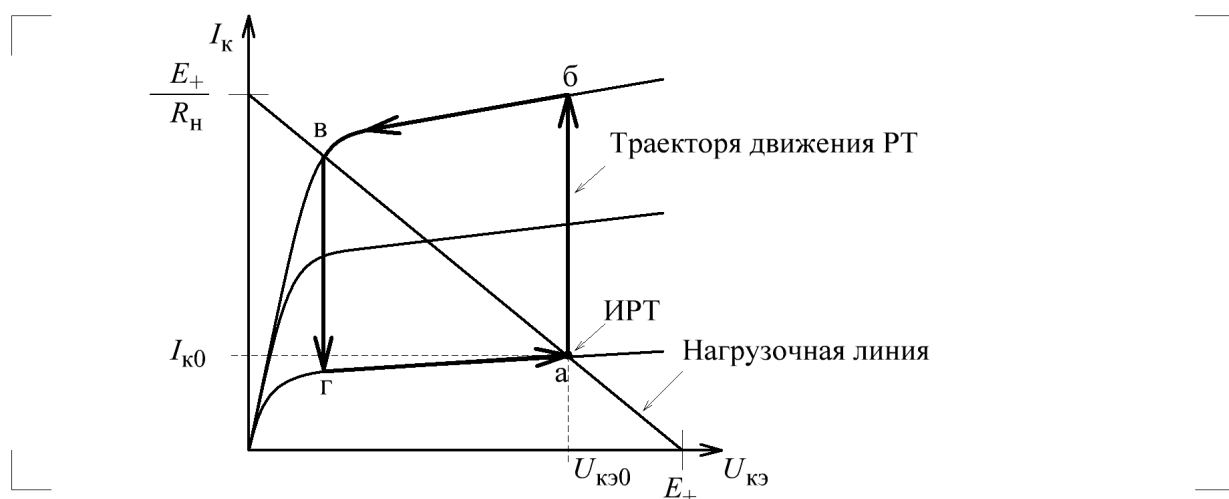


Рис. 11

В этом случае при воздействии импульса тока в базовой цепи ток коллектора возрастает. Однако емкость нагрузки препятствует мгновенному изменению напряжения на нагрузке, и РТ перемещается из точки "а" в точку "б" (рис. 11). На временном интервале, соответствующем неизменному току базы, напряже-

ние на нагрузке возрастает (РТ перемещается из точки "б" в точку "в"). При обратном скачке тока базы ток коллектора уменьшается, а напряжение остается неизменным (РТ перемещается из точки "в" в точку "г"). После окончания действия импульса напряжение на коллекторе возвращается к значению, соответствующему ИРТ.

При более сложных цепях нагрузки и формах входного воздействия РТ может двигаться по весьма замысловатой траектории, приводя иногда к опасным для транзистора режимам работы.