

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

С.А. Охремчик,
В.П. Дудкин,
А.В. Захаров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРОННОМ КЛЮЧЕ
НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ**

Учебно-методическое пособие для вузов

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2012

А

I. Теоретическая часть

1. Общие положения и определения

Важнейшими элементами импульсных и цифровых радиоэлектронных устройств являются ключевые схемы, или электронные ключи.

Электронный ключ – это радиоэлектронное устройство, обеспечивающее замыкание и размыкание цепи нагрузки с помощью импульсных электрических сигналов, управляющих работой активного элемента (АЭ).

Электронный ключ называется **транзисторным** ключом (ТК), если в качестве АЭ используются биполярные или полевые транзисторы.

Далее рассматриваются ключи **на биполярном транзисторе** (БТ). В зависимости от схемы включения БТ, различают ТК с общей базой (ОБ), с общим коллектором (ОК) или с общим эмиттером (ОЭ). В импульсной технике в большинстве случаев используют включение транзистора по схеме с ОЭ. Далее исследуются ключевые схемы с ОЭ на кремниевом транзисторе $p-n-p$ -типа, т.к. они получили наибольшее распространение.

Схема простейшего электронного ключа на БТ типа $n-p-n$ с общим заземлённым эмиттером приведена на рис. 1. В управляемую коллекторную цепь БТ включена активная нагрузка (резистор) R_K , через которую на коллектор БТ (относительно общего провода) подаётся постоянное положительное напряжение E_K от источника питания. Если в схеме применяется БТ $p-n-p$ -типа, то на коллектор подаётся отрицательное напряжение. Управляющие импульсы, приводящие к замыканию или размыканию ключа, подаются на базу БТ от генератора управляющего напряжения $E_B(t)$ через сопротивление R_B . Генератор напряжения $E_B(t)$ представлен на рис. 1 в виде эквивалентной схемы, содержащей последовательно соединённые источник ЭДС $e_B(t)$ и сопротивление R_i , характеризующее выходное сопротивление генератора. В частном случае сопротивление R_B может отсутствовать, тогда его роль выполняет сопротивление R_i .

Особенностью ключевой схемы с ОЭ (рис. 1) является **инвертирование** сигнала. Если управляющее напряжение $E_B(t)$ имеет отрицательную полярность относительно общего провода (Общ.), то эмиттерный переход транзистора $p-n-p$ -типа смещён в обратном направлении. Тогда БТ закрыт, выходной ток коллектора I_K в цепи нагрузки R_K очень мал, а выходное напряжение ключа $U_{KЭ}$ на коллекторе БТ (см. рис. 1) велико и приблизительно равно напряжению E_K

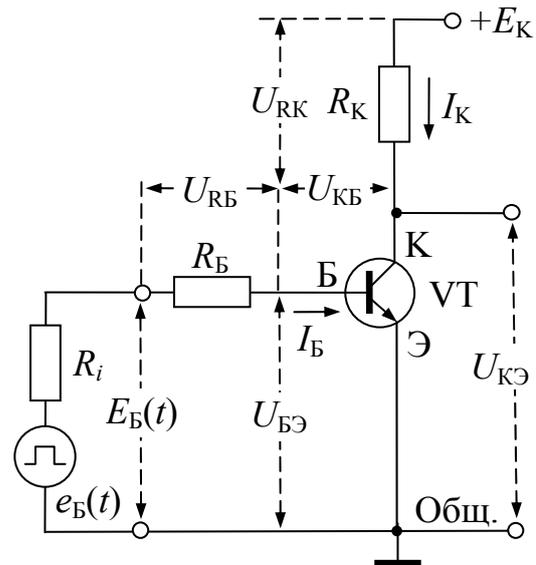


Рис. 1. Схема классического ключа на БТ $n-p-n$ типа с ОЭ

ческим параметрам механические ключи значительно уступают электронным. Поэтому электронные ключи широко используются в импульсных и цифровых устройствах.

При переходе ТК из одного устойчивого состояния в другое меняют своё положение рабочие точки транзистора.

3. Рабочие точки и статические режимы ключа

В каждом из устойчивых состояний на переходах транзистора устанавливаются определённые напряжения, а через электроды транзистора протекают определённые токи. Значения этих токов и напряжений могут быть найдены как координаты т.н. *рабочих точек*, расположенных на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) транзистора. Рабочая точка является точкой пересечения соответствующей ВАХ транзистора и линии нагрузки (нагрузочной прямой).

3.1. Построение рабочих точек. Рассмотрим линию нагрузки *для коллекторной (управляемой) цепи* ТК в схеме рис. 1. Эта цепь содержит последовательно соединённые сопротивление нагрузки R_K и выходную часть БТ между коллектором К и эмиттером Э. Цепь подключена к источнику с напряжением E_K и через неё протекает ток I_K . Из рис. 1 следует, что

$$I_K R_K + U_{KЭ} = E_K, \quad (1)$$

где $U_{RK} = I_K R_K$ – падение напряжения на сопротивлении R_K , I_K – сила тока через сопротивление R_K , $U_{KЭ}$ – падение напряжения между коллектором и эмиттером транзистора, E_K – напряжение источника питания. Выражение (1) представляет собой уравнение прямой в координатах $(I_K, U_{KЭ})$. Эту прямую называют *линией нагрузки* (ЛН) по постоянному току для управляемой коллекторной цепи ТК.

Линия нагрузки (1) может быть построена *по двум* точкам, которые находят из рассмотрения двух крайних случаев – при $I_K = 0$ (при бесконечно большом сопротивлении между коллектором и эмиттером) и при $U_{KЭ} = 0$ (при бесконечно малом сопротивлении между коллектором и эмиттером). Из (1) при $I_K = 0$ получаем $U_{KЭ} = E_K$, что соответствует точке А на рис. 3б с координатами $(I_K, U_{KЭ}) = (0, E_K)$. Аналогично при $U_{KЭ} = 0$ имеем $I_K = E_K/R_K$, что соответствует точке D на рис. 3б с координатами $(I_K, U_{KЭ}) = (E_K/R_K, 0)$. Прямая, проходящая через точки А и D на рис. 3б, является линией нагрузки (ЛН) для управляемой коллекторной цепи ТК.

Значения тока I_K и напряжения $U_{KЭ}$ при заданных значениях E_K и R_K являются координатами точки пересечения ЛН (1) и выходной ВАХ транзистора, задающей зависимости $I_K = f(U_{KЭ})$ при $I_B = \text{const}$ (рис. 3б). Эта точка называется *рабочей точкой управляемой коллекторной цепи* ТК.

Линию нагрузки можно построить и *для базовой (управляющей) цепи* ТК, которая содержит последовательно соединённые сопротивление R_B и

входную часть БТ между базой Б и эмиттером Э. Цепь подключена к источнику напряжения E_B , так что через цепь протекает ток I_B . Из рис. 1 имеем

$$I_B R_B + U_{BЭ} = E_B, \tag{2}$$

где $U_{RB} = I_B R_B$ – падение напряжения на сопротивлении R_B , I_B – управляющий ток в цепи базы, $U_{BЭ}$ – падение напряжения на переходе база–эмиттер, а E_B – управляющее напряжение, подаваемое на вход ключа. Выражение (2) представляет собой уравнение прямой в координатах $(I_B, U_{BЭ})$. Эту прямую называют *линией нагрузки* (ЛН) по постоянному току для управляющей (базовой) цепи ТК.

Линию нагрузки (2) можно построить по двум точкам в системе координат $(I_B, U_{BЭ})$, которые находят при $I_B = 0$ или $U_{BЭ} = 0$ (рис. 3а). Значения тока I_B и напряжения $U_{BЭ}$ при заданных значениях E_B и R_B являются координатами точки пересечения ЛН (2) и входных ВАХ транзистора, задающих зависимости $I_B = f(U_{BЭ})$ при $I_K = \text{const}$ (рис. 3а). Эти точки являются *рабочими точками* для управляющей базовой цепи ТК.

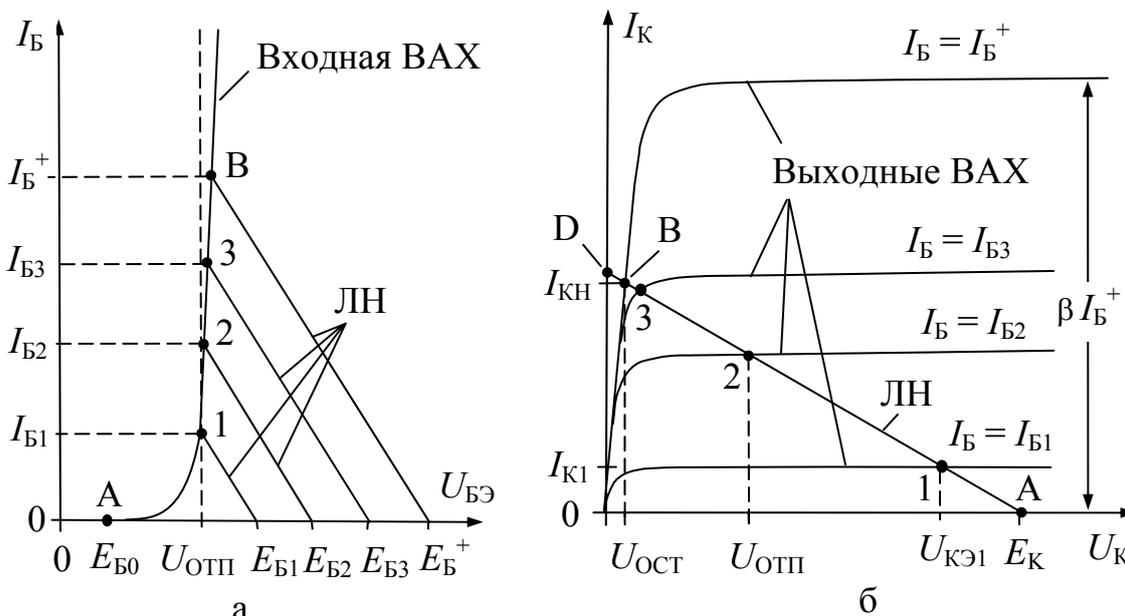


Рис. 3. Положение рабочих точек ключевой схемы на статических ВАХ БТ

3.2. Статические режимы ТК. Транзистор можно считать практически закрытым при условии $U_{BЭ} < U_{OТП}$, где $U_{OТП}$ – напряжение отпирания эмиттерного перехода (рис. 3а). Чтобы кремниевый БТ работал в микрорежиме (при токе 1...10 мкА через $p-n$ -переход), прямое напряжение $U_{BЭ}$ на переходе база–эмиттер должно составлять ≈ 0.5 В. Для получения нормального токового режима (с током 0.1...1 мА через $p-n$ -переход), прямое напряжение $U_{BЭ}$ должно быть ≈ 0.7 В. Поэтому кремниевый БТ $n-p-n$ -типа практически закрыт при $U_{BЭ} \leq 0.5...0.6$ В, а напряжение отпирания $U_{OТП}$ можно полагать равным 0.7 В.

Режим отсечки. Пусть управляющее напряжение равно $E_B = E_{B0} < U_{\text{отп}}$. Тогда эмиттерный переход транзистора закрыт, ток в цепи базы $I_B = I_{B0} = 0$, а напряжение на эмиттерном переходе, согласно (2), равно $U_{BЭ} = E_{B0}$. Строго говоря, во входной цепи закрытого БТ всё же протекает ток $I_{B0} = -I_{K0}$, где I_{K0} – обратный неуправляемый ток коллектора. Однако в кремниевом БТ этот ток мал и не превышает долей микроампера, поэтому им можно пренебречь и полагать, что $I_{K0} = 0$ и $I_{B0} = 0$.

Из выражения (1) следует, что при $I_K = I_{K0} = 0$ напряжение $U_{KЭ}$ на выходе ТК равно $U_{KЭ} = E_K$. Такой режим БТ называют **режимом отсечки**. Режиму отсечки соответствуют рабочие точки А на рис. 3а и рис. 3б.

Нормальный активный режим. Пусть теперь управляющее напряжение E_B увеличилось до значения $E_B = E_{B1} > E_{B0}$, при котором напряжение на эмиттерном переходе $U_{BЭ} \approx U_{\text{отп}}$. Это означает, что эмиттерный переход транзистора открывается, а в цепи базы протекает некоторый небольшой управляющий ток I_B . Значение $I_B = I_{B1}$ этого тока можно определить из рис. 3а по координате I_B точки 1 пересечения соответствующей линии нагрузки (ЛН) со входной ВАХ при $U_{BЭ} \approx U_{\text{отп}}$. При этом в выходной цепи протекает коллекторный ток $I_K = I_{K1}$, пропорциональный управляющему току I_{B1} и равный $I_{K1} = \beta I_{B1}$, где β – статический коэффициент передачи тока базы. Вследствие этого напряжение на коллекторе $U_{KЭ}$ уменьшится и будет равно $U_{KЭ} = U_{KЭ1} < E_K$ (точка 1 на рис. 3б).

Отметим, что ток базы I_B здесь управляет коллекторным током I_K . Это значит, что схема ключа из режима отсечки перешла в **нормальный активный режим**. Этому режиму соответствуют рабочие точки 1 на рис. 3.

При дальнейшем увеличении напряжения E_B базовый ток I_B экспоненциально возрастает с увеличением напряжения $U_{BЭ}$ (см. рис. 3а). При этом значительное увеличение тока I_B сопровождается почти неизменным напряжением $U_{BЭ} \approx U_{\text{отп}}$ на эмиттерном переходе БТ (см. рис. 3а). При этом с ростом I_B коллекторный ток I_K продолжает расти, что приводит к увеличению падения напряжения $U_{RK} = I_K R_K$ на сопротивлении R_K . Это приводит, согласно (1), к уменьшению напряжения $U_{KЭ} = E_K - U_{RK}$ на коллекторе БТ.

Режим насыщения. Пусть при некотором управляющем напряжении $E_B = E_{B2} > E_{B1}$ и соответствующем базовом токе $I_B = I_{B2} > I_{B1}$ напряжение $U_{KЭ}$ на коллекторе снижается до напряжения $U_{\text{отп}}$ открывания p - n -перехода. При этом напряжение U_{KB} на между коллектором и базой БТ будет равно $U_{KB} = U_{KЭ} - U_{BЭ} \approx U_{\text{отп}} - U_{\text{отп}} = 0$, т.е. обращается в 0. Этому соответствуют рабочие точки 2 на рис. 3.

При ещё больших значениях E_B (например, при $E_B = E_{B3} > E_{B2}$) и, соответственно, при больших значениях токов I_B и I_K , напряжение $U_{KЭ}$ продолжает уменьшаться и становится меньше $U_{\text{отп}}$. Тогда напряжение U_{KB} принимает отрицательное значение, т.е. напряжение на переходе база-коллектор становится прямым. В результате коллектор начинает инжекти-