

# Силовые полупроводниковые приборы

- Силовые п/п приборы – управляемые приборы, используемые в различных силовых устройствах: электроприводе, источниках питания, мощных преобразовательных установках. Для снижения потерь эти приборы в основном работают в ключевом режиме.

Основные требования:

- Малые потери при коммутации;
- Большая скорость переключения из одного состояния в другое;
- Малое потребление по цепи управления;
- Большой коммутируемый ток и высокое рабочее напряжение.

Разработаны приборы на токи до 1000 А и рабочее напряжение свыше 6 кВ, работают на частотах до 1 МГц. Значительно снижена мощность управления силовыми ключами.

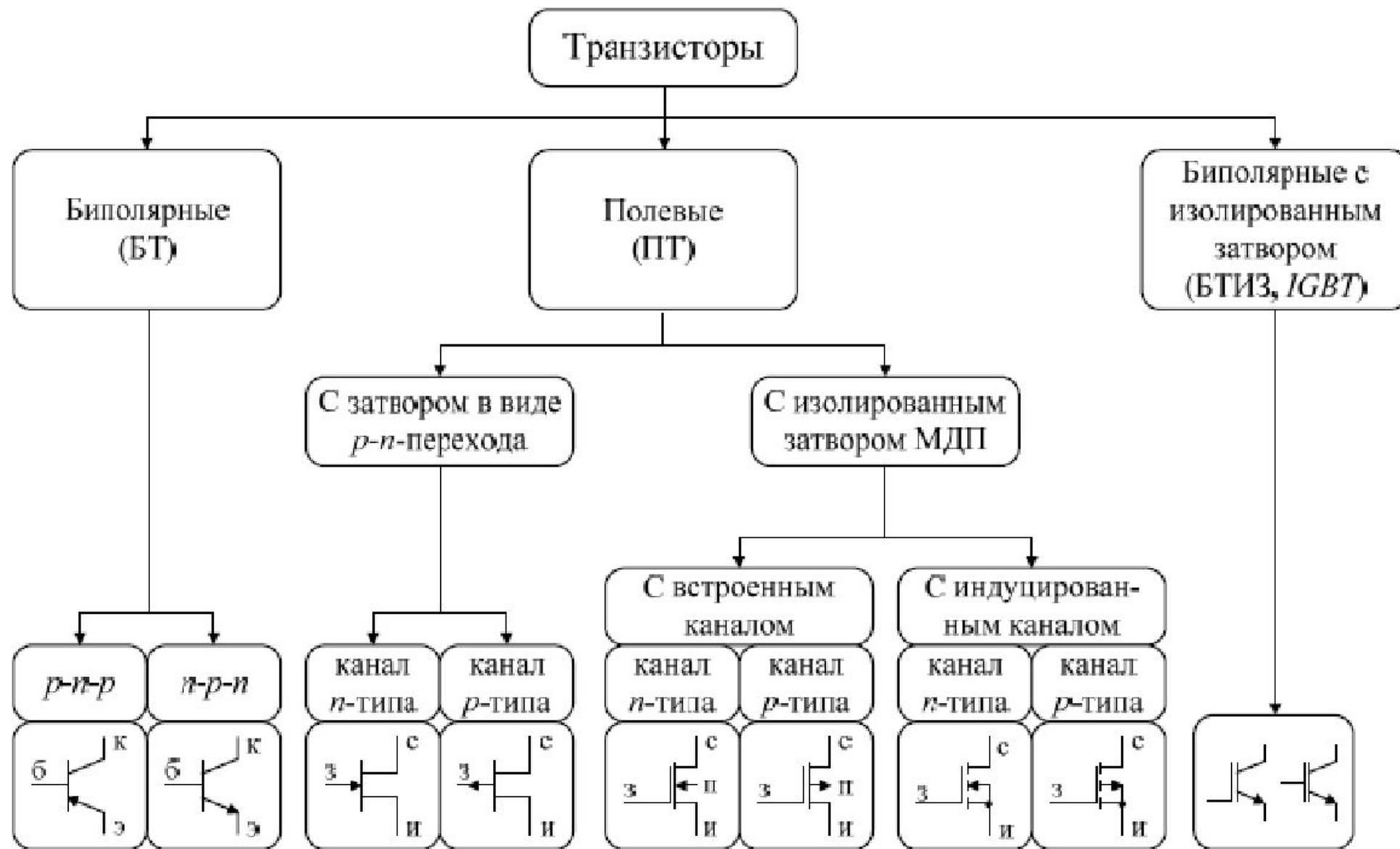


Рис. 2.16. Классификация основных типов транзисторов  
 (к – коллектор; э – эмиттер; б – база; с – сток; и – исток; з – затвор; п – подложка)

# *IGBT*–транзисторы

Транзисторы по принципу действия делятся на **биполярные** (управляемые током), **униполярные** (управляемые электрическим полем или **полевые**) и ***IGBT*–транзисторы**. Аббревиатура *IGBT* – это сокращение названия *Insulated gate bipolar transistor*. В переводе это значит **биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ)**.

В биполярных транзисторах ток определяется движением носителей зарядов обоих знаков: электронов и дырок, поэтому они называются биполярными.

В полевых транзисторах ток определяется шириной проводящего канала, по которому движутся носители зарядов одного знака, отсюда их другое название – униполярные.

*IGBT*–транзисторы являются гибридными, в них сочетаются положительные свойства биполярных и полевых транзисторов.

- **Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)** или, как они сокращенно называются по-английски *IGBT*, представляют собой гибрид биполярного транзистора и ПТИЗ, сочетающий их лучшие свойства. БТИЗ – это сложная многослойная структура и процессы в ней весьма сложны. Поэтому на рис. 2.17 приведена очень упрощенная схема замещения. При подаче на затвор  $\mathcal{Z}$  напряжения, положительного относительно точки  $\mathcal{Э}$ , ПТИЗ открывается и начинает проходить ток от точки  $\mathcal{К}$  через эмиттерно-базовый переход биполярного транзистора и открытый ПТИЗ к точке  $\mathcal{Э}$ . При этом открывается биполярный транзистор, через который проходит ток от точки  $\mathcal{К}$  к точке  $\mathcal{Э}$ . Буквами  $\mathcal{Э}$ ,  $\mathcal{К}$ ,  $\mathcal{З}$  обозначены эмиттер, коллектор и затвор БТИЗ. БТИЗ могут работать только в ключевом режиме.

- **БТИЗ в настоящее время получили наибольшее распространение в устройствах силовой электроники** при мощностях от сотен Вт до тысячи кВт.

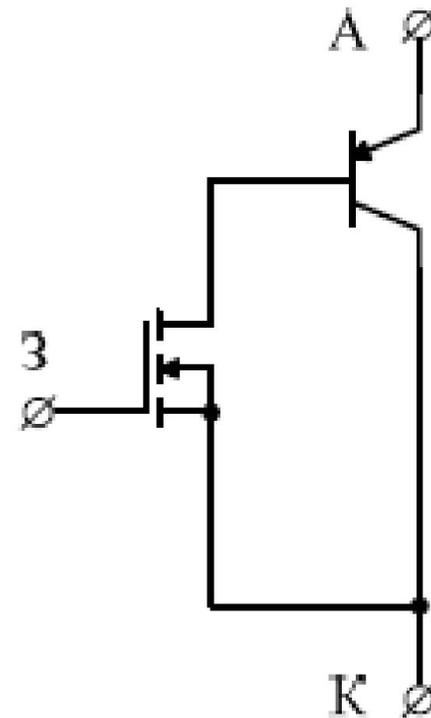
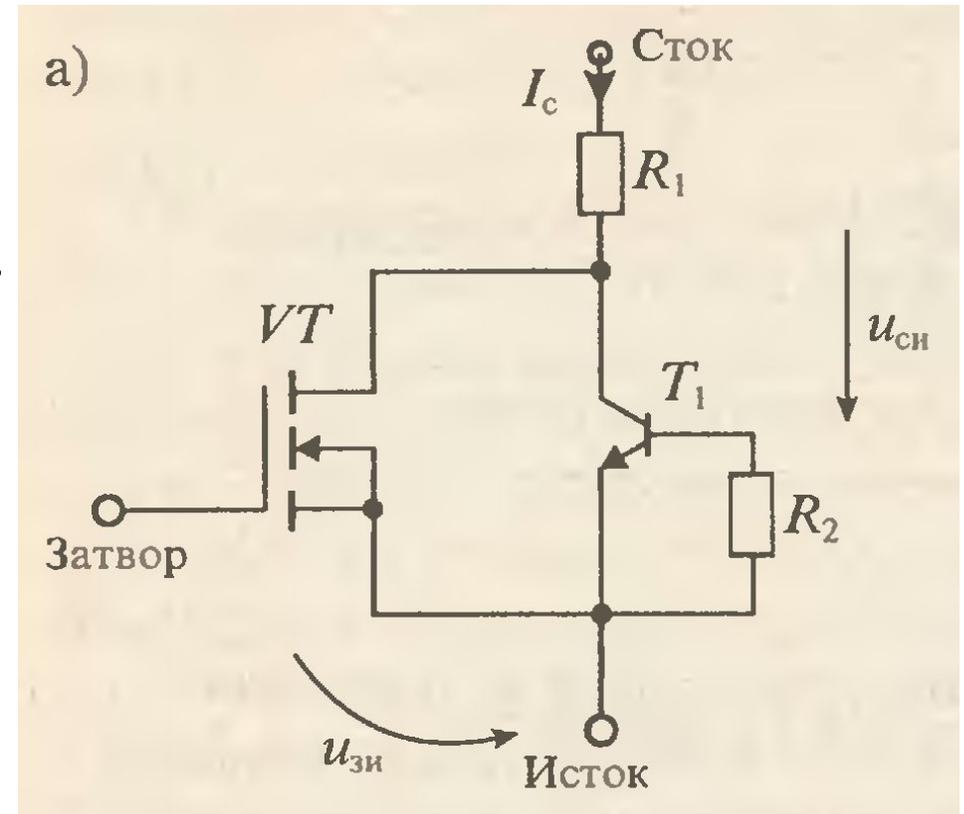


Рис. 2.17. Упрощенная схема замещения БТИЗ

При изготовлении ПТИЗ, имеющих вертикальный канал, образуется паразитный БТ, который не находил практического применения. На рис  $V_T$  - ПТИЗ,  $T_1$  – паразитный БТ,  $R_1$  – последовательное сопротивление канала ПТ,  $R_2$  – сопротивление, шунтирующее переход база-эмиттер БТ  $T_1$ . благодаря сопротивлению  $R_2$  БТ заперт и не оказывает влияния на  $V_T$ .



- Структура IGBT аналогична структуре ПТИЗ, но дополнена еще одним p-n-переходом, благодаря которому в схеме замещения появляется еще один p-n-p-транзистор T2.
- Образовавшаяся структура из двух транзисторов T1 и T2 имеет глубоко внутреннюю положительную обратную связь, так как ток коллектора транзистора T2 влияет на ток базы транзистора T1, а ток коллектора транзистора T1 определяет ток базы транзистора T2.

$$I_{k2} = I_{32} \alpha_2, I_{k1} = I_{31} \alpha_2 \text{ и } I_3 = I_{k1} + I_{k2} + I_c.$$

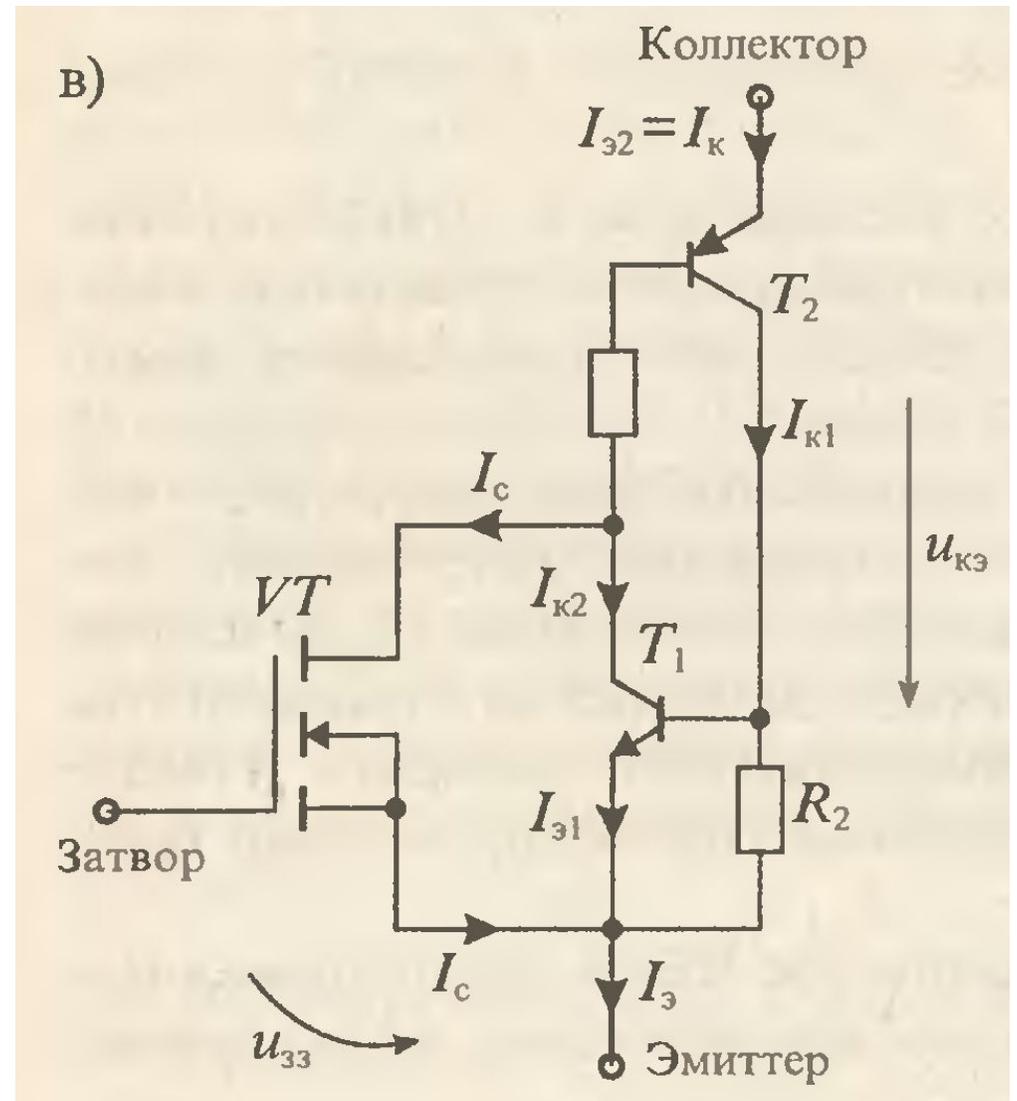
- Ток стока  $I_c = I_3(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$  или  $I_c = S U_3$

- Ток IGBT транзистора  $I_k = I_3 = \frac{S U_3}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = S_3 U_3,$

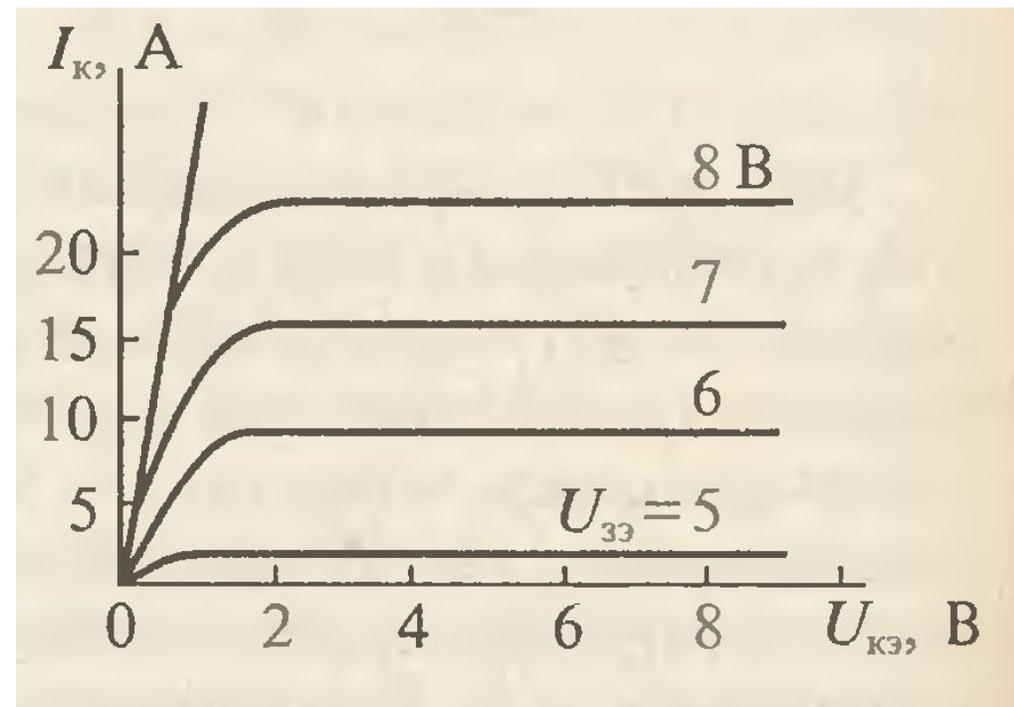
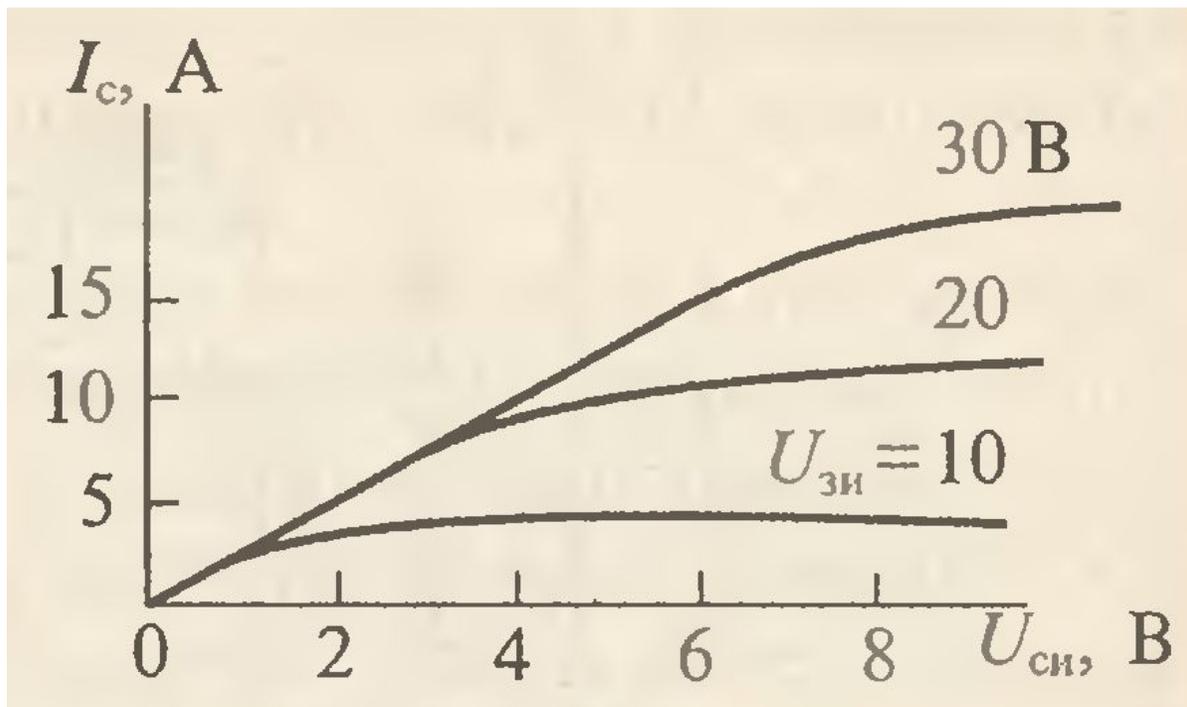
- Эквивалентная крутизна

$$S_3 = S / [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]$$

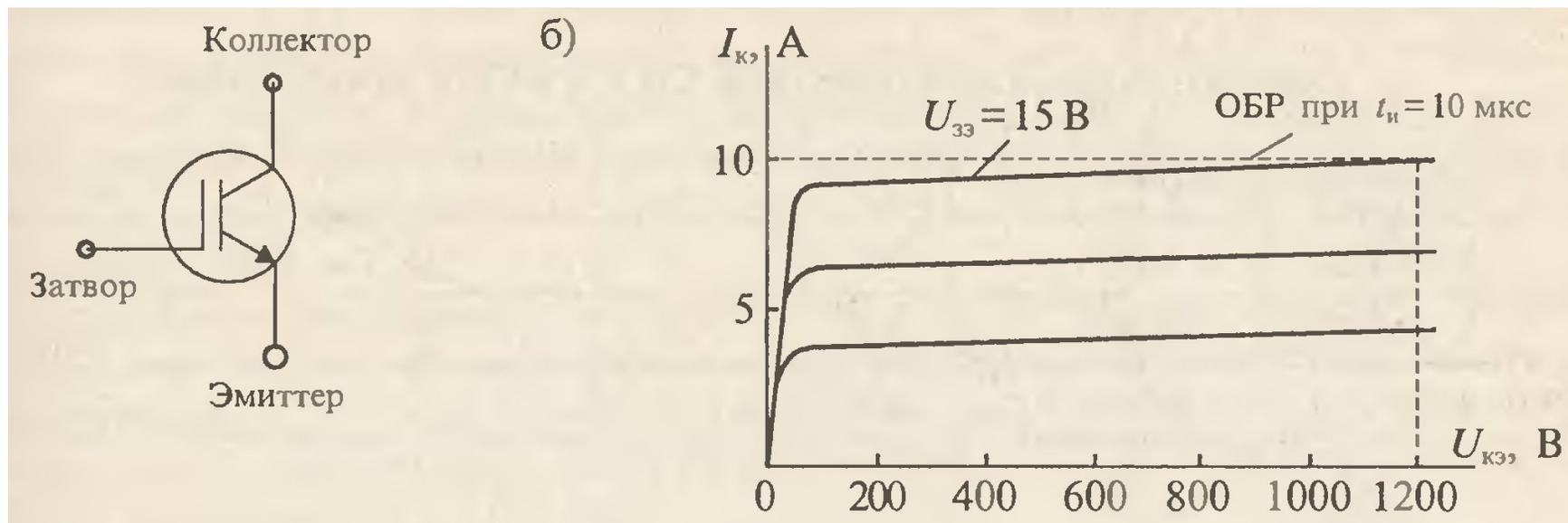
при  $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$  эквивалентная крутизна превышает крутизну ПТИЗ, регулировать их значения можно за счет R1 и R2.



# ВАХ схем замещения IGBT транзистора



# Область безотказной работы БТИЗ



- На ОБР отсутствует участок вторичного пробоя, характерный для БТ.
- Поскольку в основу транзисторов типа IGBT положены ПТИЗ с индуцированным каналом, то напряжение, подаваемое на затвор должно быть больше порогового напряжения, которое имеет значение 5-6 В.
- Быстродействие БТИЗ несколько ниже быстродействия ПТ, но значительно выше быстродействия БТ. Время вкл и выкл не превышает 0,5 -1,0 мкс.

# Характеристики БТИЗ

- Выходные характеристики БТИЗ похожи на характеристики ПТИЗ, но на участке насыщения они идут значительно круче. Это обуславливает значительно меньшее падение напряжения в ключевом режиме. Передаточные характеристики аналогичны

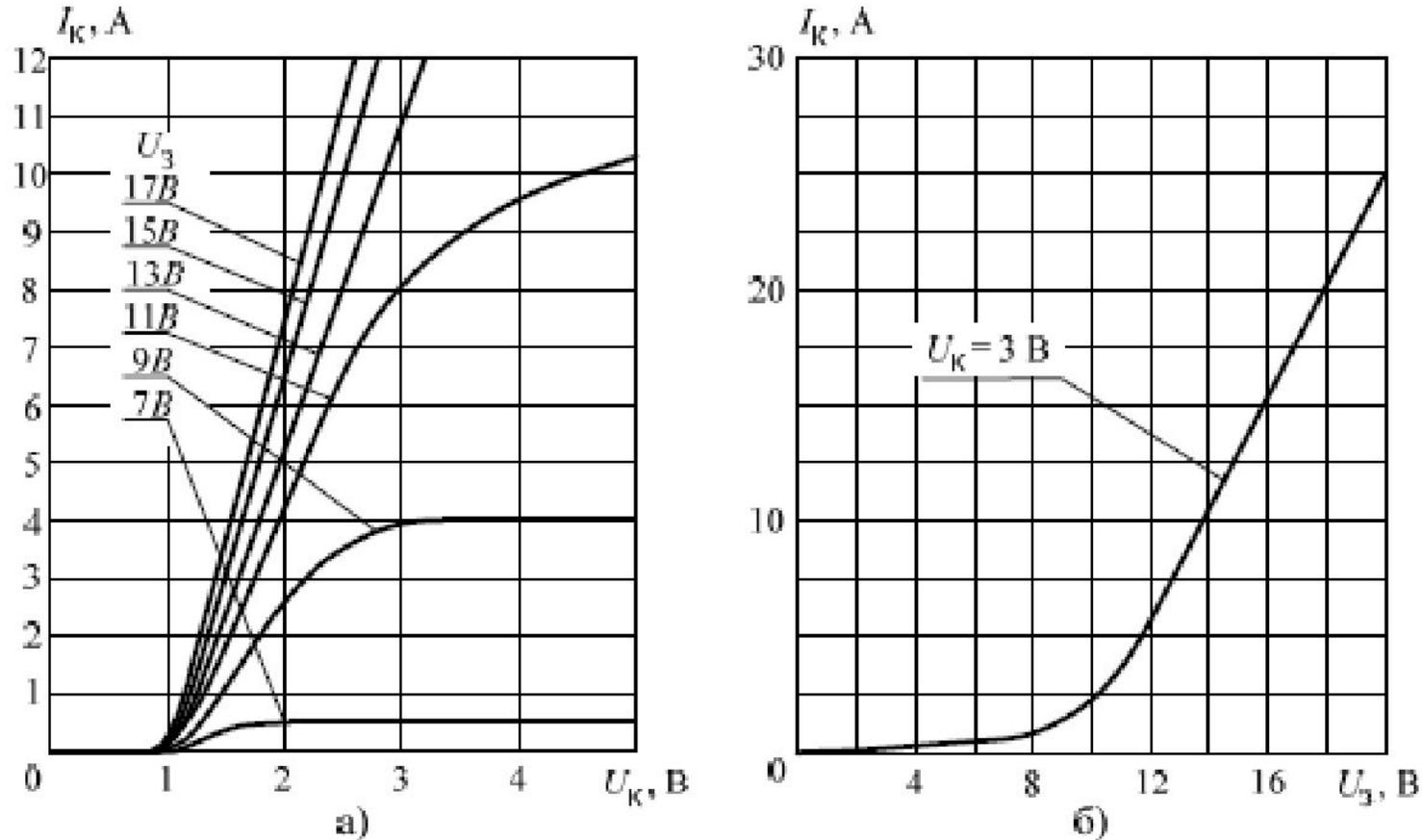


Рис. 2.20. Выходные (а) и передаточные (б) характеристики БТИЗ (выходные характеристики приведены для области насыщения)

схемы, обеспечивающие работу транзисторов разных типов в ключевом режиме

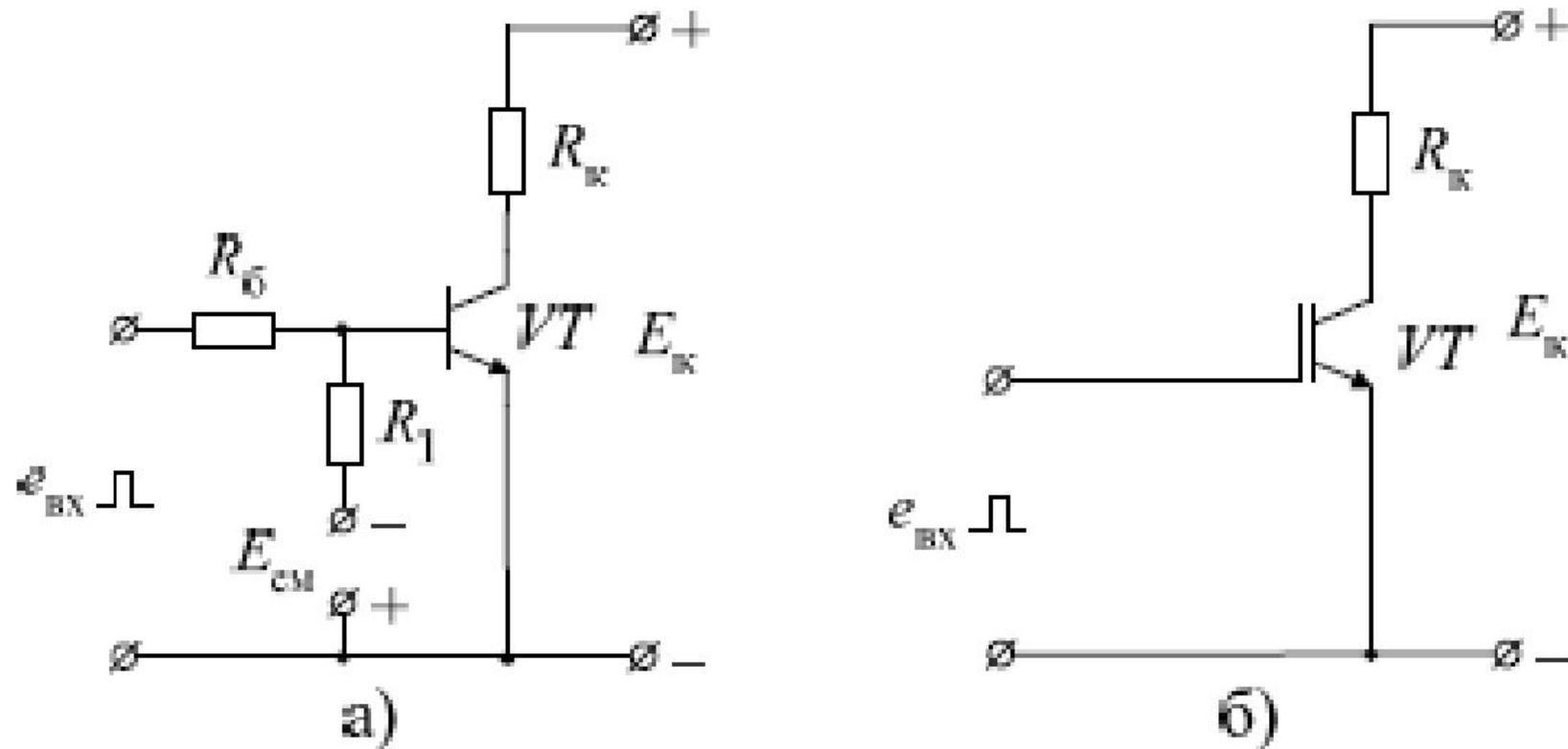
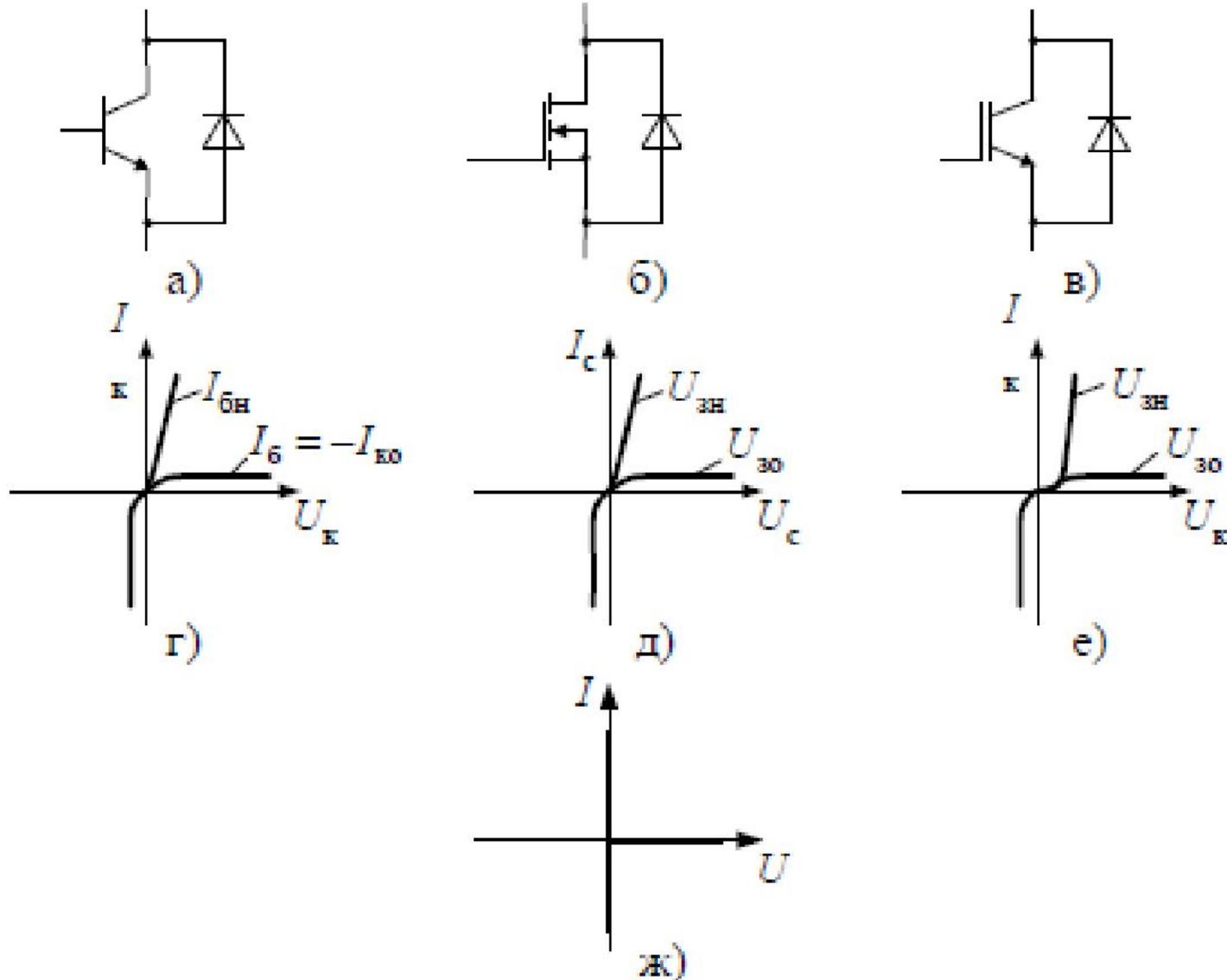


Рис. 2.22. Схемы включения транзисторов в ключевом режиме:  
(а) биполярного; (б) БТИЗ

# Схемы транзисторных ключей (а, б, в), их выходные ВАХ (г, д, е)

и ВАХ идеального транзисторного ключа (ж)



В ключевом режиме все транзисторы в открытом состоянии работают на вертикальной части выходной ВАХ (малое падение напряжения), а в закрытом – на нижней горизонтальной ВАХ (малый ток). Все транзисторные ключи не допускают приложения обратного напряжения и, поэтому, как правило, шунтируются обратными диодами (рис. 2.23 а – в).

# Основные параметры ПТИЗ и БТИЗ

- Основные параметры ПТИЗ и БТИЗ практически одинаковы, только взамен названий электродов сток и исток употребляются термины коллектор и эмиттер.

*По току стока:*

- - максимально допустимый ток стока  $I_{c.max}$  при заданной температуре корпуса (достигает 100 А у ПТИЗ и 2000 А у БТИЗ);
- - ток стока отсечки (через запертый транзистор)  $I_{отс}$ .

*По напряжению на стоке:*

- - максимально допустимое напряжение сток-исток  $U_{си.max}$  при токе базы равно нулю (достигает 900 В у ПТИЗ и 4500 В у БТИЗ);
- $I_{c.max}$  и  $U_{си.max}$  не могут достигать одновременно максимальных значений.

*По сопротивлению:* сопротивление сток-исток в открытом состоянии при заданном токе стока и напряжении затвор-исток  $R_{си}$  (от десятков мОм до единиц Ом).

*По мощности:* максимальная мощность рассеяния на стоке  $P_{с.max}$  при заданной температуре корпуса.

*По управлению:*

$$S = (dI_c / dU_z) U_z = \text{const}$$

- - крутизна передаточной характеристики
- - максимально допустимое напряжение затвор-исток  $U_{зи.max}$  (до 20 В);
- - пороговое напряжение затвор-исток  $U_{З0}$  (2 – 5 В).

*Тепловые параметры:*

- - тепловое сопротивление переход-корпус (при применении охладителя)  $R_T(П-К)$ ;
- - тепловое сопротивление переход-окружающая среда (при отсутствии охладителя)  $R_T(П-С)$ .

Параметры для БТИЗ практически те же, но вместо параметра сопротивление сток-исток  $R_{си}$  в открытом состоянии используется напряжение насыщения коллектор-эмиттер  $U_{кэ.нас}$ , которое определяется при заданном токе коллектора и напряжении затвор-эмиттер (1,5 – 3,5 В).

