

Полевые транзисторы

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением проводимости проводящего канала с помощью поперечного электрического поля

Электроды полевого транзистора – исток (И), сток (С) и затвор (З).

Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком

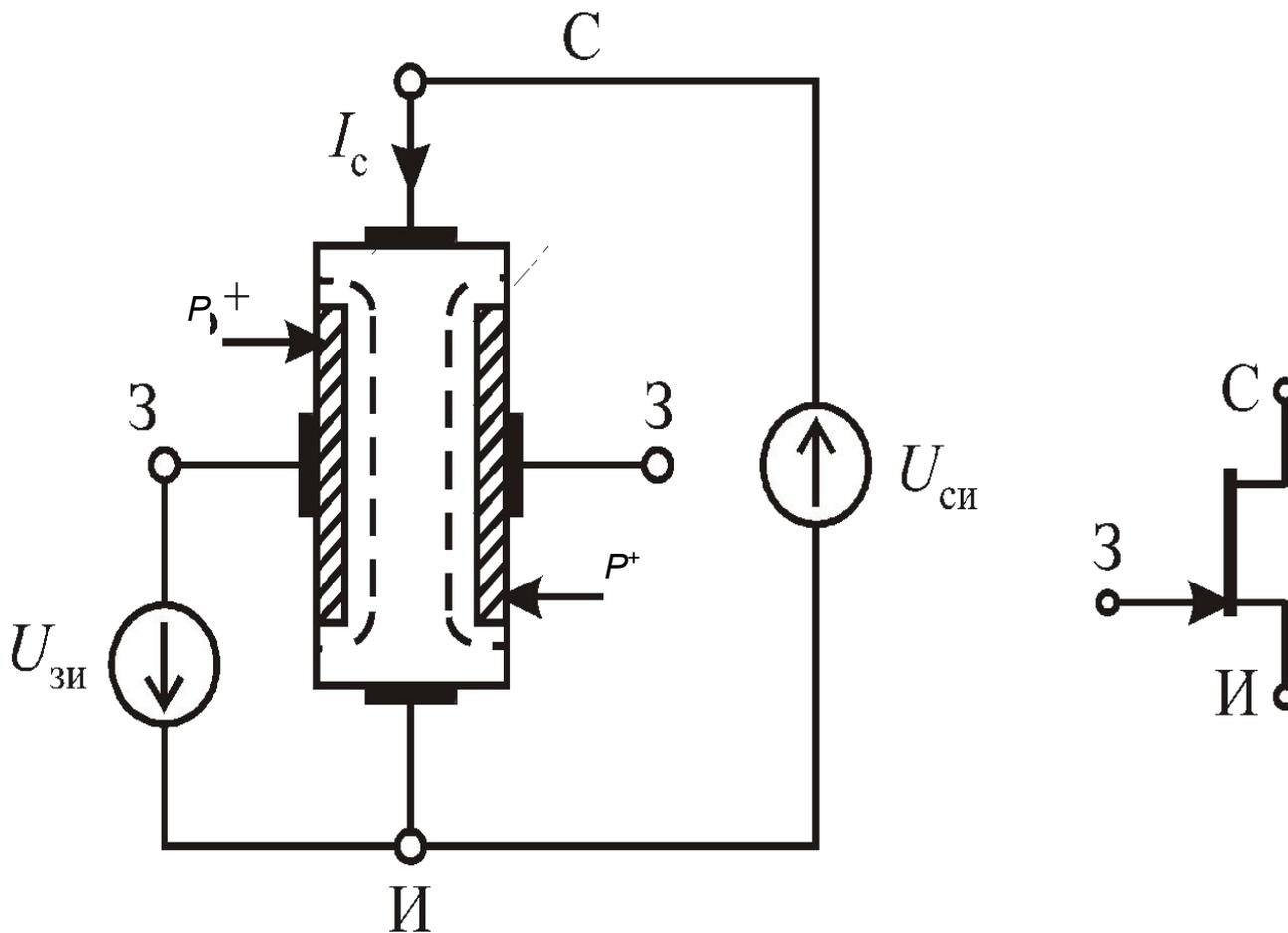
Полевые транзисторы

Классификация полевых транзисторов

1. С управляющим $p-n$ -переходом;
2. С металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

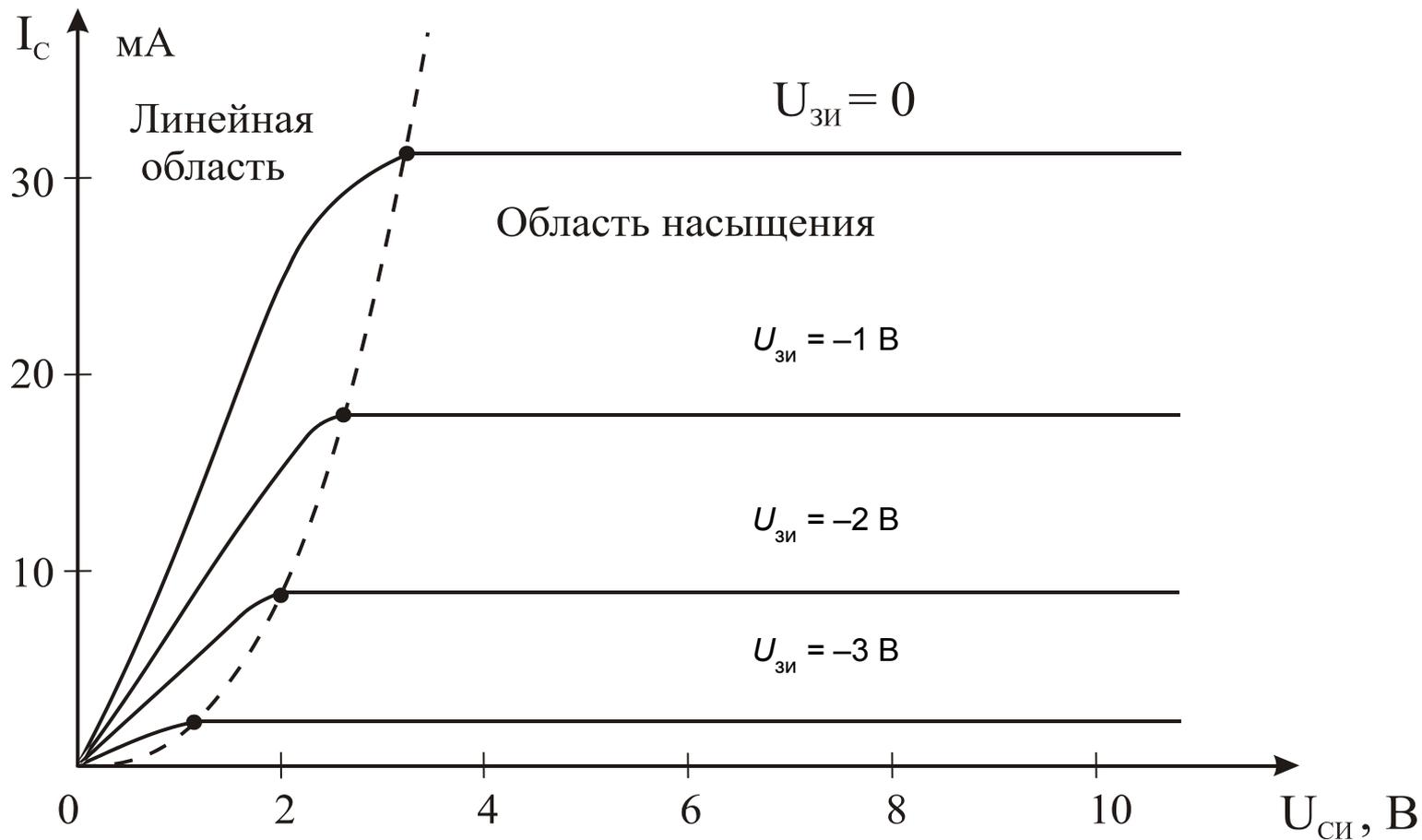
Приборы второго типа называют МОП-транзисторами.

Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом



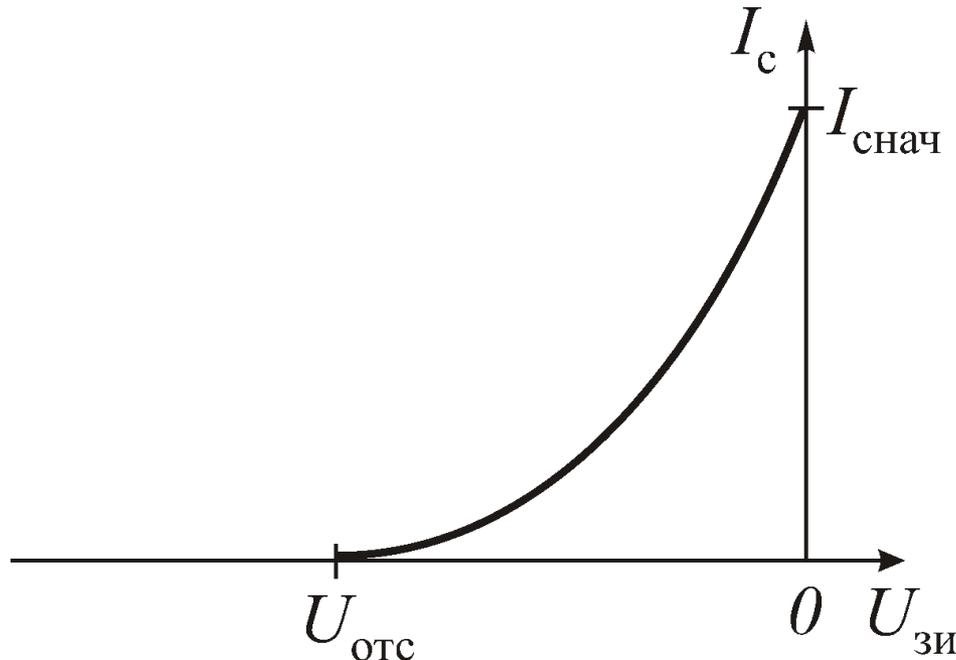
Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

Выходные характеристики



Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

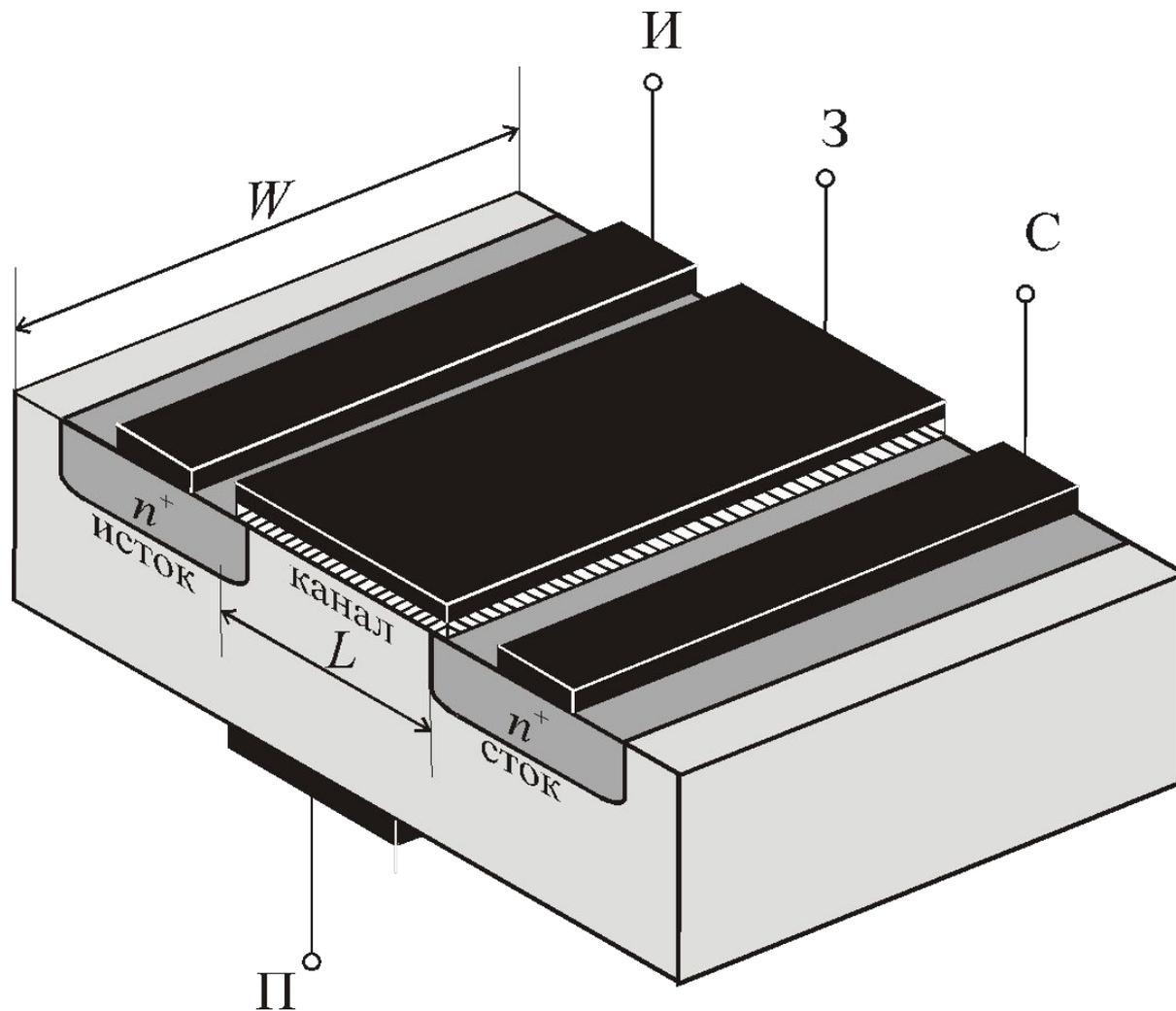
Передаточная характеристика



При напряжении затвор-исток, равном напряжению отсечки $U_{отс}$ ток стока близок к нулю.

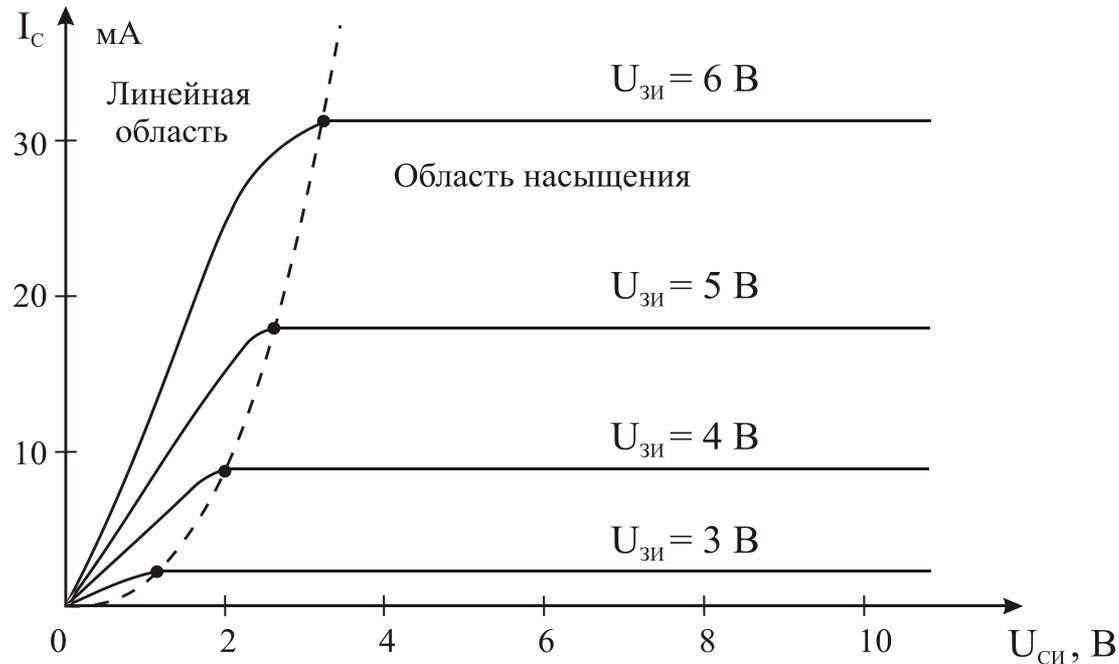
У n -канального ПТ напряжение затвор-исток отрицательно.

МОП-транзистор с индуцированным каналом



МОП-транзистор с индуцированным каналом

Выходные характеристики



Режимы полевого транзистора:

- линейный;
- насыщения;
- отсечки.

МОП-транзистор с индуцированным каналом

Линейный (триодный) режим работы МОП-транзистора

$$U_{зи} > U_0$$

$$I_{\kappa} = \beta I_{\bar{\sigma}} = \frac{\beta (E_{\bar{\sigma}} - E_0)}{R_{\bar{\sigma}} + R_{\bar{\sigma}} (\beta + 1)}$$

Ток стока

$$I_c = b \left[(U_{зи} - U_0) U_{си} - 0.5 U_{си}^2 \right]$$

МОП-транзистор с индуцированным каналом

b – удельная крутизна МОП-транзистора:

$$b = \mu C_0 \frac{W}{L}$$

μ – приповерхностная подвижность носителей,
 C_0 – удельная емкость затвор-канал,
 L – длина, W – ширина канала.

МОП-транзистор с индуцированным каналом

При малых значениях напряжения сток-исток

$$I_c \approx b(U_{зи} - U_0)U_{си}$$

При малых значениях $U_{си}$ канал МОП-транзистора эквивалентен линейному резистору.

Величина $b(U_{зи} - U_0)$ – проводимость канала

Сопротивление канала:

$$R_{си} = \frac{1}{b(U_{зи} - U_0)}$$

МОП-транзистор с индуцированным каналом

Режим насыщения МОП-транзистора

$$U_{зи} > U_0$$

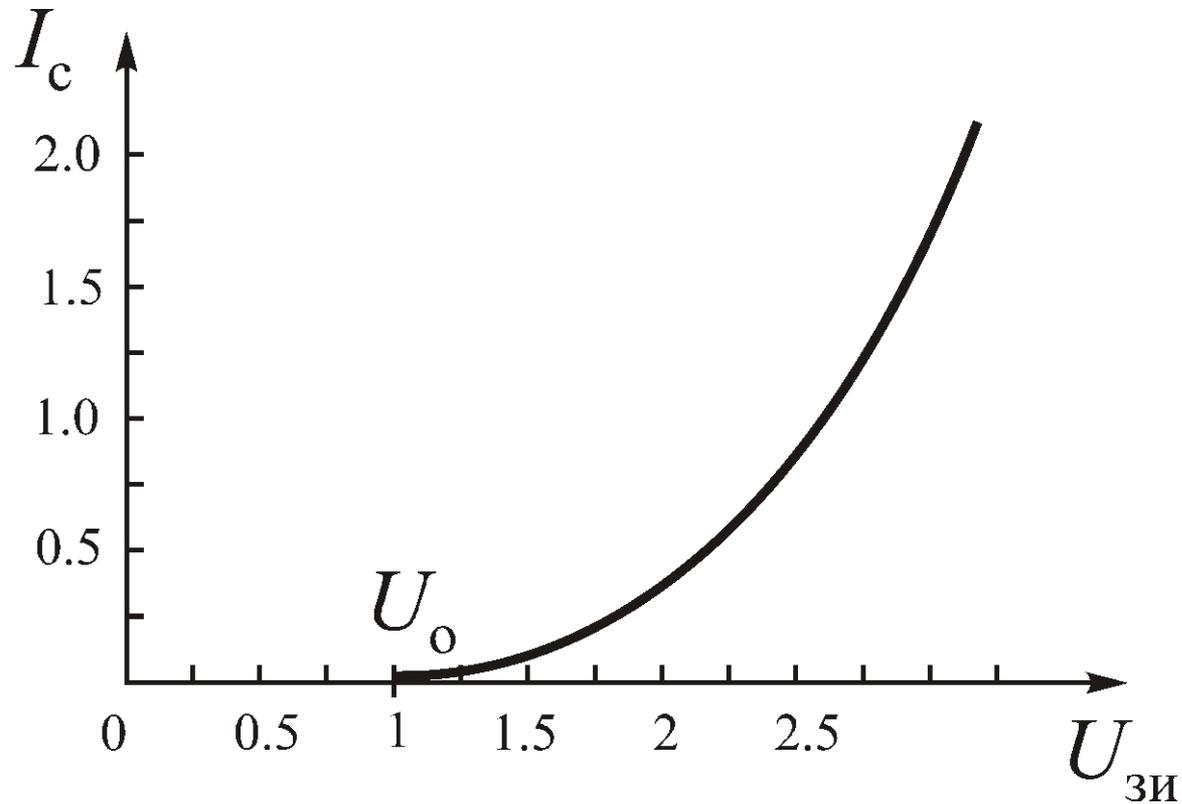
$$U_{си} \geq U_{нас} = U_{зи} - U_0$$

Ток стока

$$I_c = \frac{1}{2} b (U_{зи} - U_0)^2$$

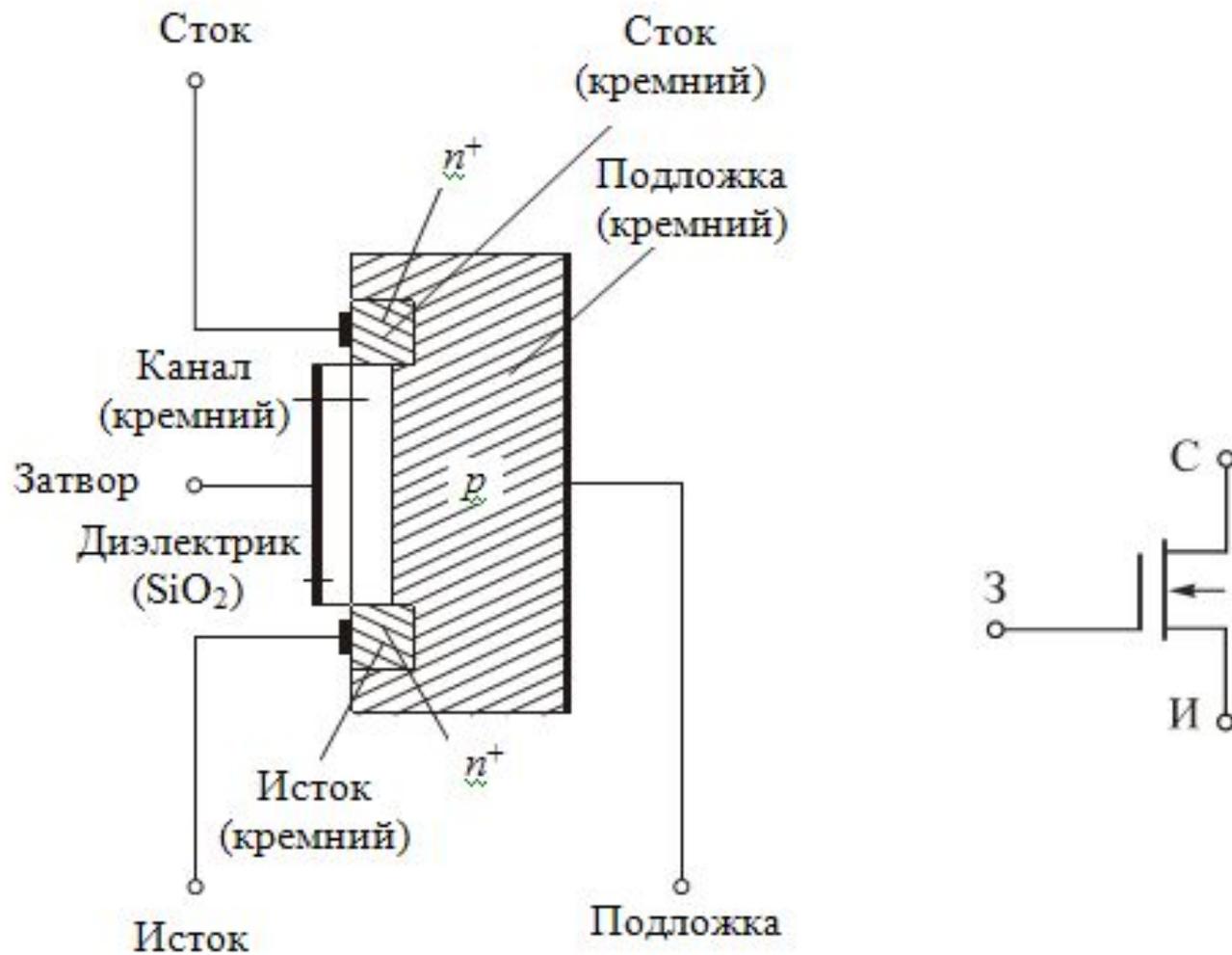
МОП-транзистор с индуцированным каналом

Передаточная характеристика МОП-транзистора



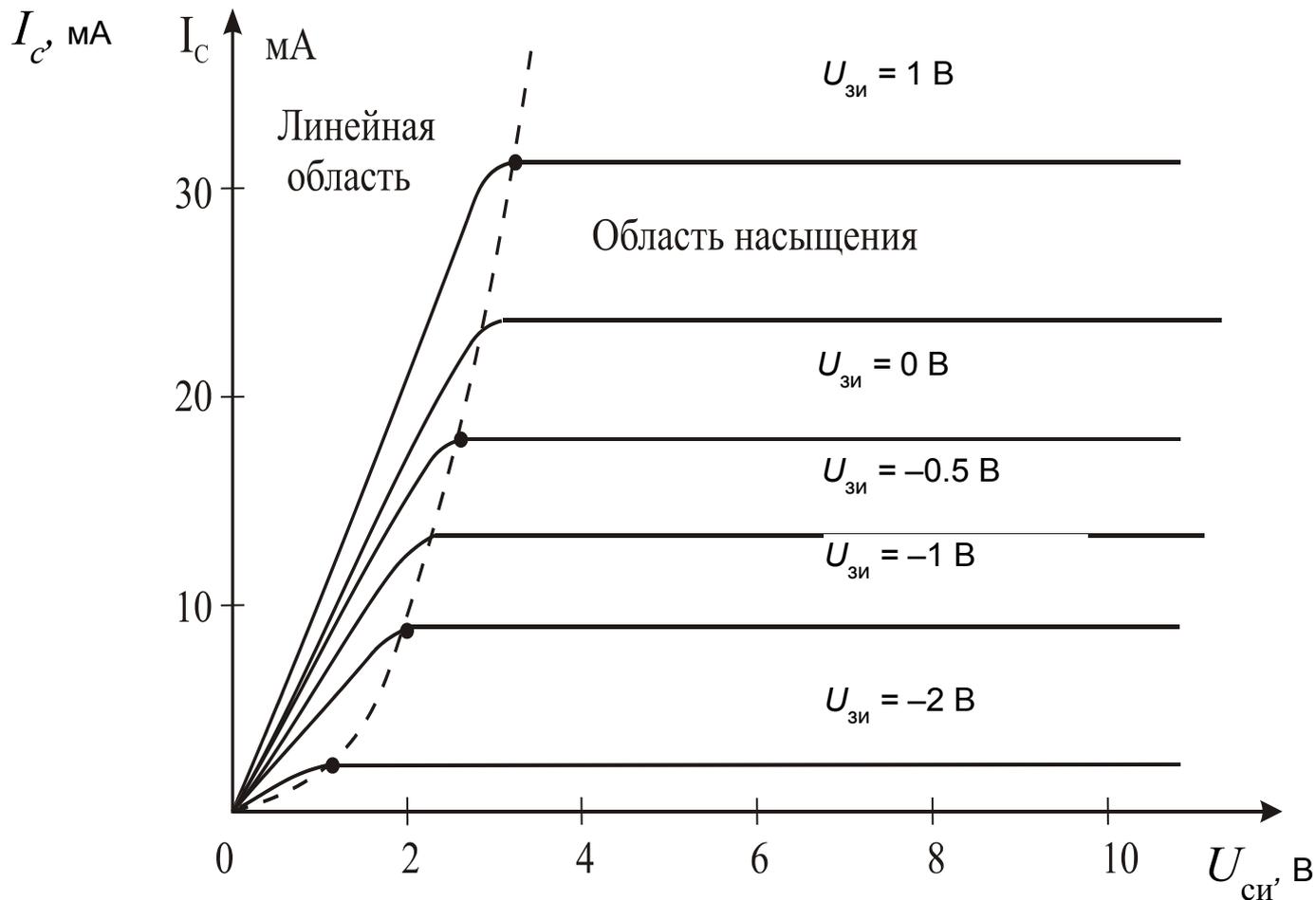
U_0 – напряжение отсечки

МОП-транзистор с встроенным каналом



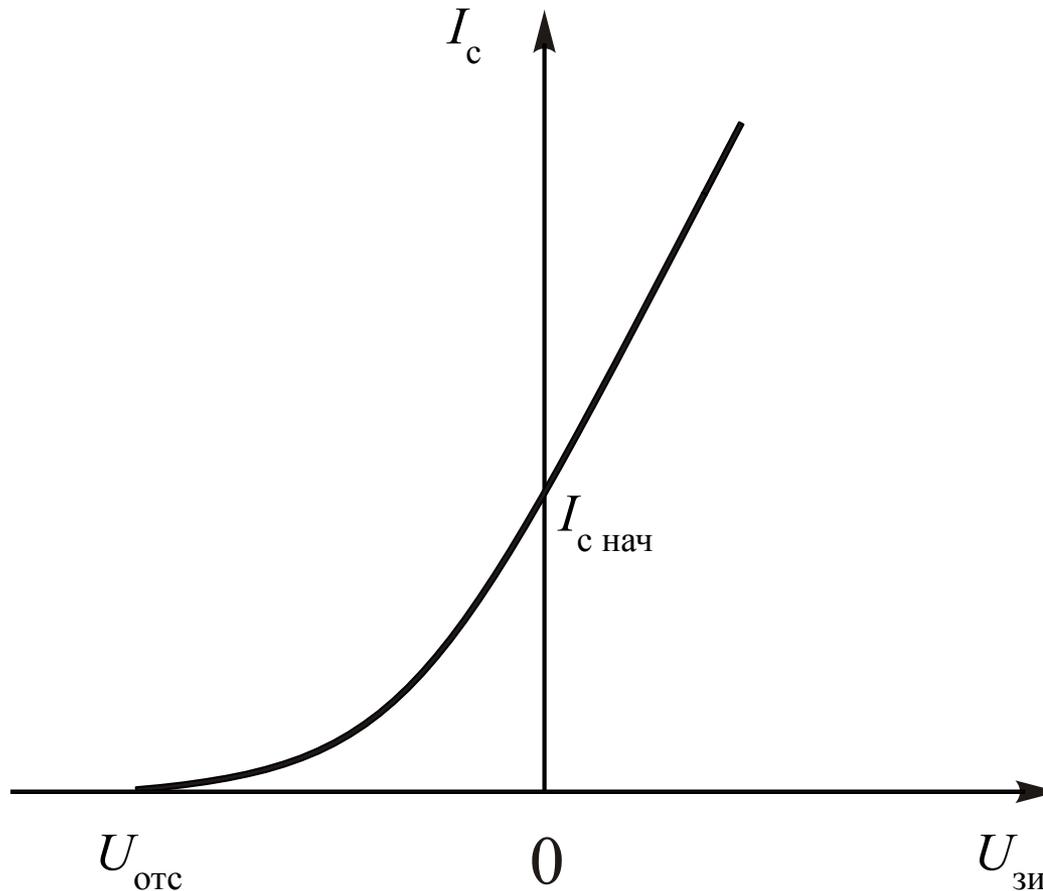
МОП-транзистор с встроенным каналом

Выходные характеристики



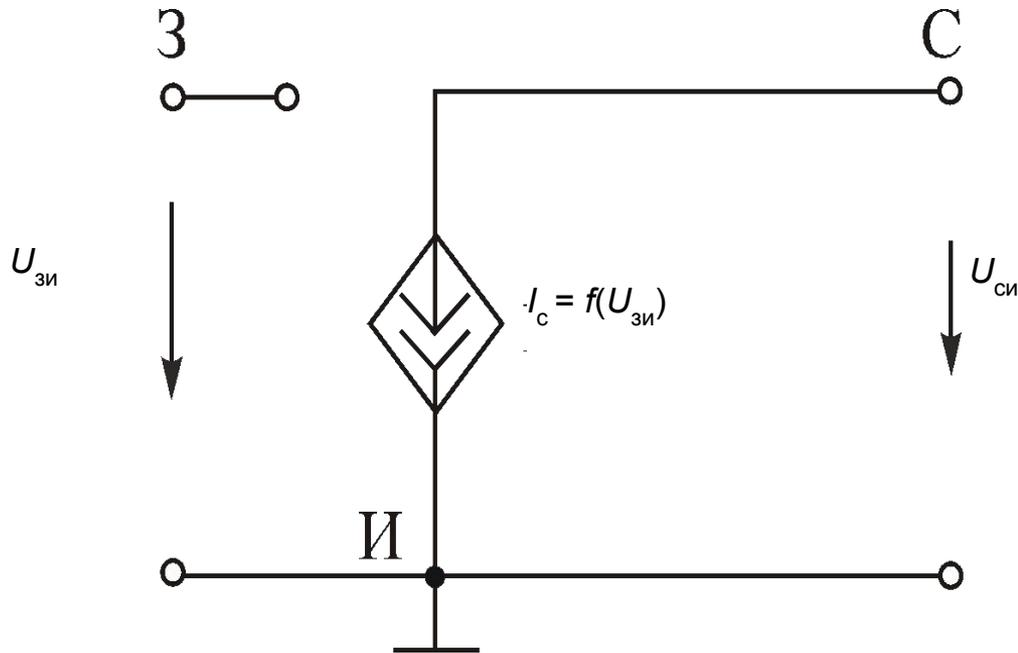
МОП-транзистор с встроенным каналом

Передаточная характеристика



Модели МОП-транзисторов

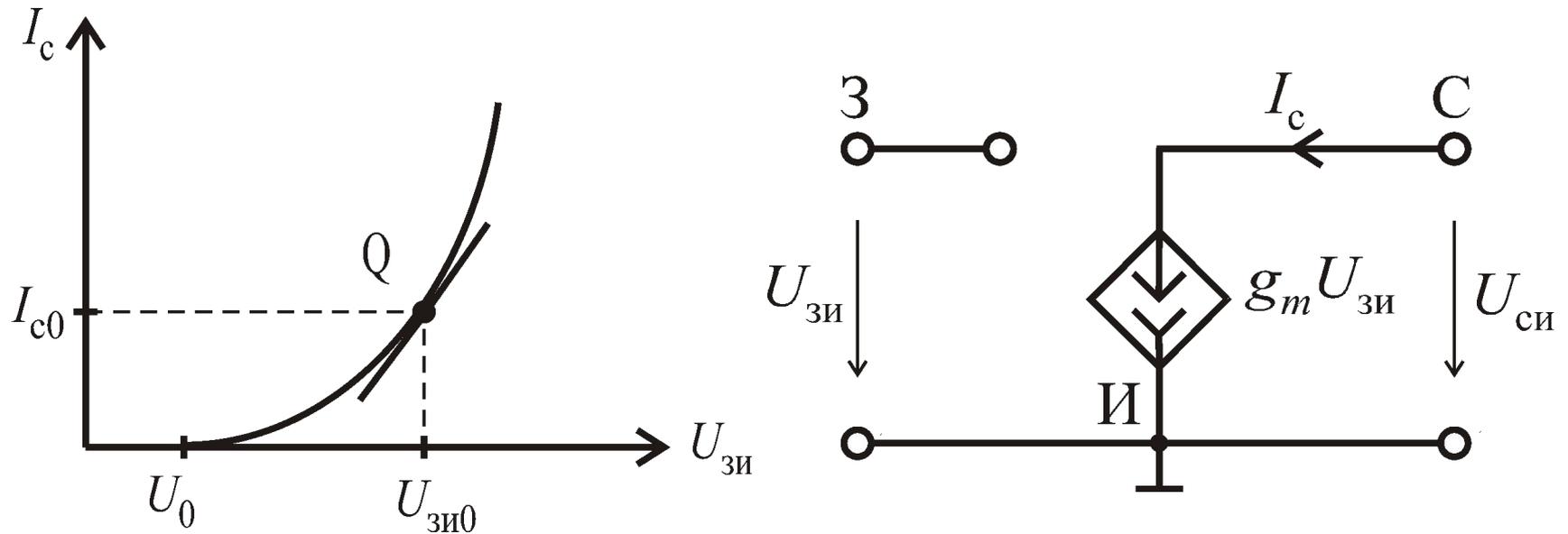
Квадратинная модель МОП-транзистора



$$I_c = \frac{1}{2} b (U_{зи} - U_0)^2$$

Модели МОП-транзисторов

Квадратичная модель МОП-транзистора

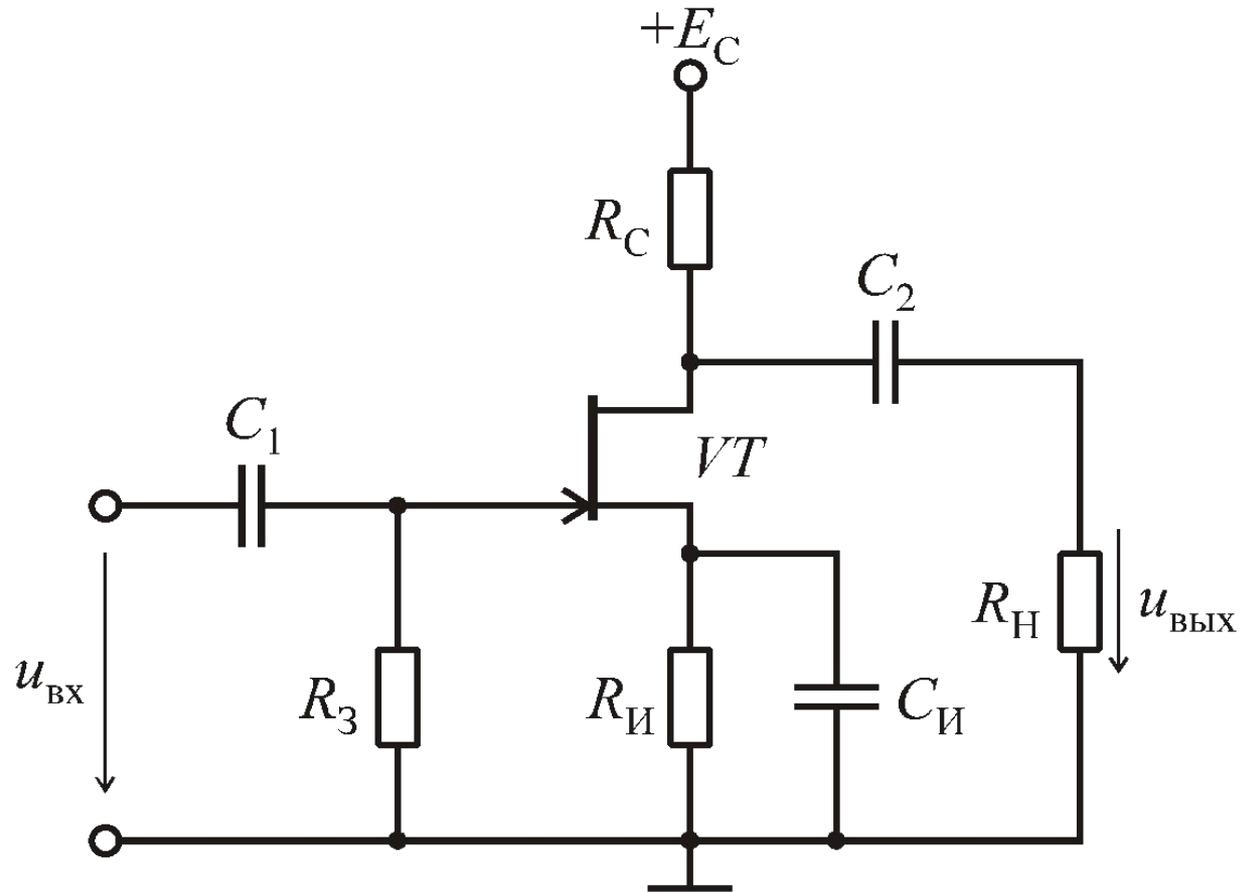


$$g_m = \sqrt{2bI_c}$$

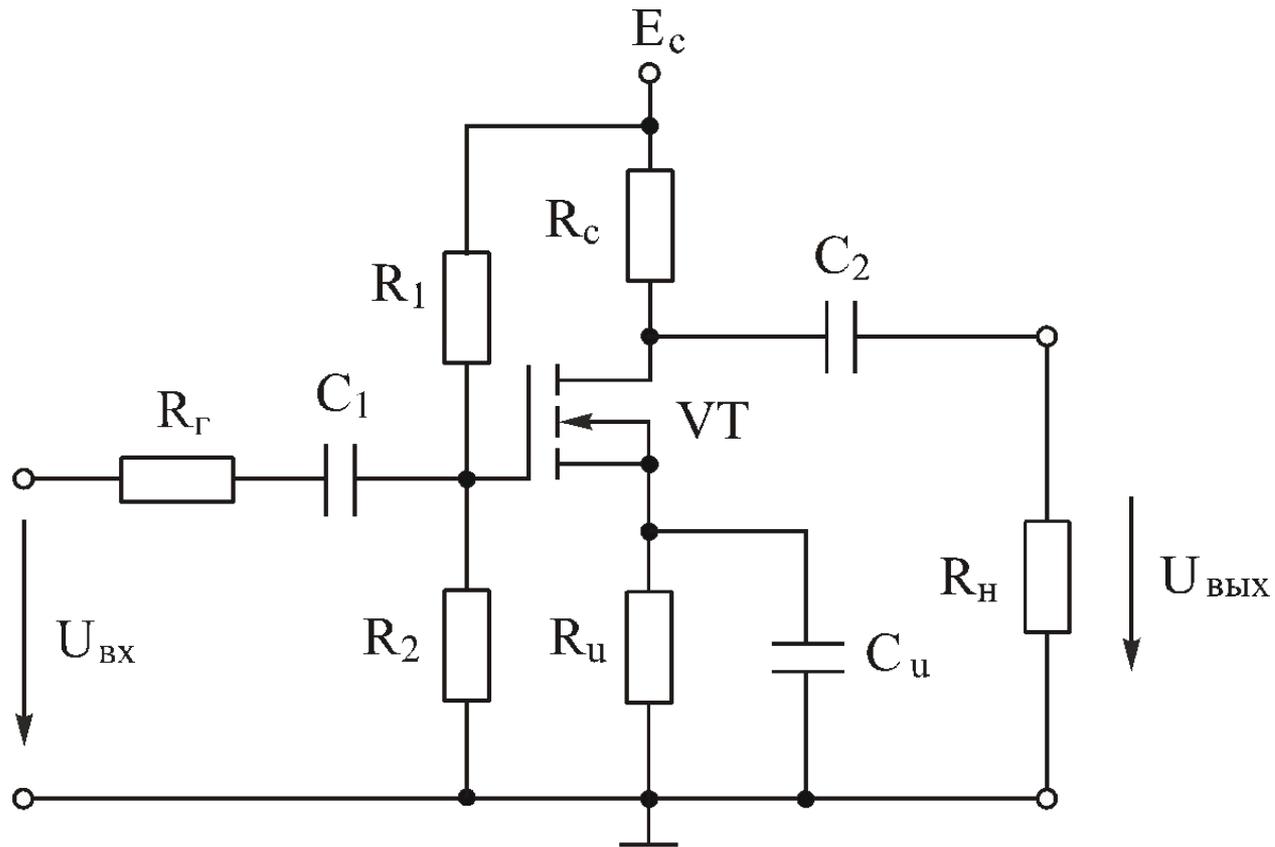
или

$$g_m = \frac{2I_c}{U_{зи} - U_0}$$

Усилитель на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом

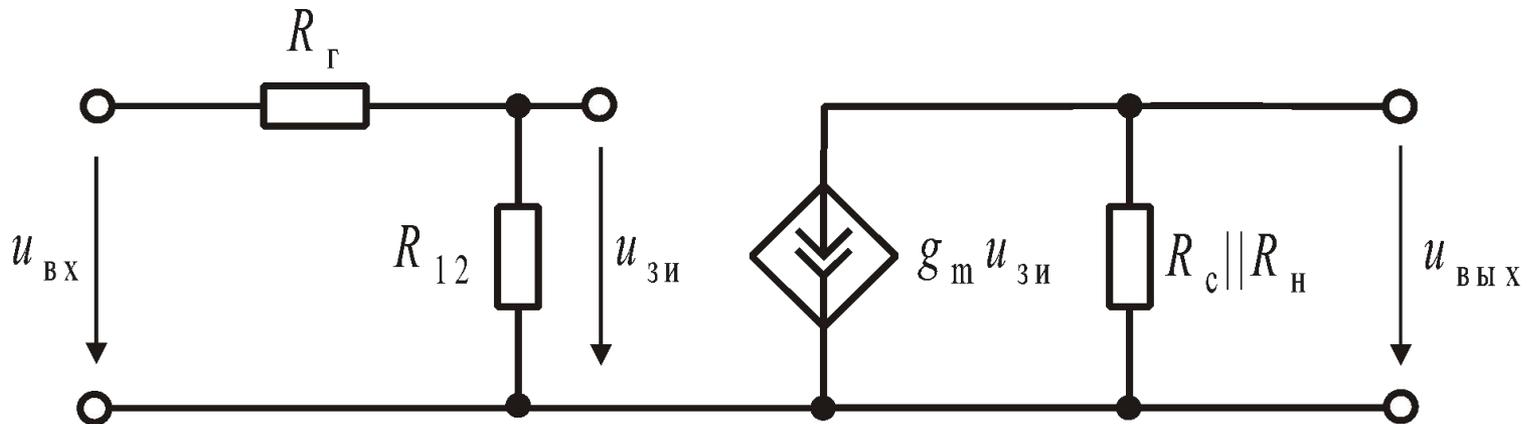


Усилитель на МОП-транзисторе с индуцированным каналом



Усилитель на МОП-транзисторе с индуцированным каналом

Схема замещения для режима малого сигнала



Выходное напряжение $u_{ВЫХ} = -g_m R_c \parallel R_H u_{ВХ}$

Коэффициент усиления переменной составляющей
напряжения

$$K_U = -g_m R_c \parallel R_H$$

Усилители

Классификация усилителей

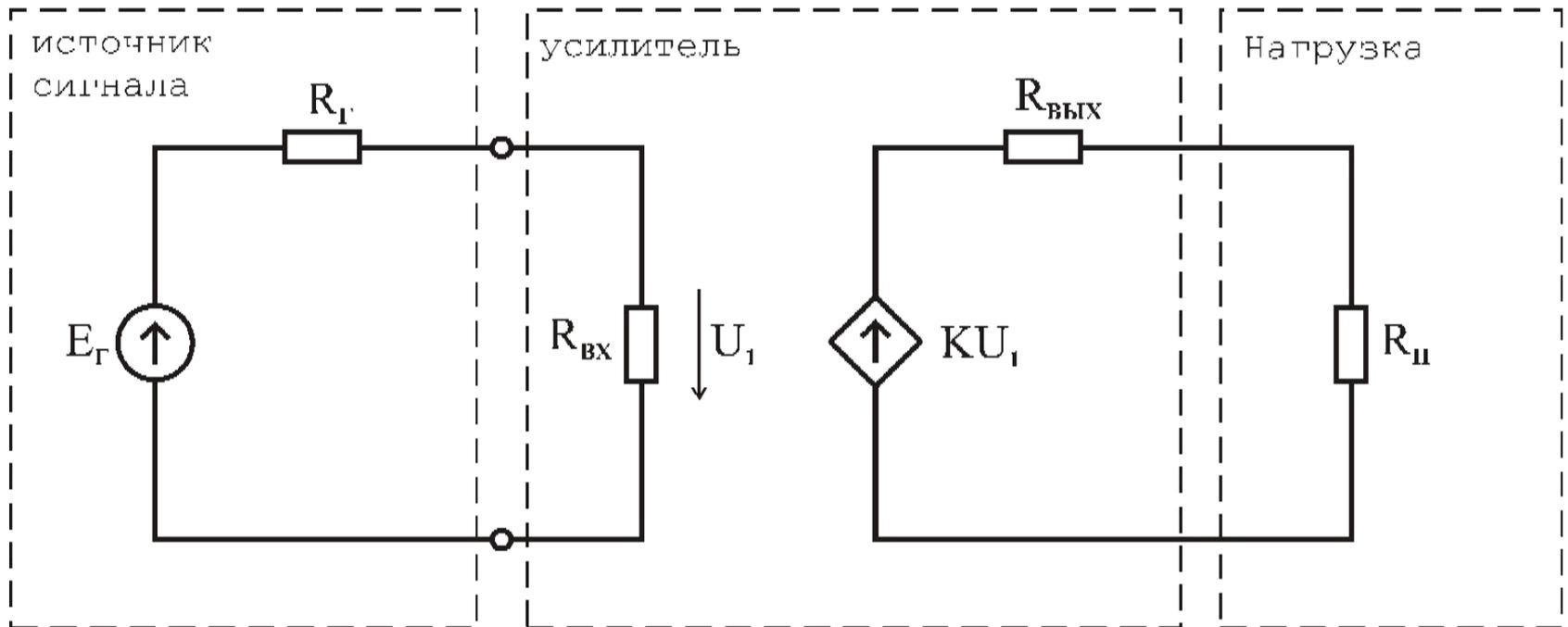
1. По диапазону усиливаемых частот – усилители низких частот (УНЧ), усилители постоянного тока (УПТ), усилители высоких частот (УВЧ), избирательные усилители.

2. По функциональному назначению – усилители напряжения, тока, мощности.

3. По характеру усиливаемого сигнала – усилители непрерывных и импульсных сигналов.

Усилители

Структура усилительного устройства



Усилители

Параметры усилителей

Основной количественный параметр – коэффициент усиления
(коэффициент передачи).

• Коэффициент усиления напряжения

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

• Коэффициент усиления тока

$$K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$$

• Коэффициент усиления мощности

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = K_U K_I$$

Усилители

Коэффициент передачи усилителя – комплексная функция частоты:

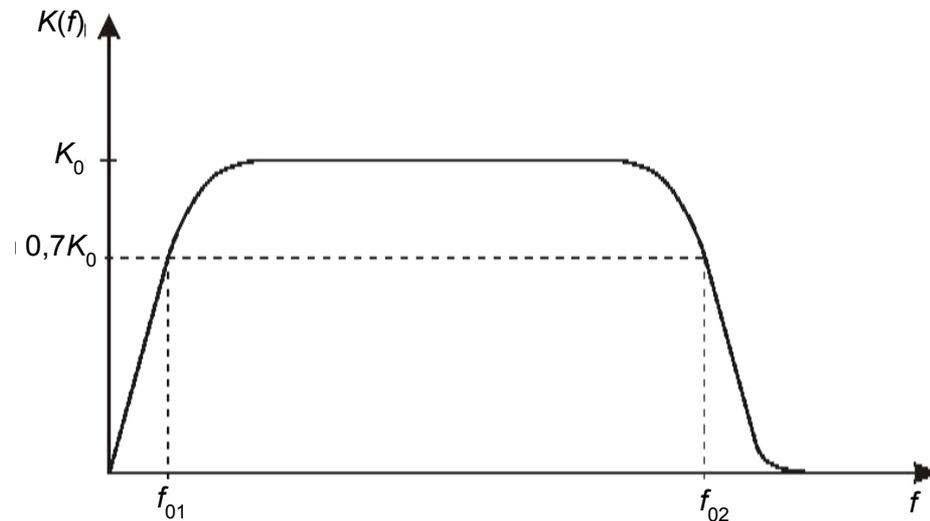
$$K = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты называют *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*.

зависимость аргумента коэффициента усиления от частоты – *фазочастотная характеристика (ФЧХ)*.

Усилители

Примерный вид амплитудно-частотной характеристики усилителя



Полоса пропускания ограничена частотами среза ω_{01} и ω_{02}

На частотах среза коэффициент усиления напряжения составляет $K_0/\sqrt{2} \approx 0,707K_0$, а коэффициент усиления мощности равен $0,5K_0$.

Усилители

Логарифмические частотные характеристики

Коэффициент усиления удобно измерять в логарифмических единицах – децибелах:

$$K_U(\text{дБ}) = 20 \lg K_U$$

$$K_I(\text{дБ}) = 20 \lg K_I$$

$$K_P(\text{дБ}) = 10 \lg K_P$$

Если АЧХ усилителя построена в логарифмическом масштабе, ее называют *логарифмической амплитудно-частотной характеристикой* (ЛАЧХ или ЛАХ).

Обратные связи в усилителях

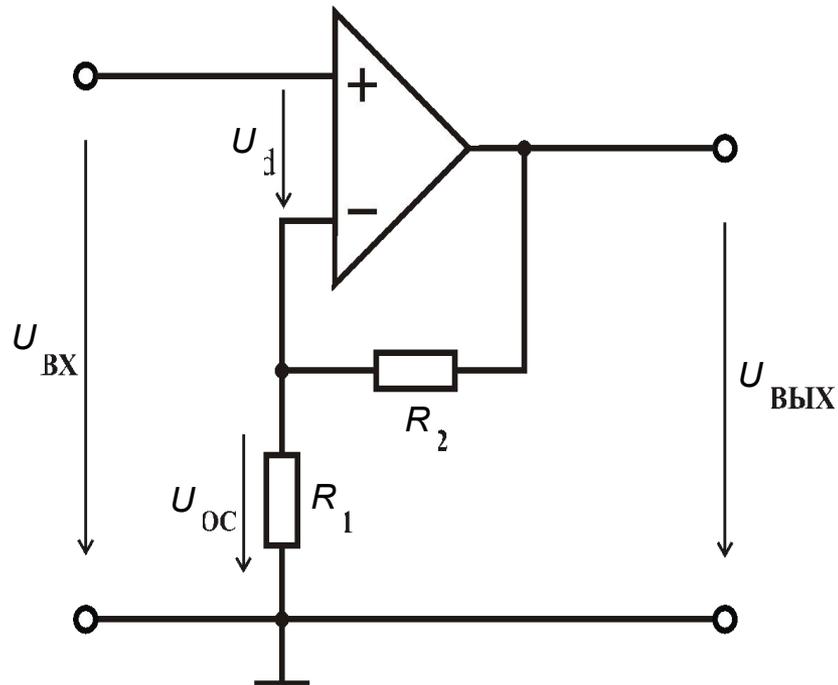
Обратной связью называют процесс передачи сигнала из выходной цепи во входную.

Цепь, обеспечивающую эту передачу, называют *цепью обратной связи*.

Петля, или *контур обратной связи*, состоит из прямого пути, образуемого активным элементом, и обратного пути, образуемого цепью обратной связи.

Обратные связи в усилителях

Пример: усилитель, охваченный цепью обратной связи



Цепь обратной связи – делитель напряжения, образованный резисторами R_1 , R_2 .

Обратные связи в усилителях

Выходное напряжение усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = KU_d$$

Напряжение обратной связи

$$U_{\text{ос}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\text{ВЫХ}} = \beta U_{\text{ВЫХ}}$$

$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ – коэффициент передачи цепи обратной связи.

Напряжение на входе усилителя

$$U_d = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ос}} = \frac{1}{1 + \beta K} U_{\text{ВХ}}$$

Обратные связи в усилителях

Выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{K}{1 + \beta K} U_{\text{ВХ}}$$

Коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью,

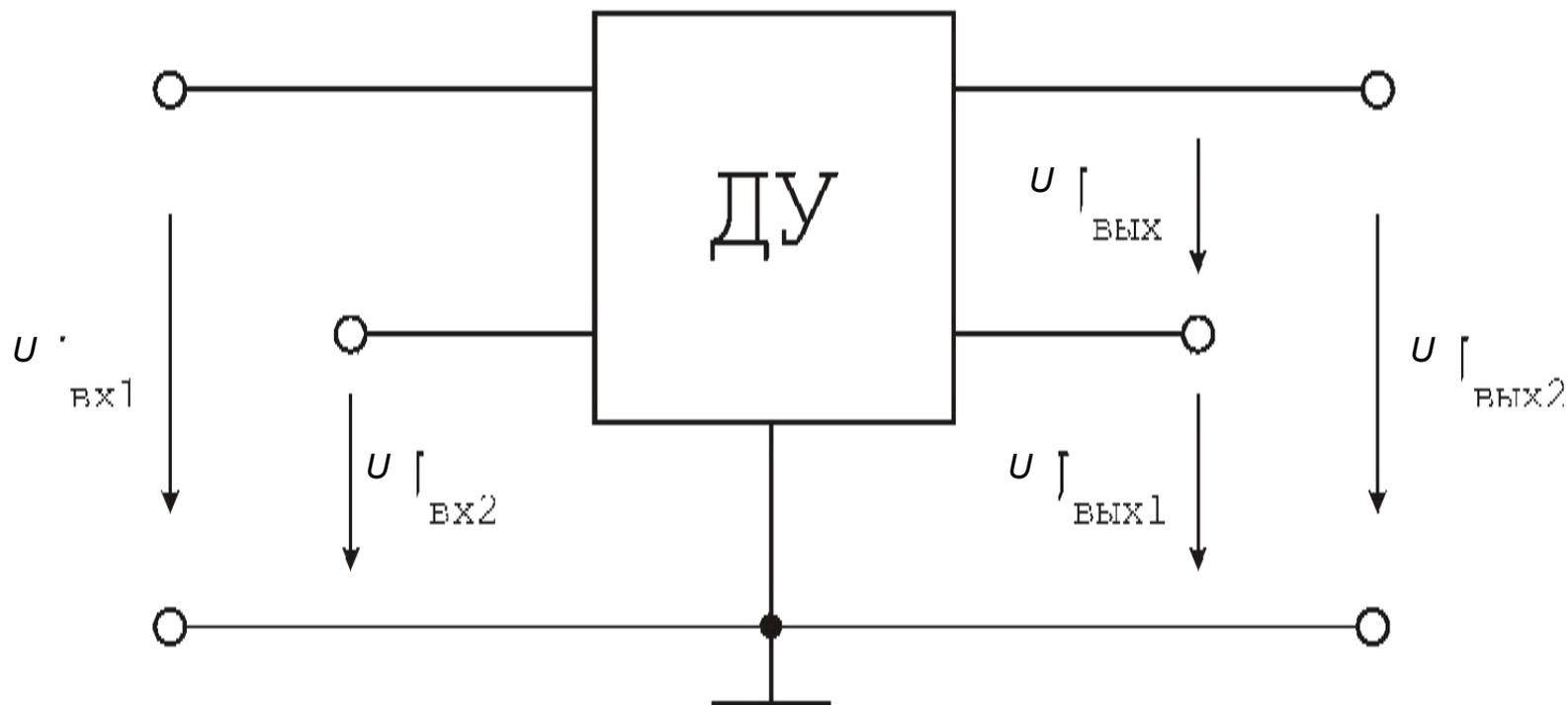
$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{1 + \beta K}$$

Произведение βK – коэффициент петлевого усиления,

Величина $1 + \beta K$ – глубина обратной связи

Дифференциальные усилители

Дифференциальный усилитель (ДУ) – симметричная схема с двумя входами и двумя выходами



Дифференциальные усилители

Сигналы на входе дифференциального усилителя представляют в виде суммы *дифференциальной* и *синфазной* составляющих:

$$U_{\text{вх}1} = U_{\text{сф}} + U_{\text{д}} / 2$$

$$U_{\text{вх}2} = U_{\text{сф}} - U_{\text{д}} / 2$$

Дифференциальный сигнал равен разности входных напряжений:

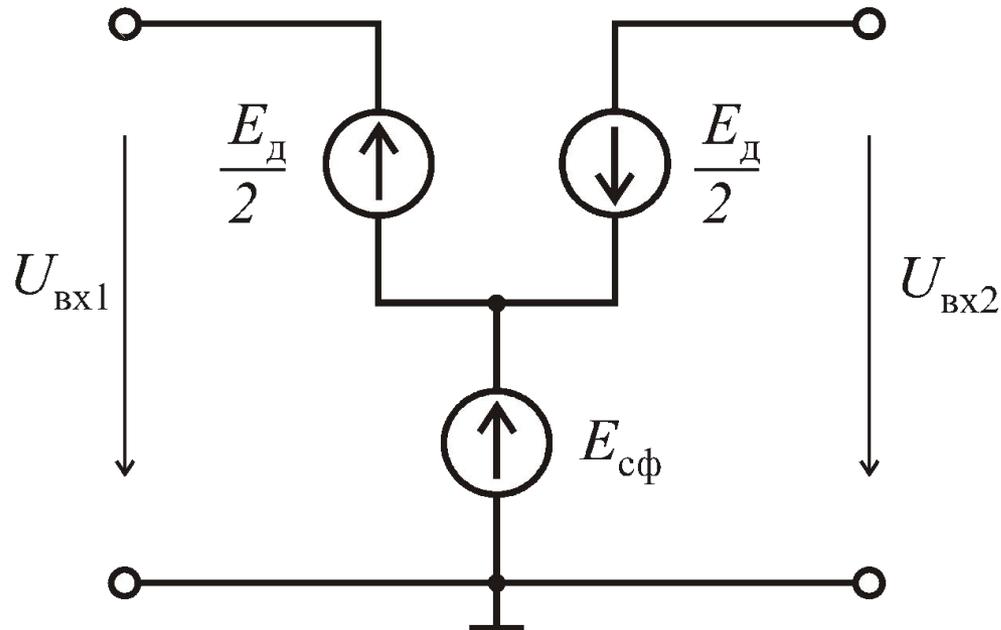
$$U_{\text{д}} = U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2} ,$$

а синфазный – их полусумме:

$$U_{\text{сф}} = \frac{U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}}{2}$$

Дифференциальные усилители

Источник сигнала на входе дифференциального усилителя можно представить эквивалентной схемой, показанной на рисунке



Дифференциальные усилители

Параметры дифференциального усилителя

Коэффициент усиления дифференциального сигнала

$$K_{\text{д}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{д}}}$$

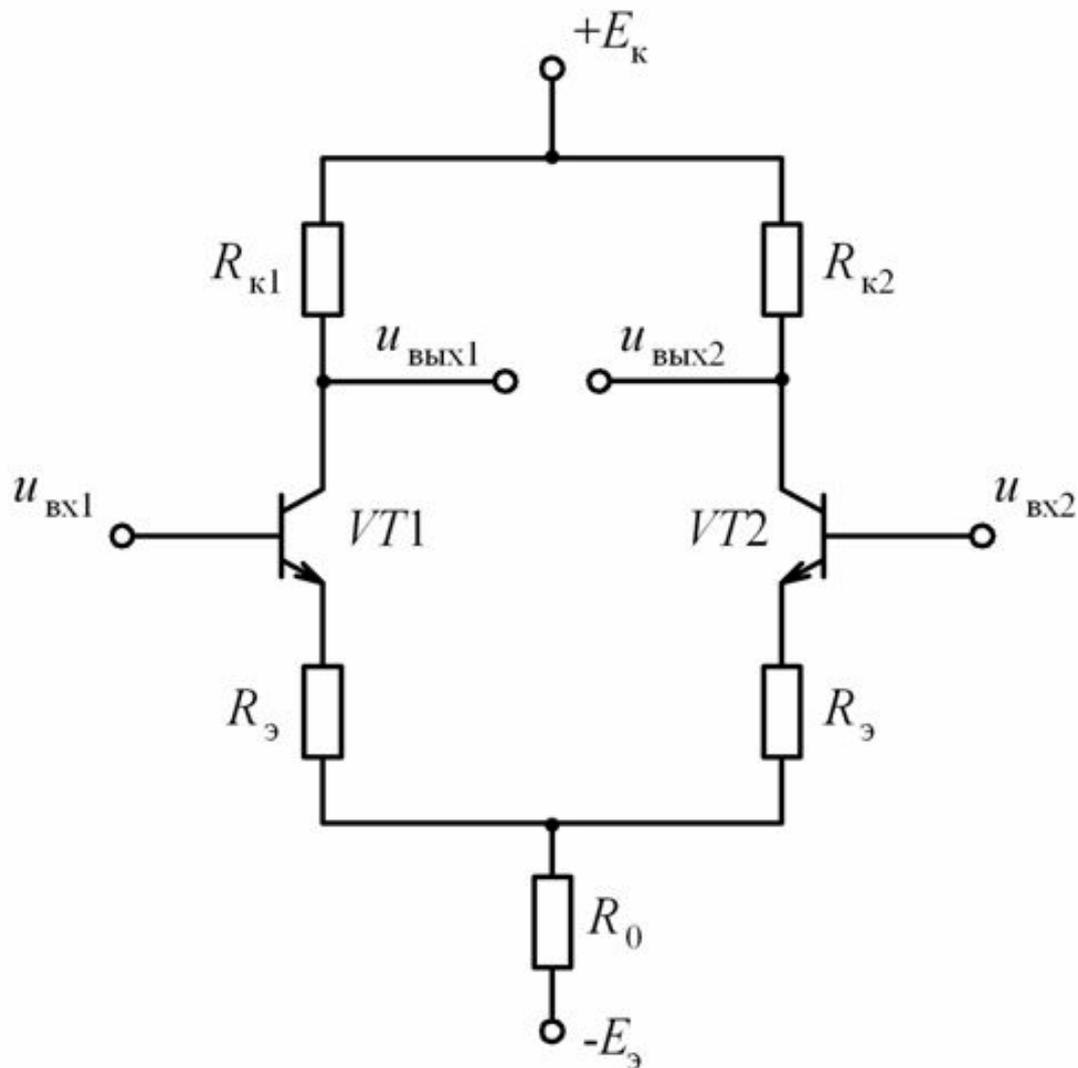
Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{сф}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{сф}}}$$

Коэффициент ослабления синфазного сигнала:

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}}$$

Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах



Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах

Коэффициенты усиления дифференциального сигнала

$$K_{д1} = -K_{д1} = \frac{u_{\text{ВЫХ1}}}{u_{\text{д}}} = -\alpha \frac{R_{\text{к}}}{2(R_0 + R_{\text{э}})}$$

Для симметричного выхода

$$K_{\text{д}} = \alpha \frac{R_{\text{к}}}{(R_0 + R_{\text{э}})}$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{сф1}} = K_{\text{сф2}} = -\frac{\alpha R_{\text{к}}}{2R_0}$$

Коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}} \approx \frac{R_{\text{л}}}{(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})}$$