

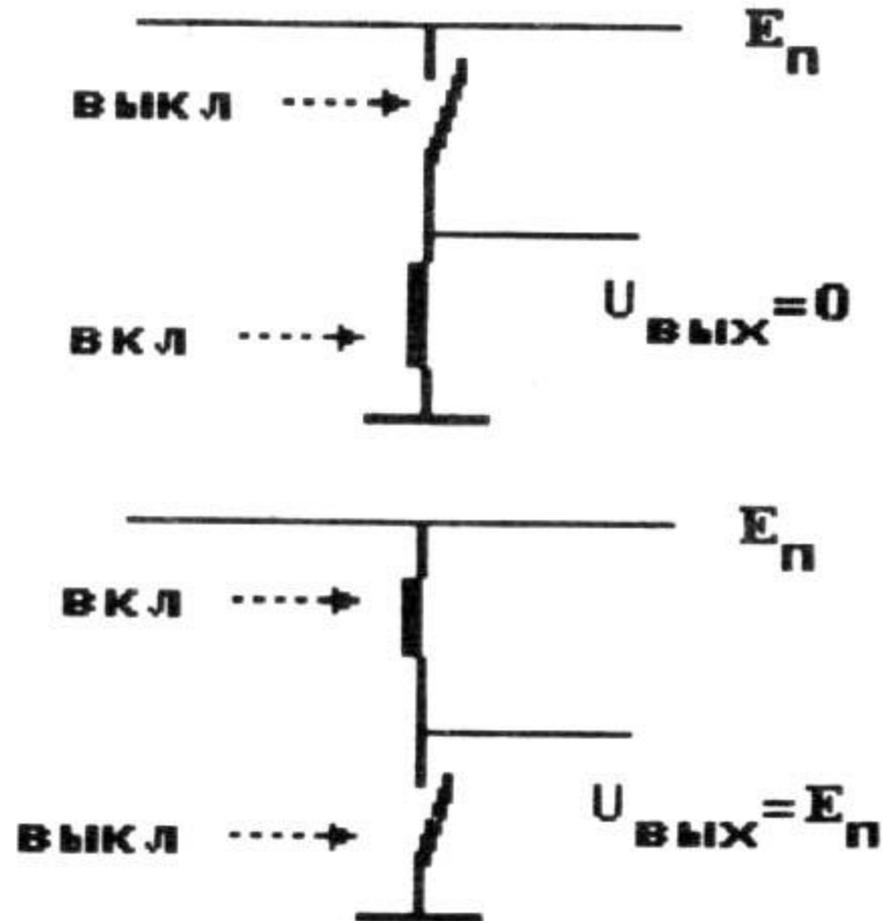
## Биполярный насыщенный ключ с динамической нагрузкой

### Цифровые ключи на полевых транзисторах

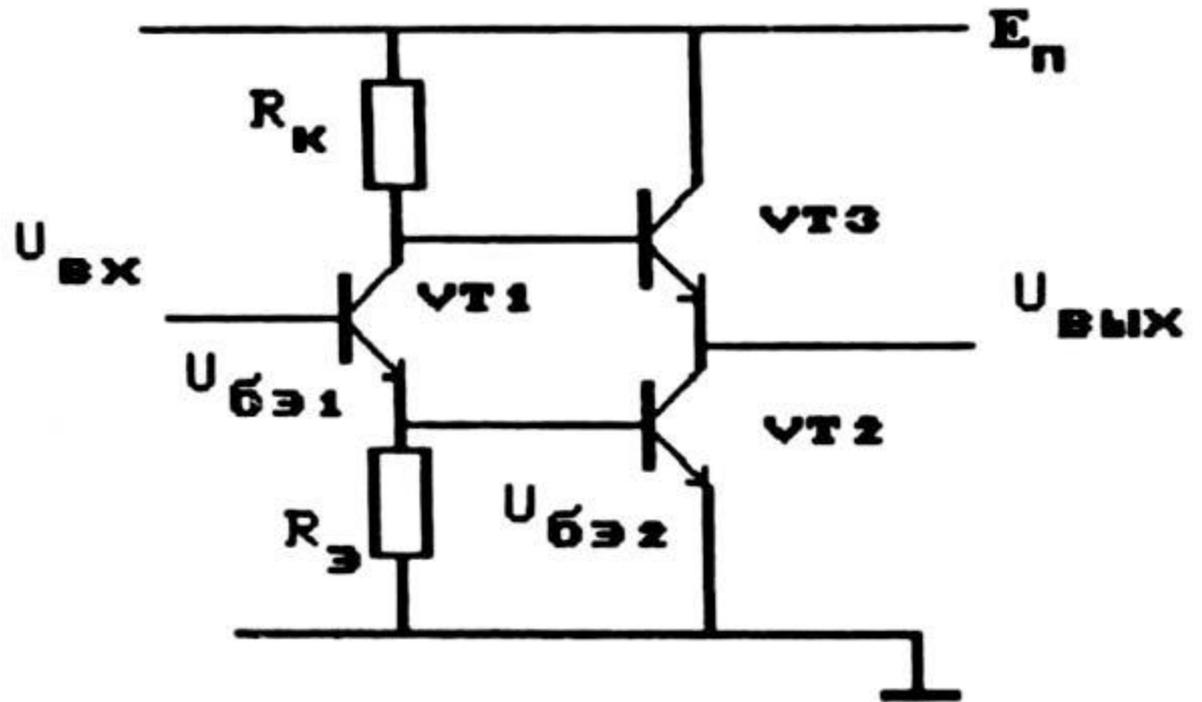
Схемотехника, принципы  
работы, параметры и  
характеристики



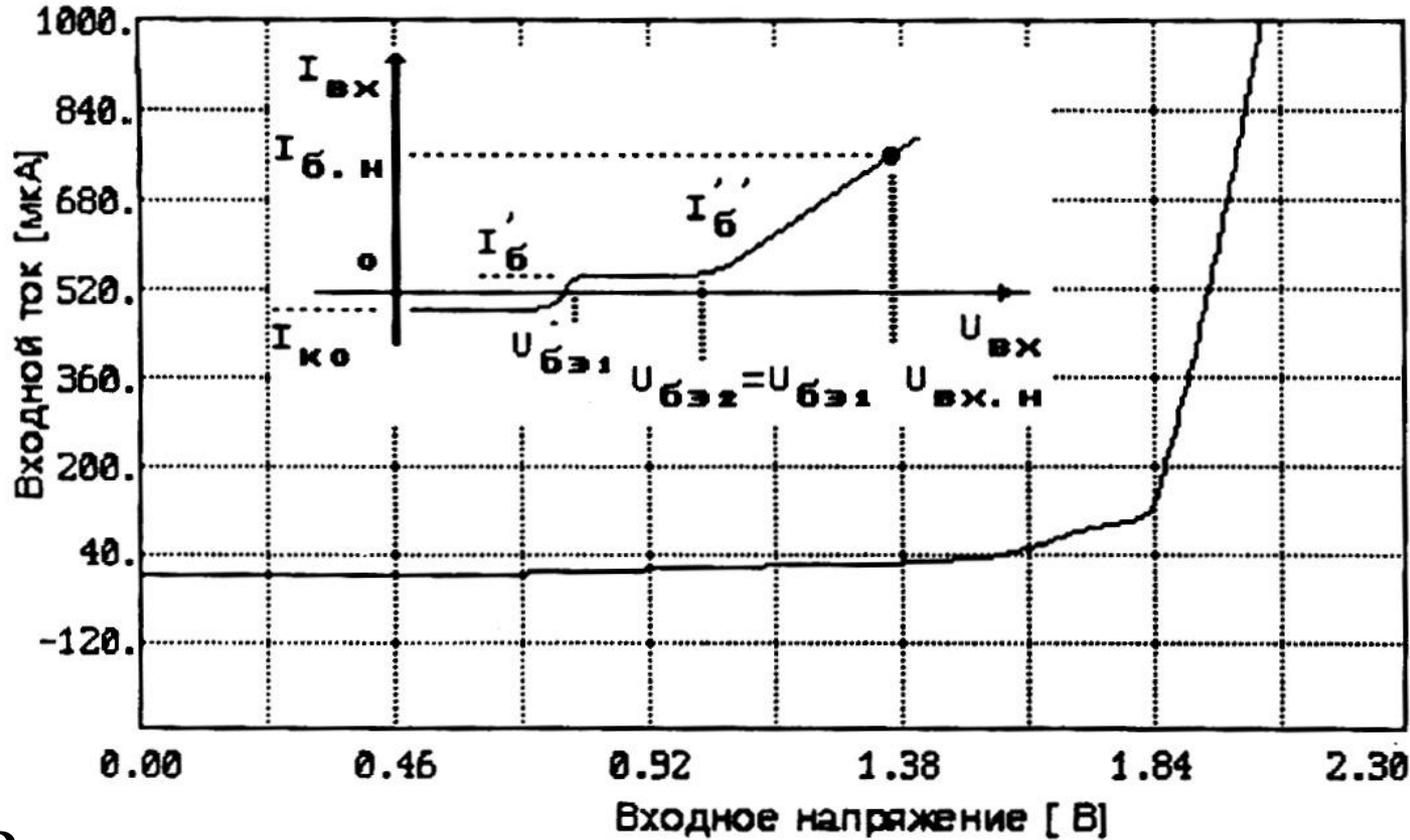
# Биполярный насыщенный ключ с динамической нагрузкой



# Схема биполярного насыщенного ключа с динамической нагрузкой



# Входная характеристика



При  
 $0 < U_{вх} < U_{бэ}$

$$I_{вх} = I_{к0}$$

$$U_{э} < U_{бэ2}$$

При

$$U_{вх} \geq U_{бэ1}$$

$$I_{б} \approx (U_{вх} - U_{э}) / \beta R_{э}$$

$$\text{При } U_{вх1} \geq U_{бэ2}$$

$$I_{б} \approx (U_{вх} - U_{бэ1} - U_{бэ2}) / r_{б2}$$



# Условия переключения транзисторов

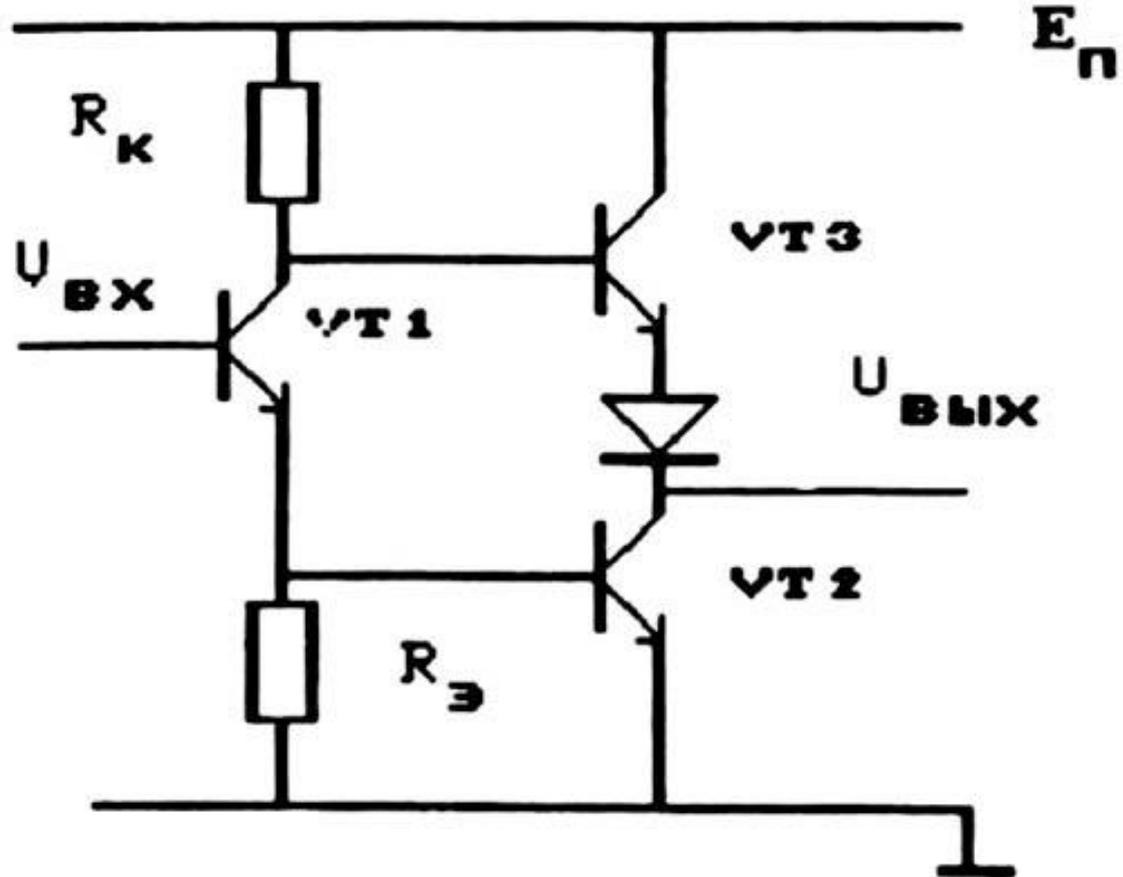
$$U_{Б2} - U_{Э2} < U_{БЭнас}$$

$$U_{Б2} = U_{БЭ2} + U_{КЭн1}$$

$$U_{Э2} = U_{КЭн2}$$



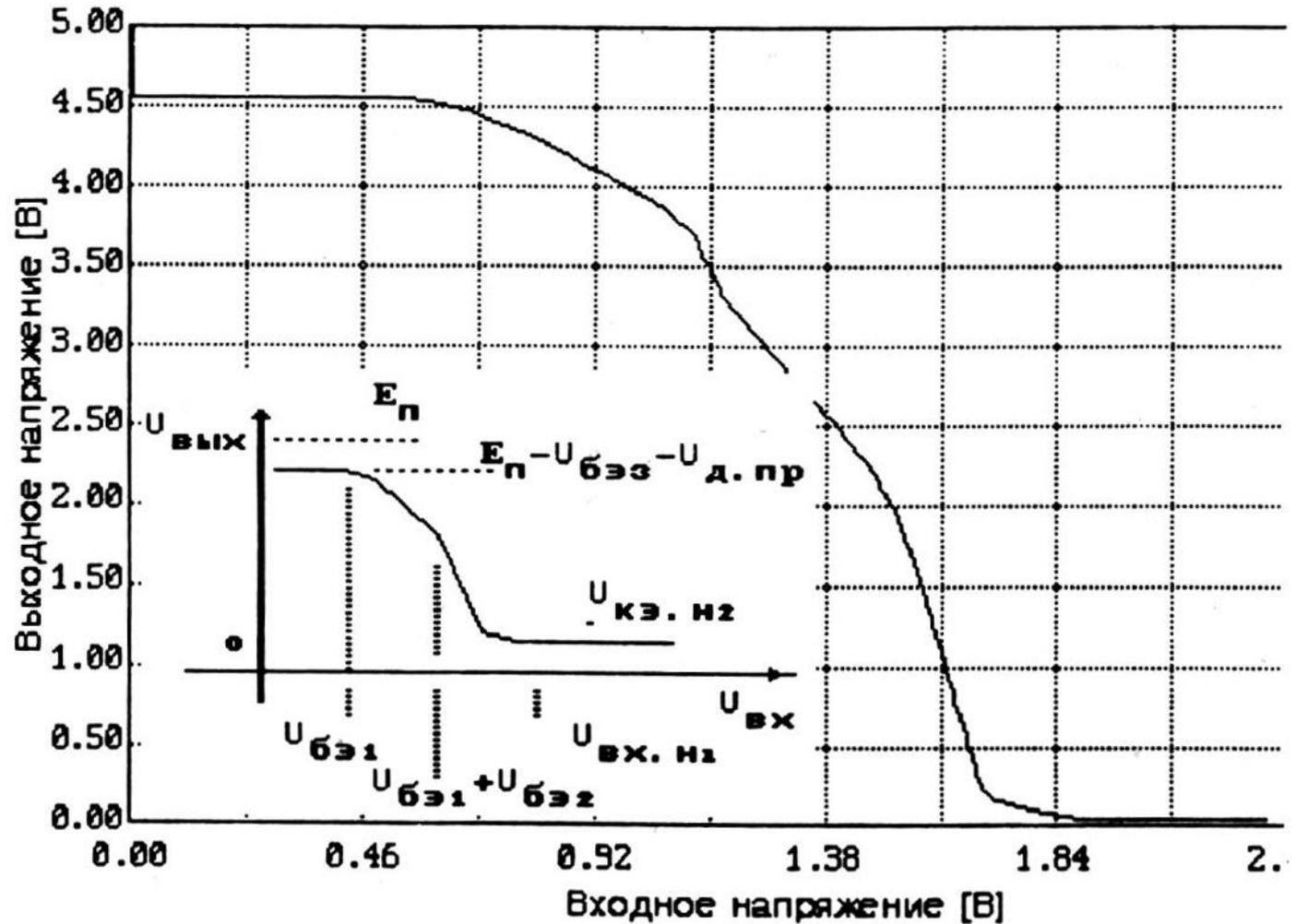
# Схема с увеличенным пороговым напряжением нагрузочного транзистора



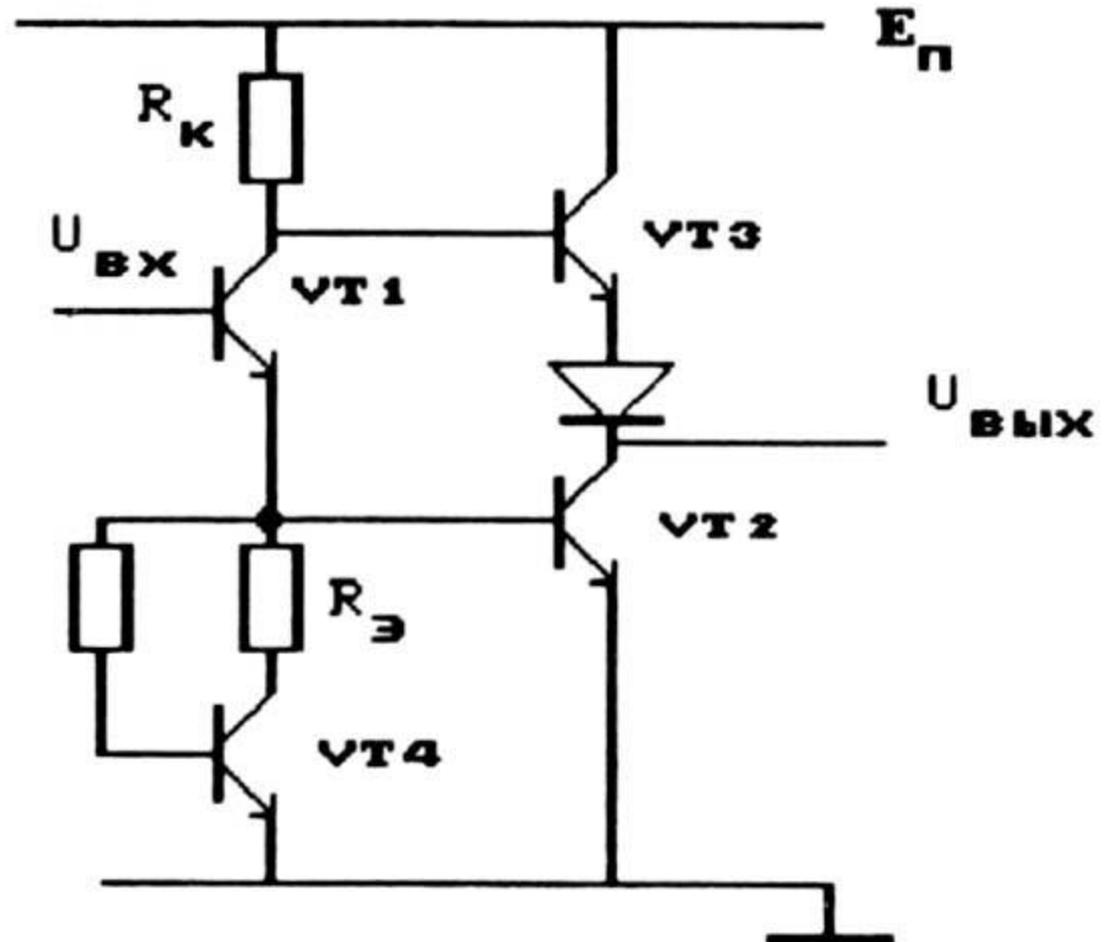
$$U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{П}} - U_{\text{БЭЗ}} - U_{\text{Дпр}}$$



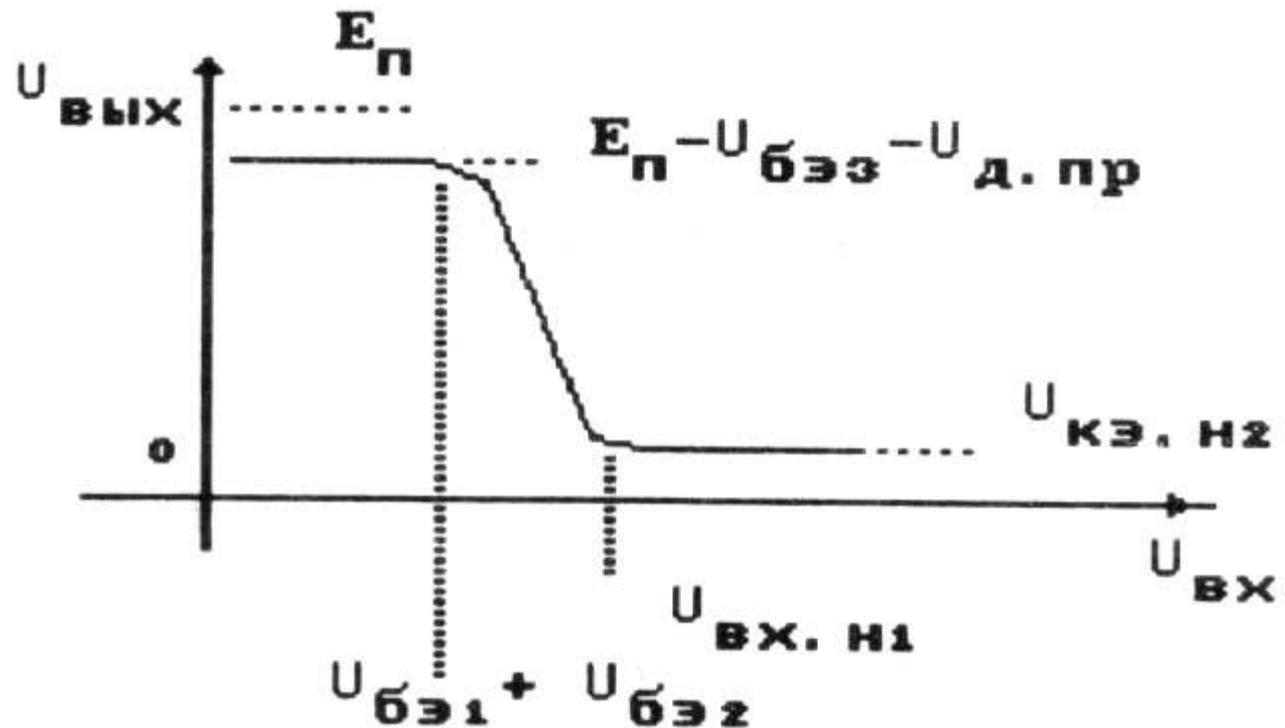
# Передаточная характеристика



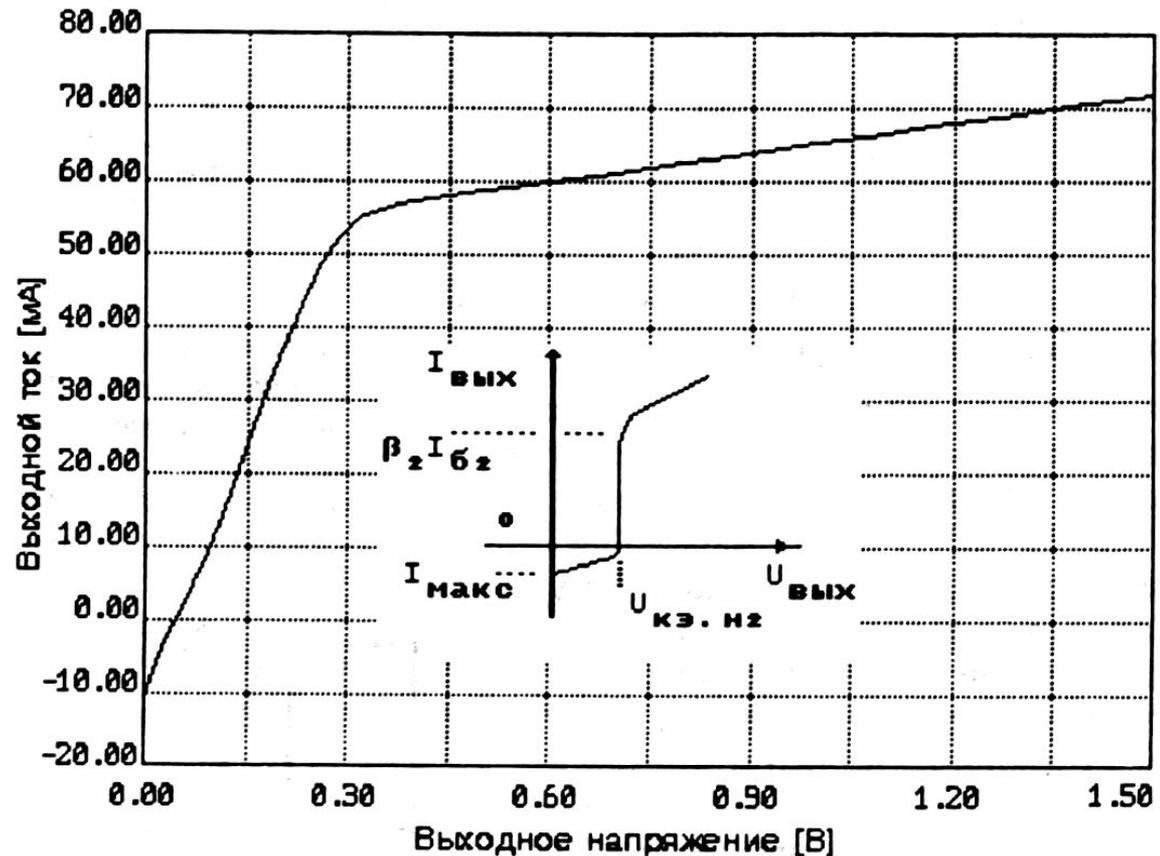
# Схема, исключающая работу транзистора-фазорасщепителя в линейной области



# Передаточная характеристика ключа без линейного участка в интервале 0.7 – 1.4 В

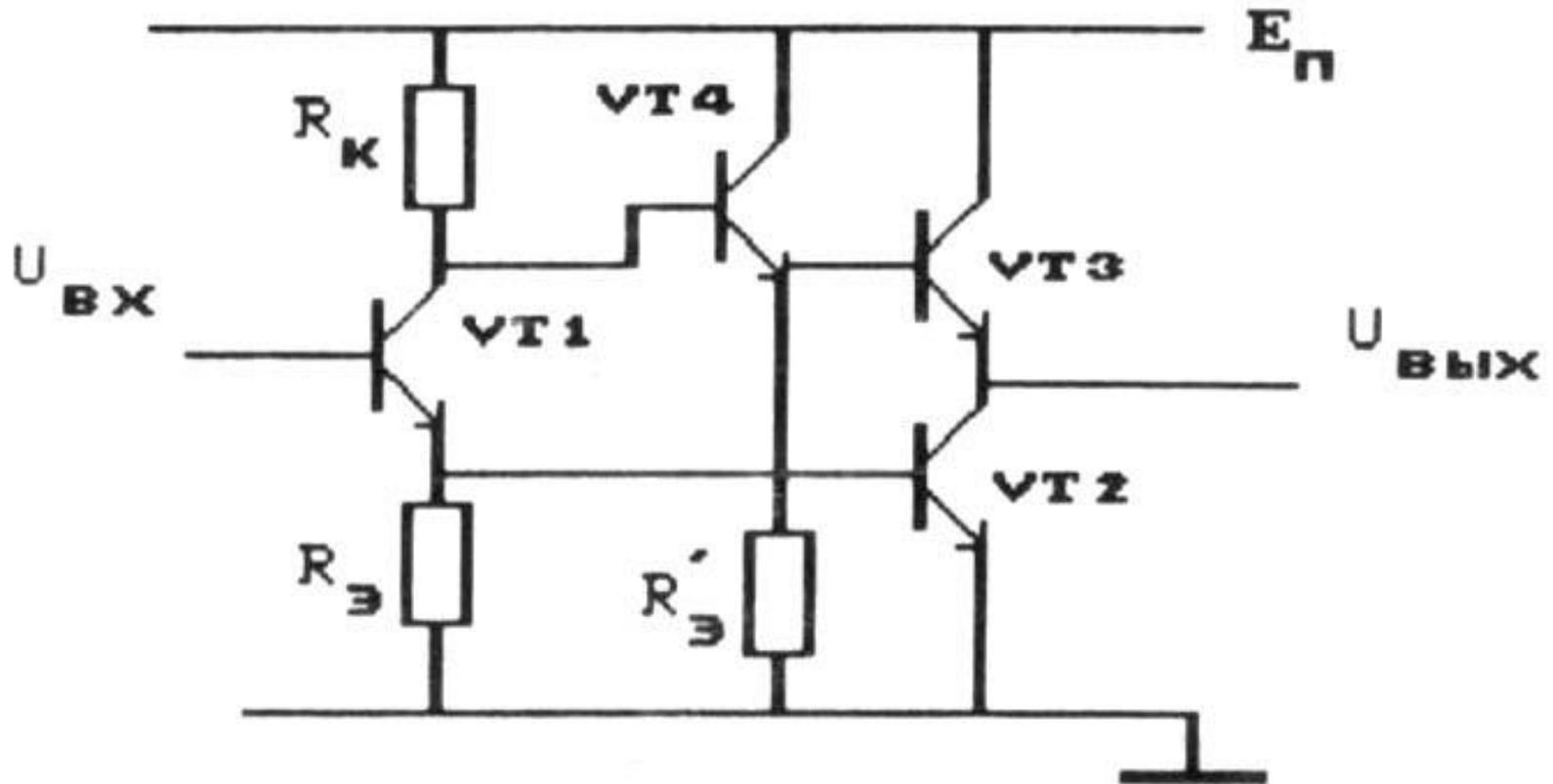


# Выходная характеристика (формирование низкого уровня выходного напряжения)

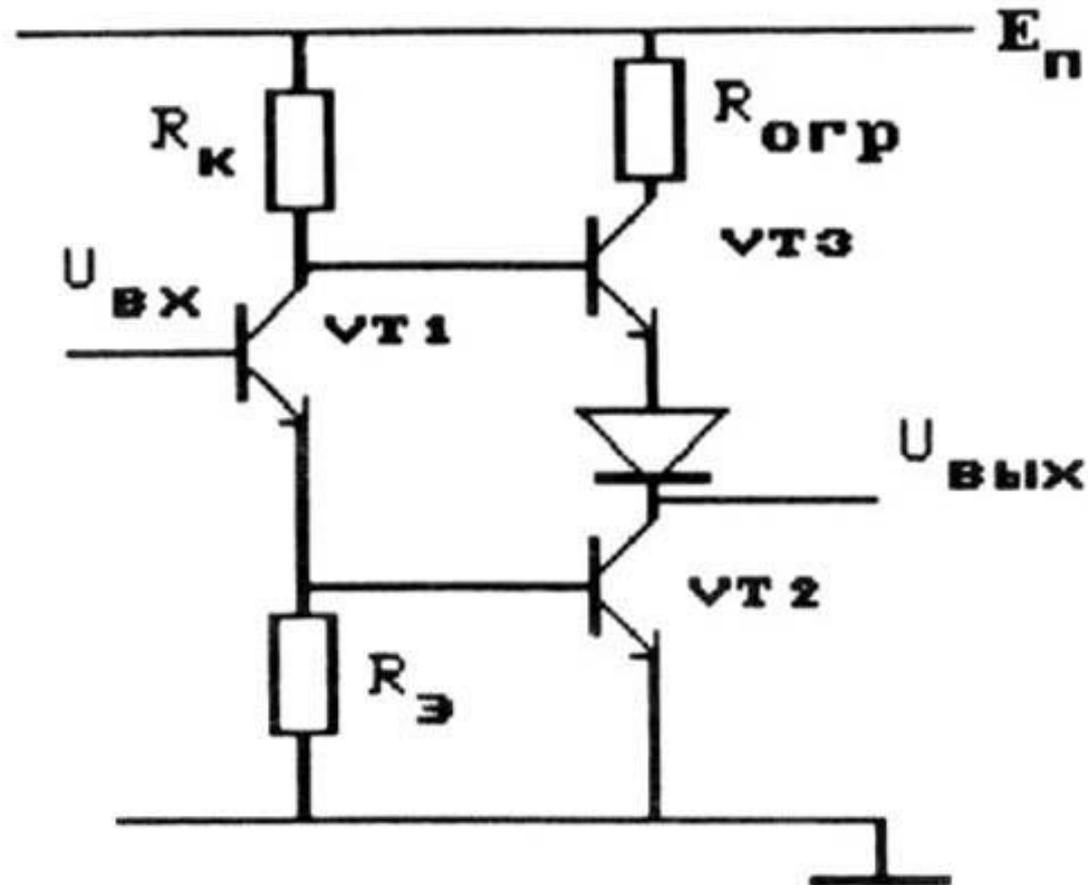
 $U_{\text{ВЫХ}}=0$ 


$$I_{\text{Б2}} = (E_{\text{П}} - U_{\text{КЭН1}} - U_{\text{КЭН2}}) / R_{\text{К}} - U_{\text{БЭ2}} / R_{\text{Э}}$$

## Ключ с повышенной нагрузочной способностью

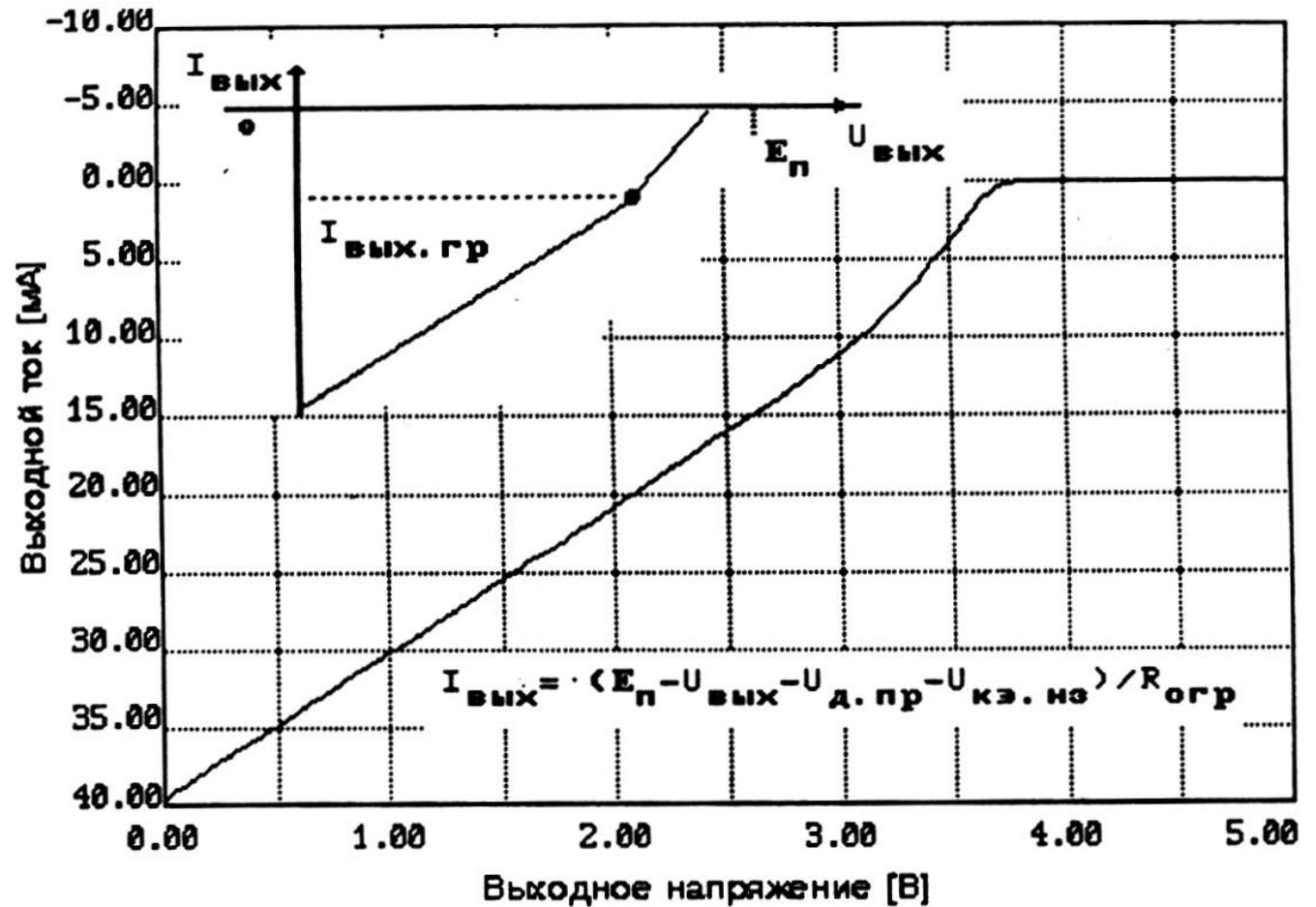


# Схема с резистором защиты от короткого замыкания



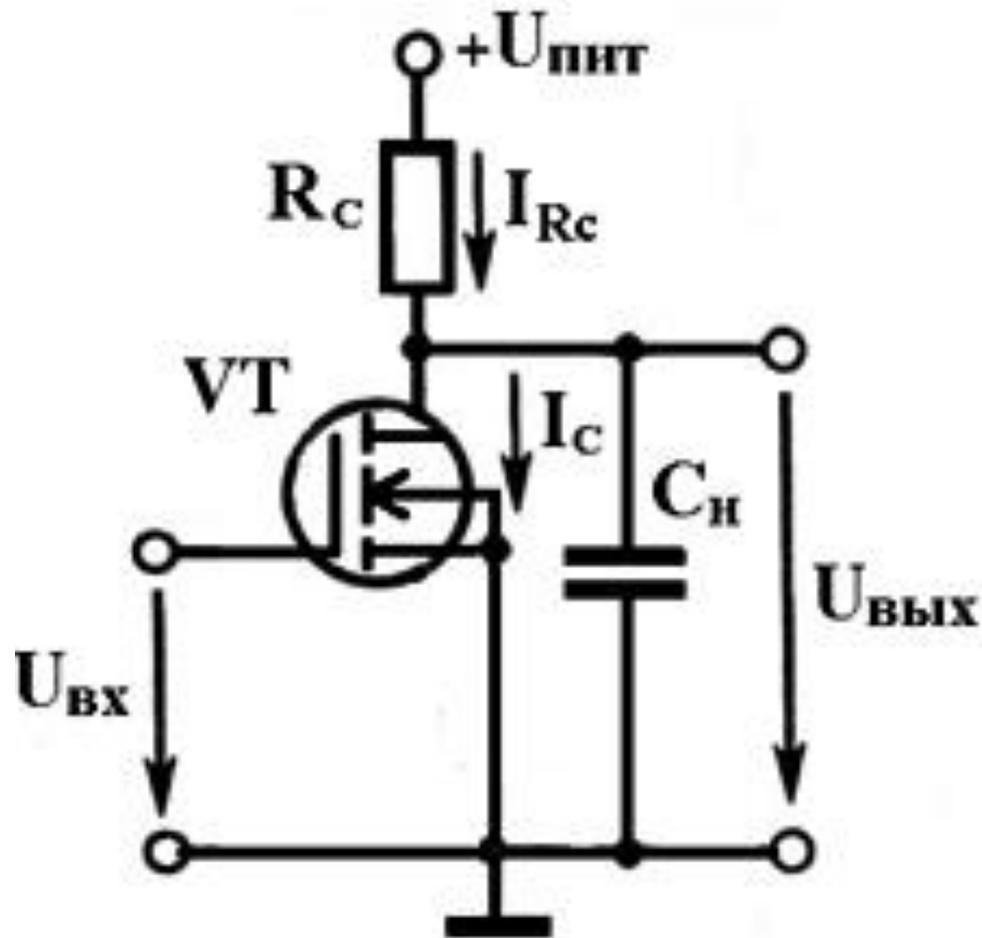
# Выходная характеристика

(формирование высокого уровня выходного напряжения)

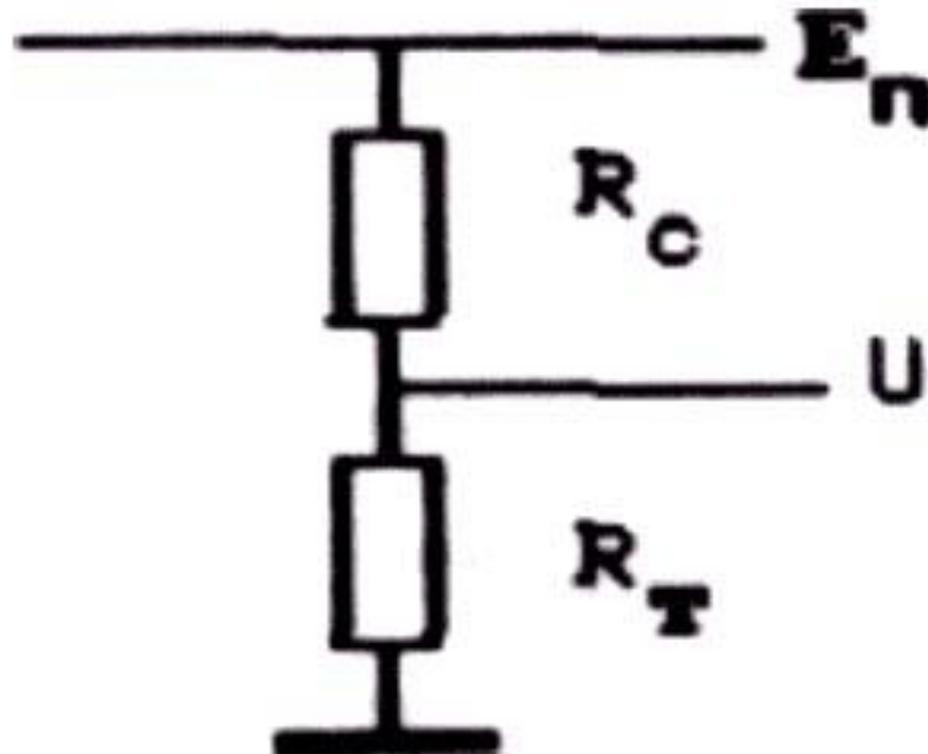


# КЛЮЧИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

## Ключ с линейной нагрузкой



# Эквивалентная схема ключа на МДП-транзисторе



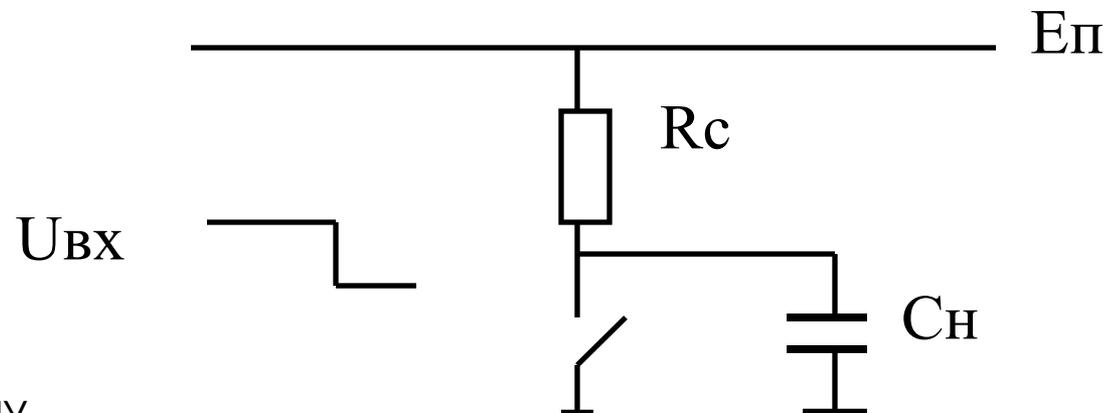
## Включение (нарастание выходного напряжения)

$$I_3 = (E_{\Pi} - U_{\text{ВЫХ}}) / R_c$$

$$t^{0.1} = R_c C_{\text{Н}} \cdot \ln \frac{E_{\Pi} - U_1}{E_{\Pi} - U_2}$$

$$U_1 = U^0 + 0.1(E_{\Pi} - U^0)$$

$$U_2 = E_{\Pi} - 0.1(E_{\Pi} - U^0)$$

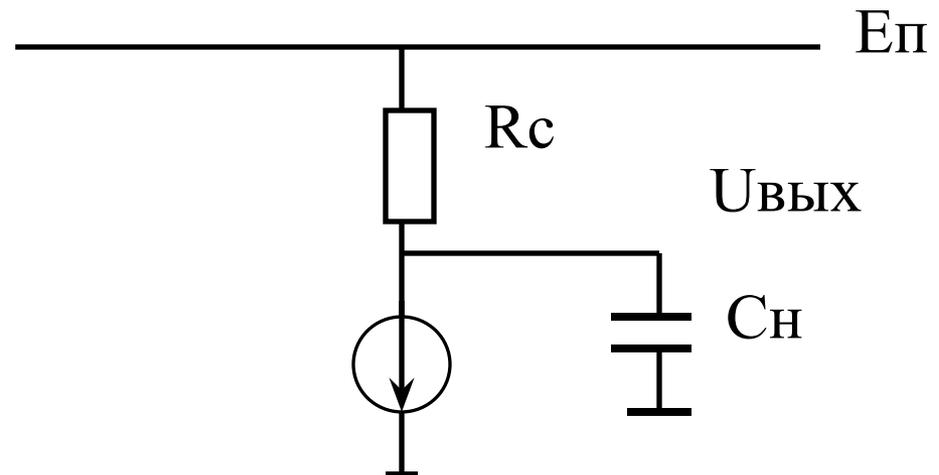


## Выключение (спад выходного напряжения)

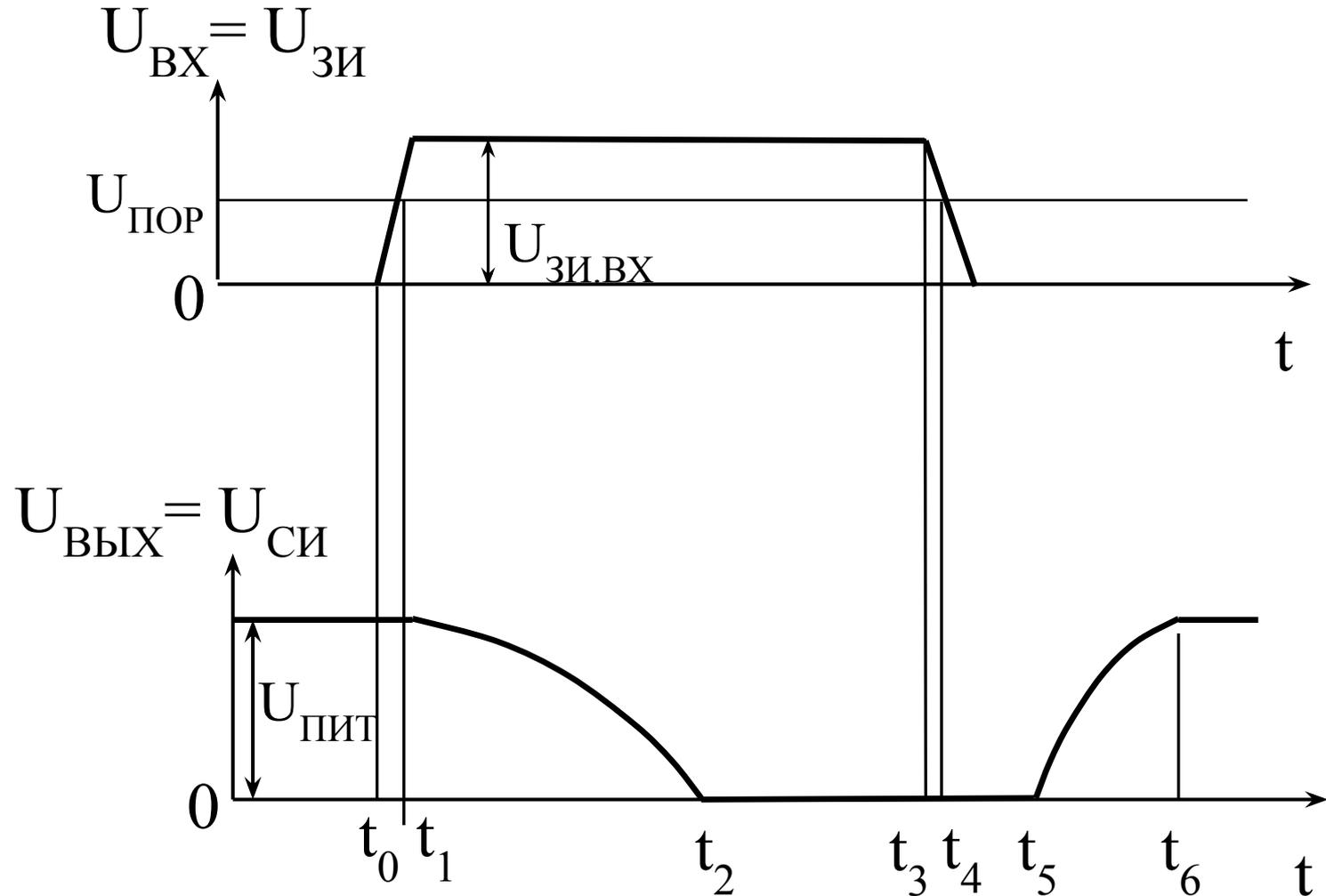
$$t^{1,0} = t_{\text{разр}} = t_1 + t_2 \quad I_p = 0.5 S_0 (E_{\text{п}} - U_0)^2$$

$$t_1 = \frac{2U_0 C_{\text{н}}}{S_0 (E_{\text{п}} - U_0)^2}$$

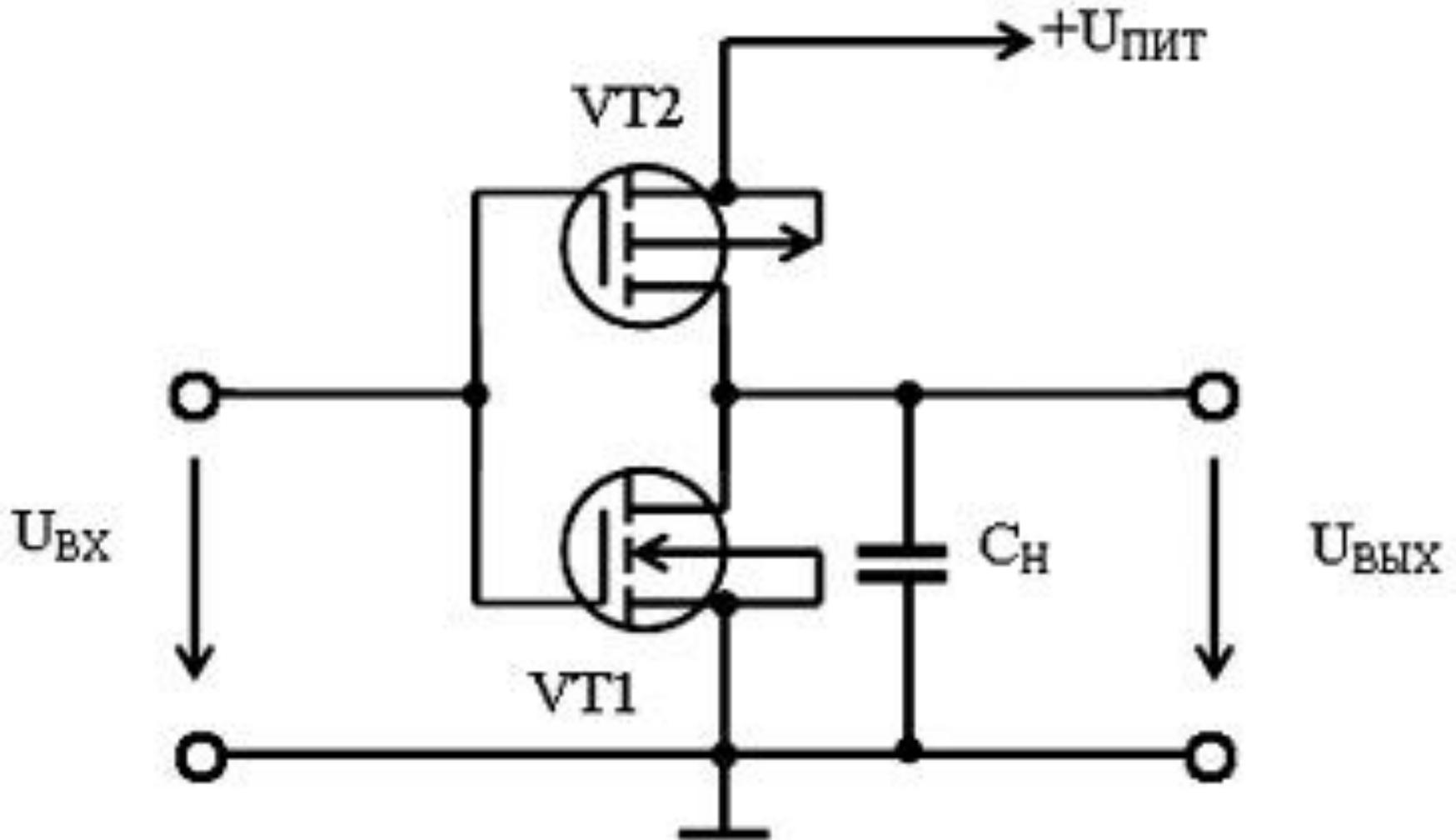
$$t_2 = -\frac{C_{\text{н}}}{S_0 (U_2 - U_0)} \cdot \ln \left( \frac{2(U_2 - U_1)}{U_1} - 1 \right)$$



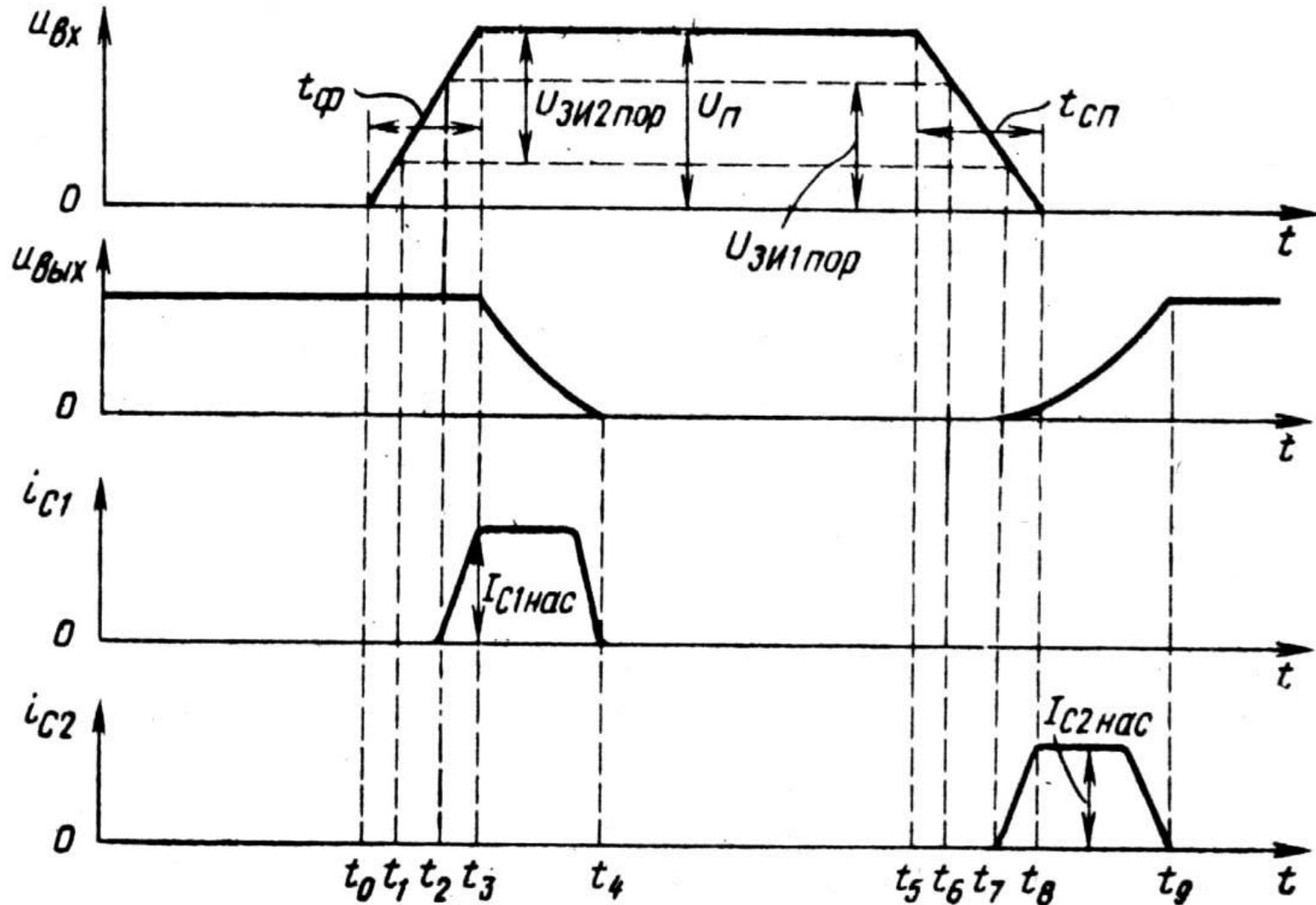
# Переходные процессы ключа на МДП-транзисторе с индуцированным каналом



# КМОП-ключ



# Временные диаграммы КМОП-ключа



## Работа КМОП-ключа

$$U_{\text{ПИТ}} < |U|_{\text{ЗИпор1}} + |U|_{\text{ЗИпор2}}$$

$$t = t_0 \quad U_{\text{ВХ}} = 0$$

$$|U|_{\text{ЗИ2}} = |U_{\text{ПИТ}}| > |U|_{\text{ЗИпор2}} \quad I_{\text{С2}} = 0$$

$$U_{\text{ЗИ1}} = 0 < U_{\text{ЗИпор1}}$$

$$t = t_0 \quad t_{\Phi}$$

$$t = t_1 \quad |U|_{\text{ЗИ2}} = |U|_{\text{ЗИпор2}} \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПИТ}}$$

$$t_1 - t_2 \quad |U|_{\text{ЗИ2}} < |U|_{\text{ЗИпор2}} \quad U_{\text{ЗИ1}} < U_{\text{ЗИпор1}}$$

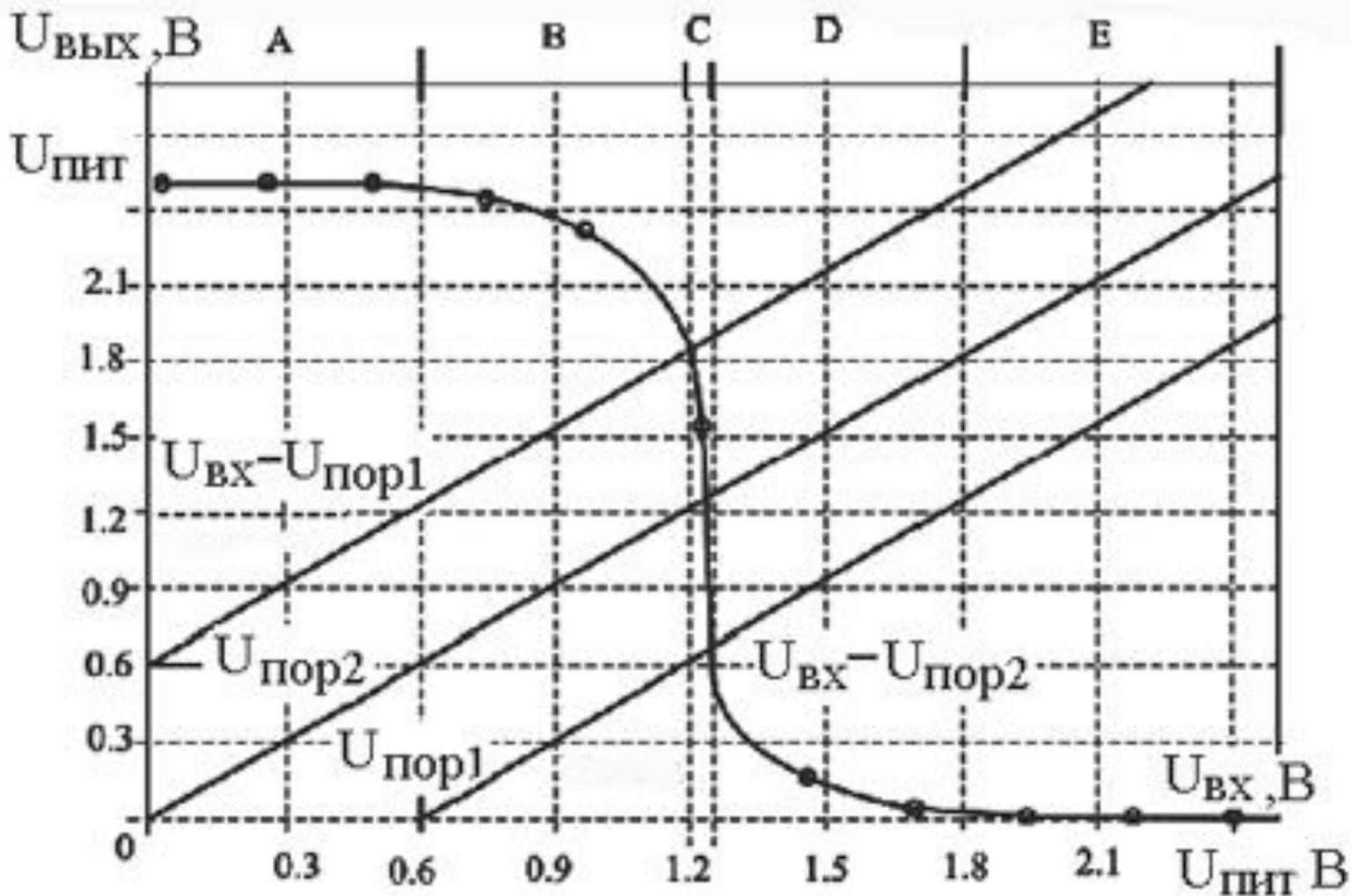
$$t = t_2 \quad U_{\text{ЗИ1}} = U_{\text{ЗИпор1}}$$

$$t_0 - t_4$$

$$t_4 \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СИ1}} = 0 \quad I_{\text{С1}} = 0$$



# Передаточная характеристика КМОП-ключа



$$U_{ПИТ} = |U_{ЗИпор1}| + |U_{ЗИпор2}|$$

область А  $U_{ВХ} < U_{ЗИпор2}$

область В  $U_{ЗИпор2} < U_{ВХ} < U_{ПИТ}/2$

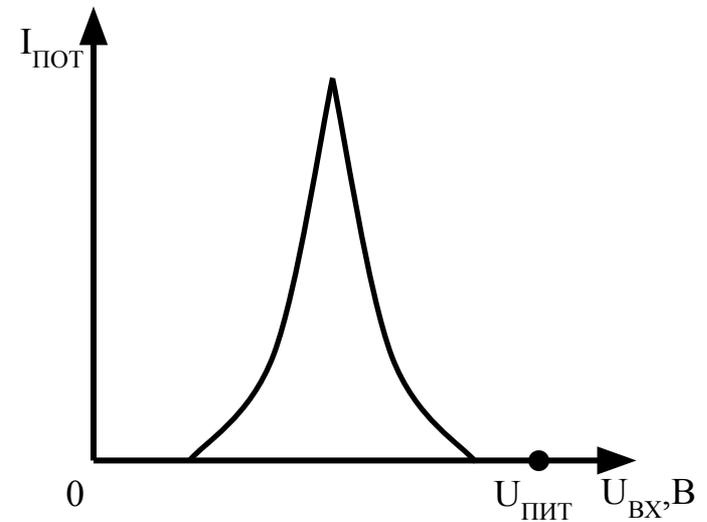
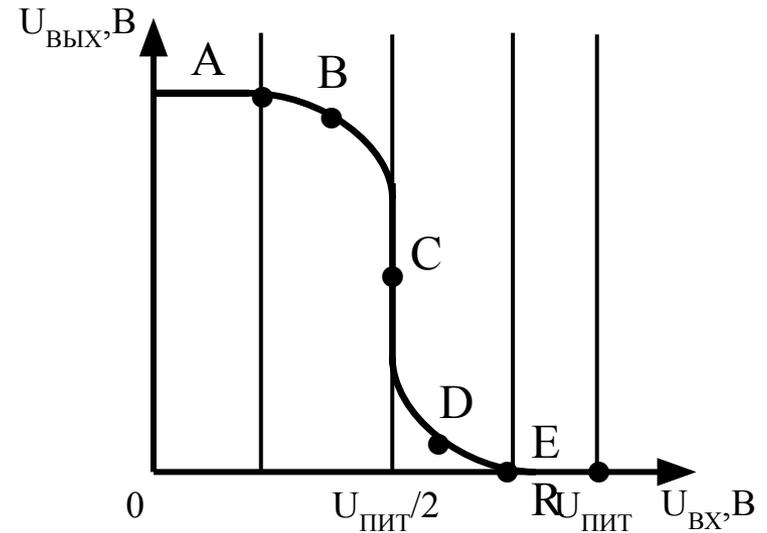
область С

область D:

$$U_{ПИТ}/2 < U_{ВХ} < U_{ПИТ} - U_{ЗИпор2}$$

область Е

$$U_{ВХ} > U_{ПИТ} - U_{ЗИпор2}$$



## Динамика МДП ключей

$$t_{\text{ВКЛ}} = t_{\text{К}}^{+} + t_{\text{П}}^{+} \quad t_{\text{ВЫКЛ}} = t_{\text{К}}^{-} + t_{\text{П}}^{-}$$

$$t_{\text{К}}^{+} = \frac{C_{\text{Н}}}{S_0} \cdot \frac{0.9E_{\text{П}} + U_0}{(E_{\text{П}} - U_0)^2}$$

$$t_{\text{К}}^{-} = \frac{C_{\text{Н}}}{S_0} \cdot \frac{U_0 - 0.1E_{\text{П}}}{(E_{\text{П}} - U_0)^2}$$



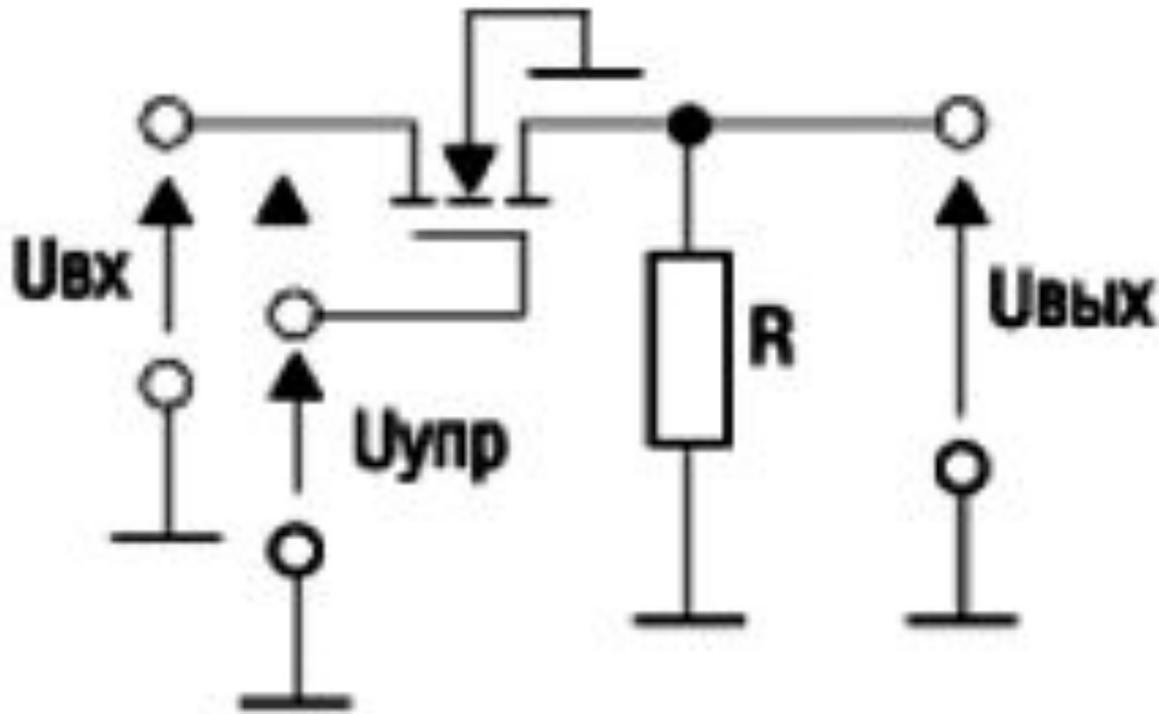
## Динамика МДП ключей

$$t_{\Pi}^{+} = \frac{C_{\text{н}}}{2S_0(E_{\Pi} - U_0)} \cdot \ln \frac{1.9E_{\Pi} - 2U_0}{0.3E_{\Pi}}$$

$$t_{\Pi}^{-} = \frac{C_{\text{н}}}{2S_0(E_{\Pi} - U_0)} \cdot \ln \frac{1.9E_{\Pi} - 2U_0}{0.1E_{\Pi}}$$



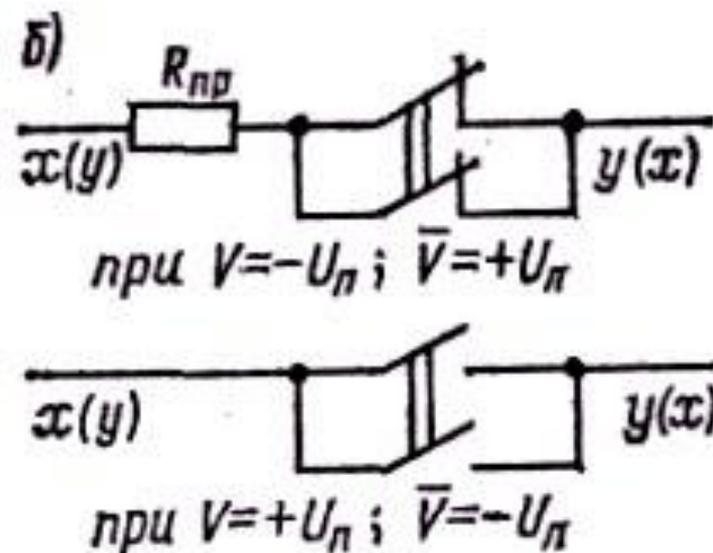
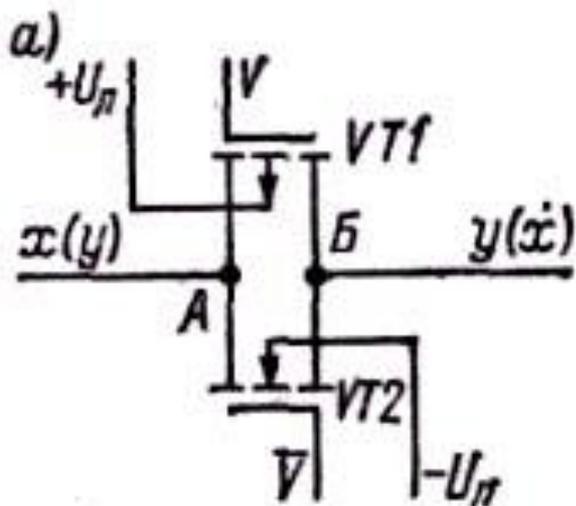
# Последовательный аналоговый ключ



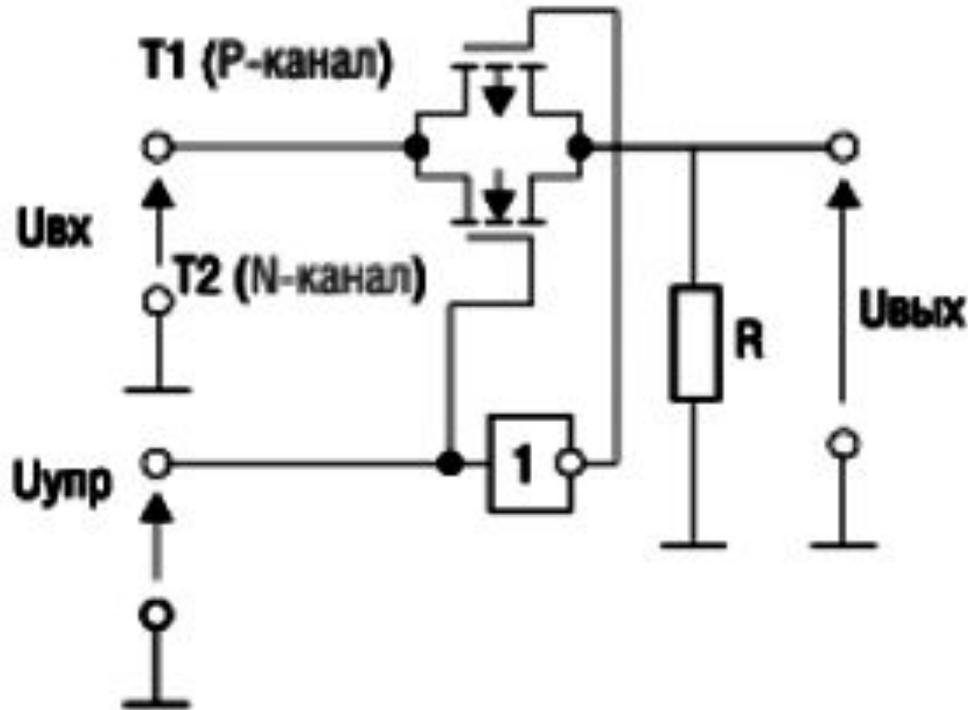
## Двунаправленный ключ на КМОП-транзисторах:

а – электрическая схема

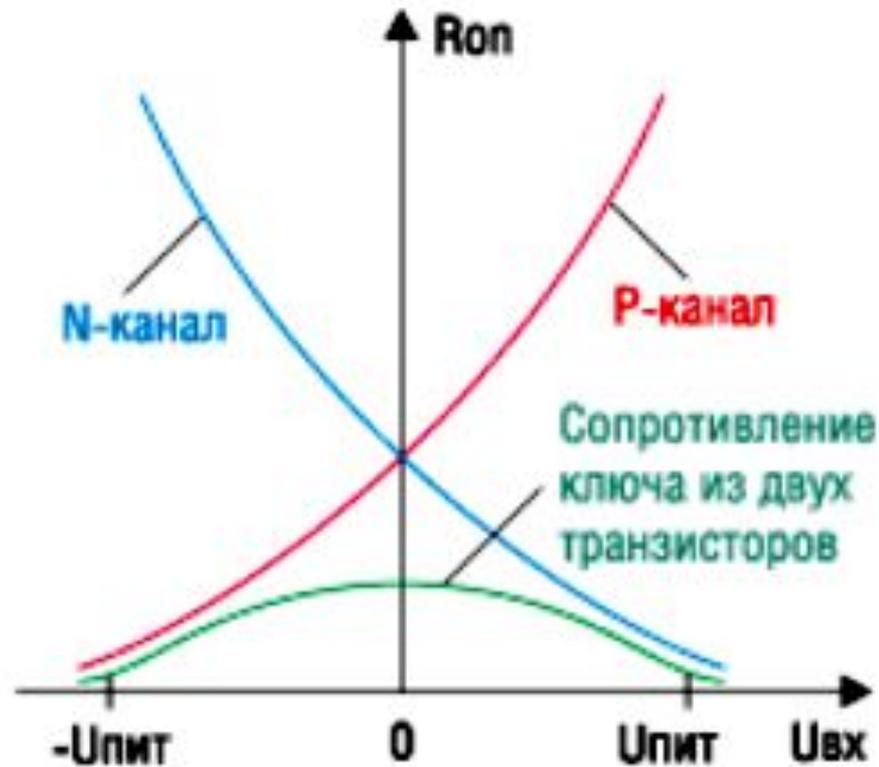
б – эквивалентная схема



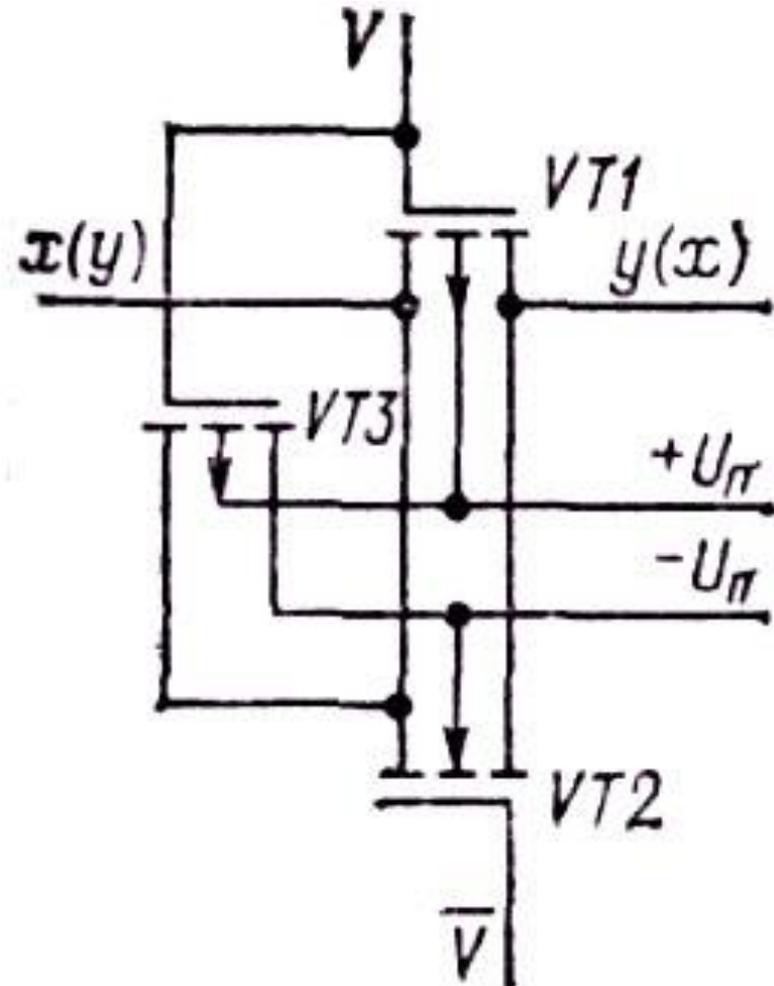
## Двунаправленный ключ на КМОП-транзисторах

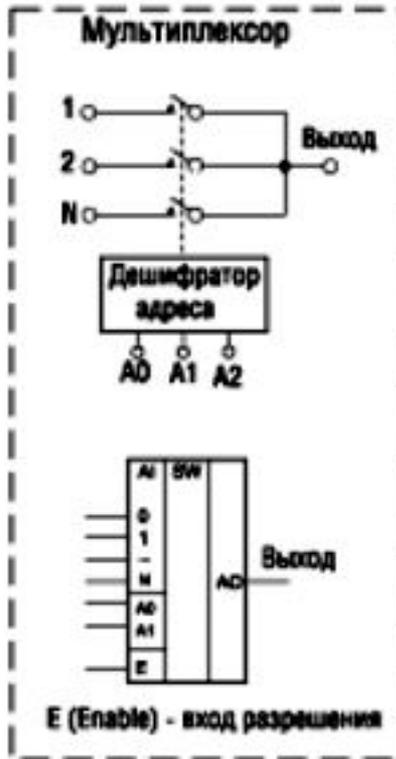


## Двунаправленный ключ на КМОП-транзисторах

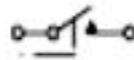


## Схема с дополнительным транзистором управления

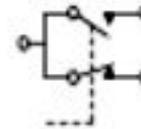




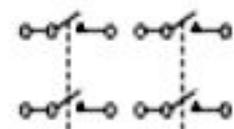
1 канал SPST



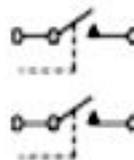
1 канал SPDT



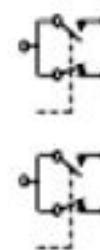
2 канала DPST



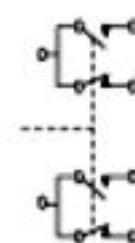
2 канала SPST



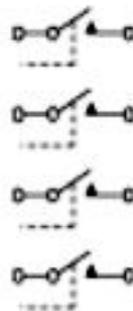
2 канала SPDT



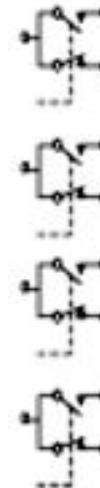
2 канала DPDT



4 канала SPST



4 канала SPDT



SPST - Single Pole, Single Throw (Одно поле [канал], один ключ)

SPDT - Single Pole, Double Throw (Одно поле [канал], два ключа)

DPST - Double Pole, Single Throw (Два поля [канала], один ключ)

DPDT - Double Pole, Double Throw (Два поля [канала], два ключа)



**Лектор должен предоставить аудитории полное  
основание верить, что все его усилия были  
направлены на то, чтобы дать им удовольствие и  
наставления**

**Майкл Фарадей**

