



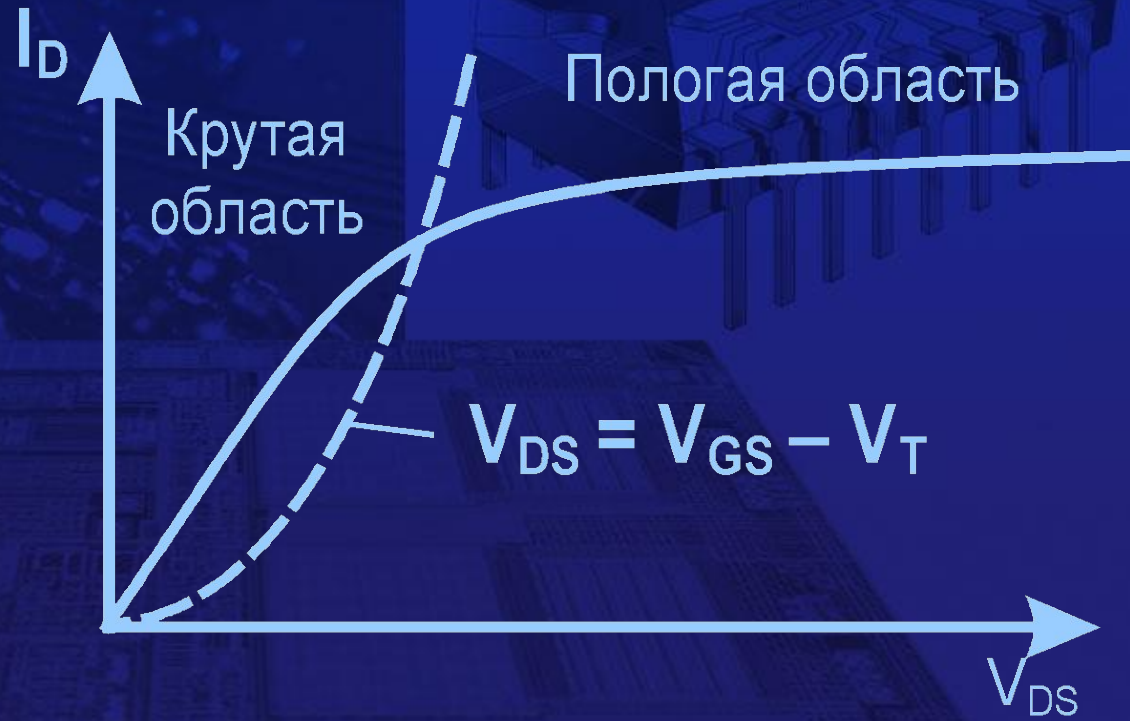
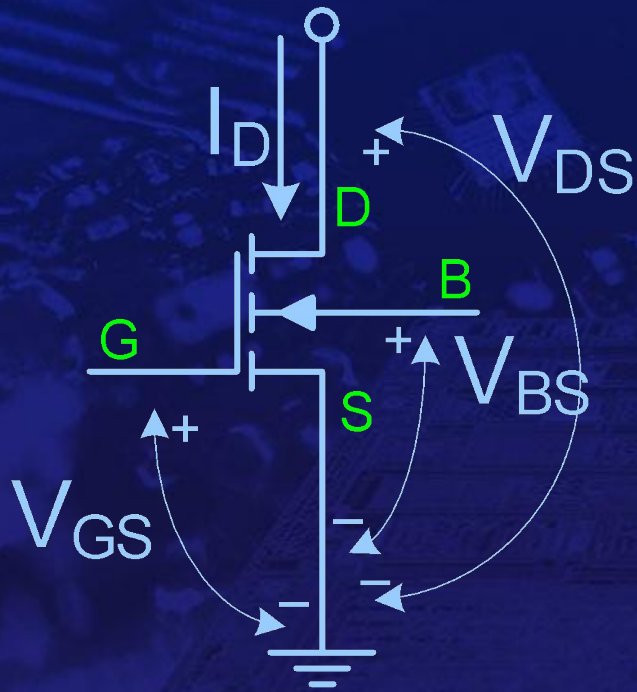
# Лекция 12

*Статические и динамические  
характеристики цифровых  
КМДП-схем*

# Цели и задачи

- Изучение функционирования цифровых КМДП-схем на примере КМДП-инвертора.
- Изучение статических и динамических характеристик. Передаточная характеристика КМДП-инвертора.
- Паразитный эффект тиристорной защелки в КМДП-структурах.
- Логика на проходных транзисторах.

# МДП-транзистор и его ВАХ



Крутая область  $I_D = \frac{k}{2} [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2], V_{GS} \geq V_T, V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

Пологая область  $I_D = \frac{k}{2} [V_{GS} - V_T]^2, V_{GS} \geq V_T, V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

$k_p = \beta_p = \mu_p C_{OX} \left( \frac{W}{L} \right)$  – Коэффициент усиления

# Статические параметры цифровых схем

- Напряжение питания:  $V_{dd}$ , В
- Уровень логических «0» и «1»:  $V_1$  и  $V_0$ , В
- Логический размах сигнала:  $\Delta V_{л} = V_1 - V_0$ , В
- Статическая потребляемая мощность,

$$P_{\text{стат}} = V_{dd}^2/R, \text{ Вт}$$

- Коэффициент разветвления по выходу:  $F_o$
- Коэффициент объединения по входу:  $F_i$
- Величины входных и выходных токов:

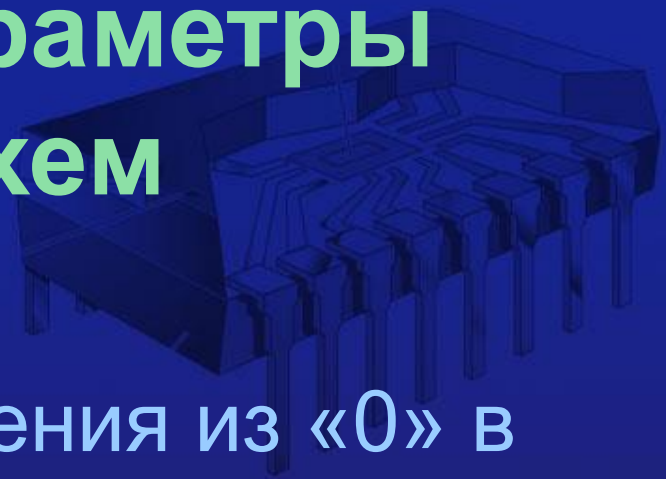
$$I_{\text{вх}} \text{ и } I_{\text{вых}}, \text{ А}$$

- Температурный диапазон:  $T$ , °С

# Динамические параметры цифровых схем

- Тактовая частота:  $f$ , Гц
- Время задержки переключения из «0» в «1»:  $t_{зд}^{01}$ , с
- Время задержки переключения из «1» в «0»:  $t_{зд}^{10}$ , с
- Среднее время задержки переключения:  
 $t_{зд.ср} = (t_{зд}^{01} + t_{зд}^{10})/2$ , с
- Динамическая потребляемая мощность:

$$P_{дин} = C_n (\Delta V_{л})^2 f, \text{ Вт}$$



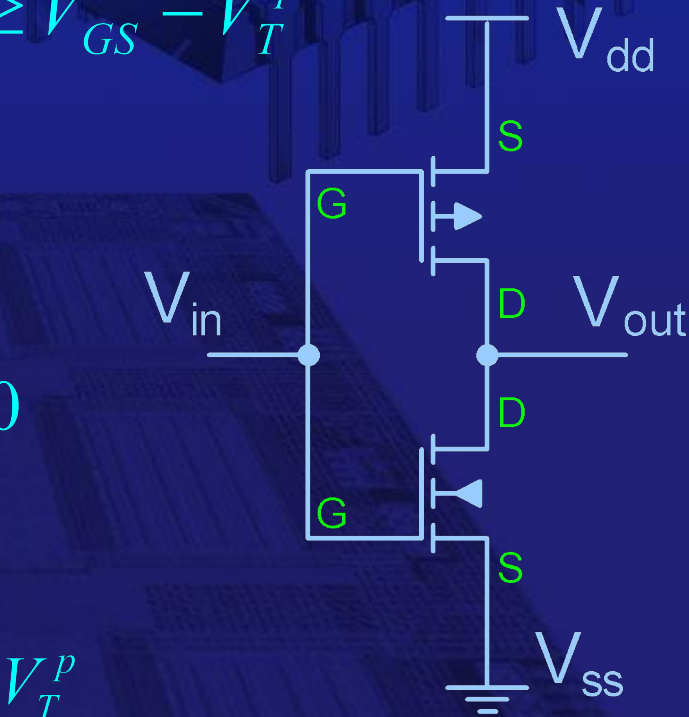
# Ток стока для р-транзистора в инверторе

$$I_D^P = \begin{cases} \frac{\beta_p}{2} \left[ 2(V_{GS} - V_T^P) - V_{DS} \right] V_{DS}, & V_{DS} \geq V_{GS} - V_T^P \\ \frac{\beta_p}{2} \left[ V_{GS} - V_T^P \right]^2, & V_{DS} < V_{GS} - V_T^P \end{cases}$$

$$V_{B\Delta X} = V_{DD} - V \leq 0, \quad V_{GS} = V_{DD} - V \leq 0$$

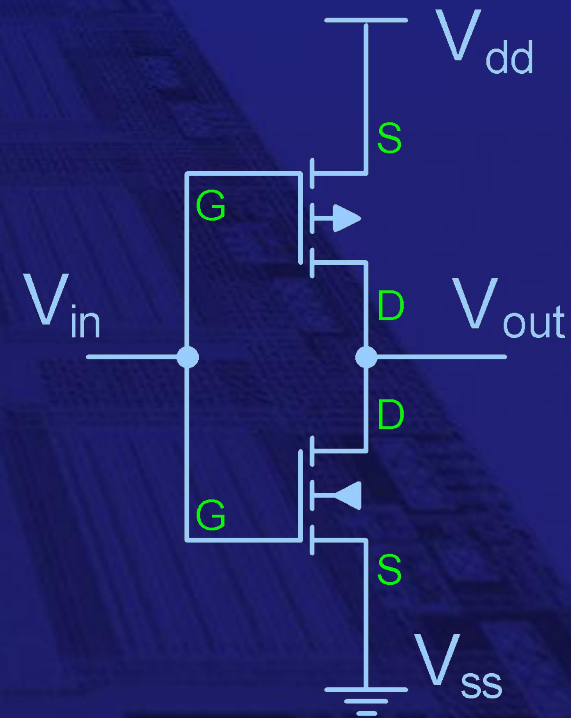
$$I_D^P = \begin{cases} \frac{\beta_p}{2} \left( V_{BX} - V_{DD} - V_T^P \right)^2, & V_{B\Delta X} < V_{BX} - V_T^P \\ \frac{\beta_p}{2} \left[ 2 \left( V_{BX} - V_{DD} - V_T^P \right) - \left( V_{B\Delta X} - V_{DD} \right) \right] \left( V_{B\Delta X} - V_{DD} \right), & \end{cases}$$

$$V_{B\Delta X} \geq V_{BX} - V_T^P$$

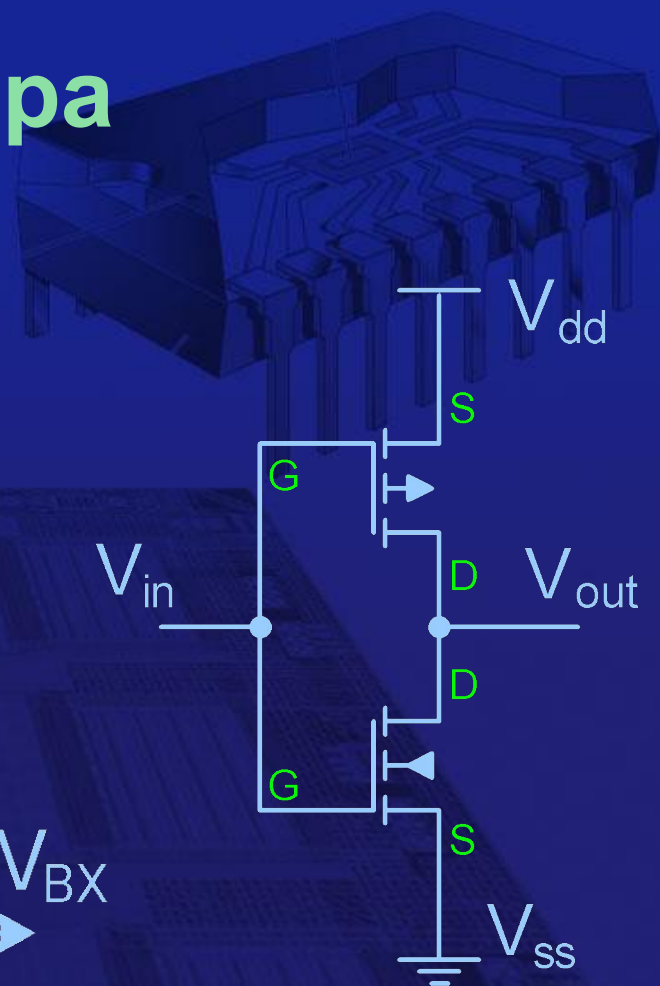
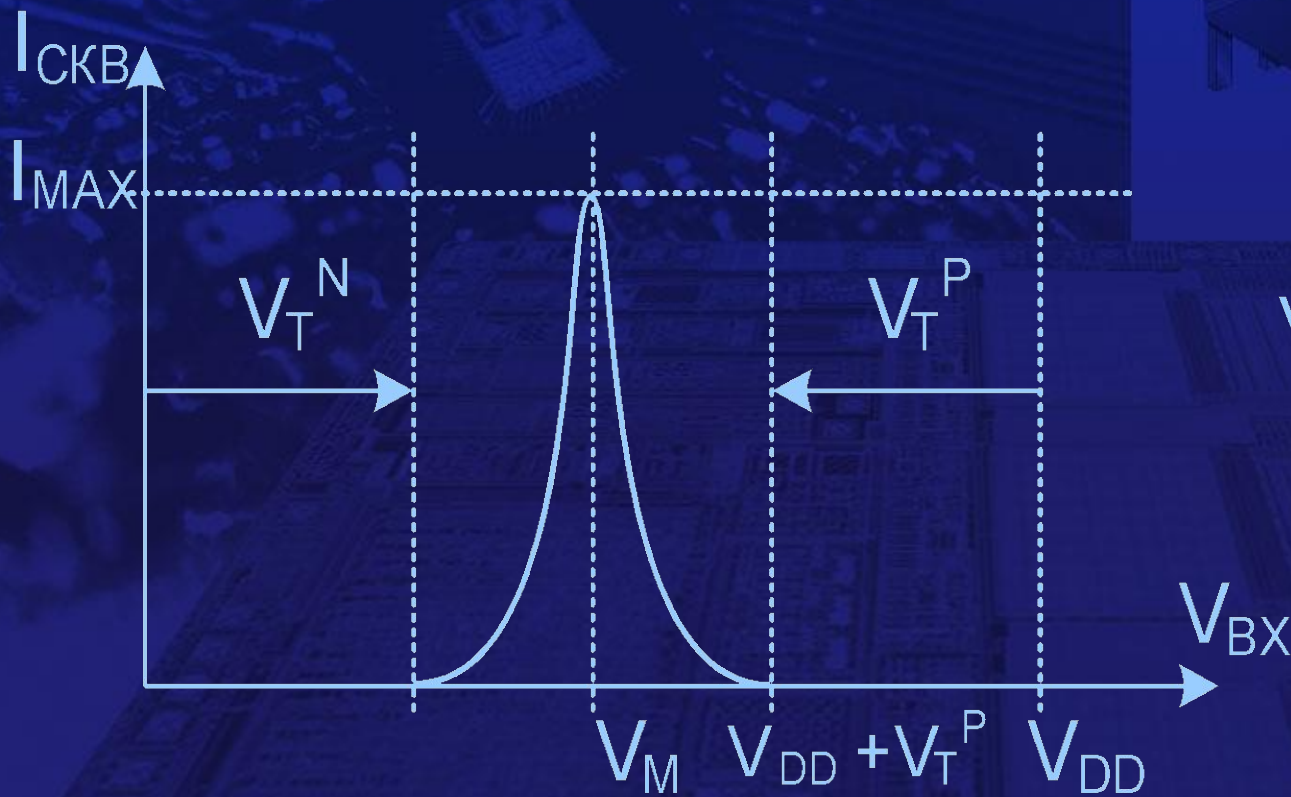


# Ток стока для n-транзистора в инверторе

$$I_D^N = \begin{cases} \frac{\beta_N}{2} \left[ 2(V_{BX} - V_T^N) - V_{BЫX} \right] V_{BЫX}, & V_{BЫX} \leq V_{BX} - V_T^N \\ \frac{\beta_N}{2} (V_{BX} - V_T^N)^2, & V_{BЫX} \geq V_{BX} - V_T^N \end{cases}$$

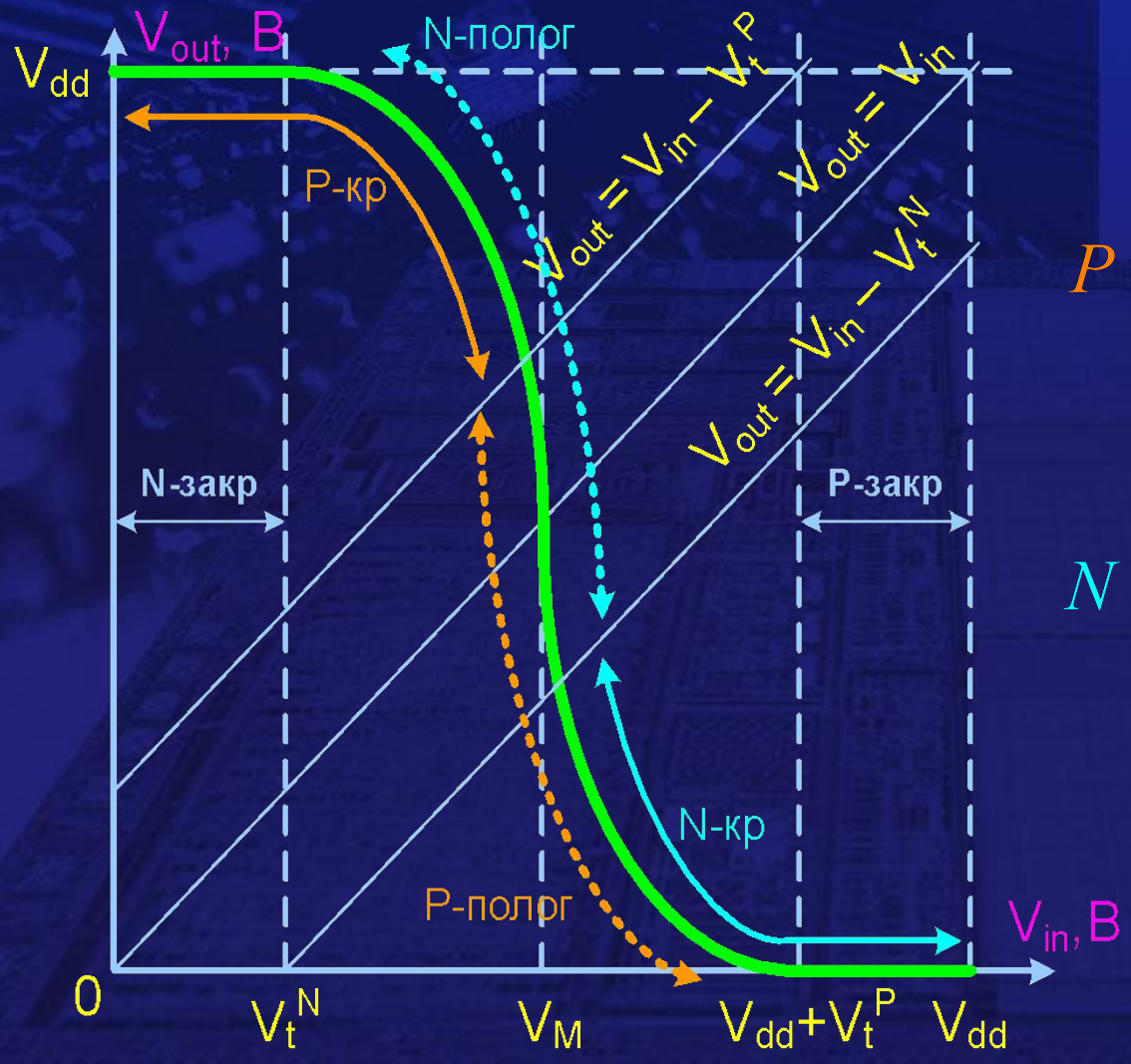


# ВАХ инвертора





# Передаточная характеристика инвертора



P:  $k_{pDS} \geq V_{GS} - V_T^P -$   
 $W_{DS} \approx V_{GS} - V_T^P -$

N:  $k_{nDS} \leq V_{GS} - V_T^N -$   
 $W_{DS} \approx V_{GS} - V_T^N -$

# Передаточная характеристика инвертора

$$I_{MAX} = \frac{\beta_N}{2} (V_{in} - V_T^N)^2 = \frac{\beta_P}{2} (V_{in} - V_{DD} - V_T^P)^2; V_{in} = V_M$$

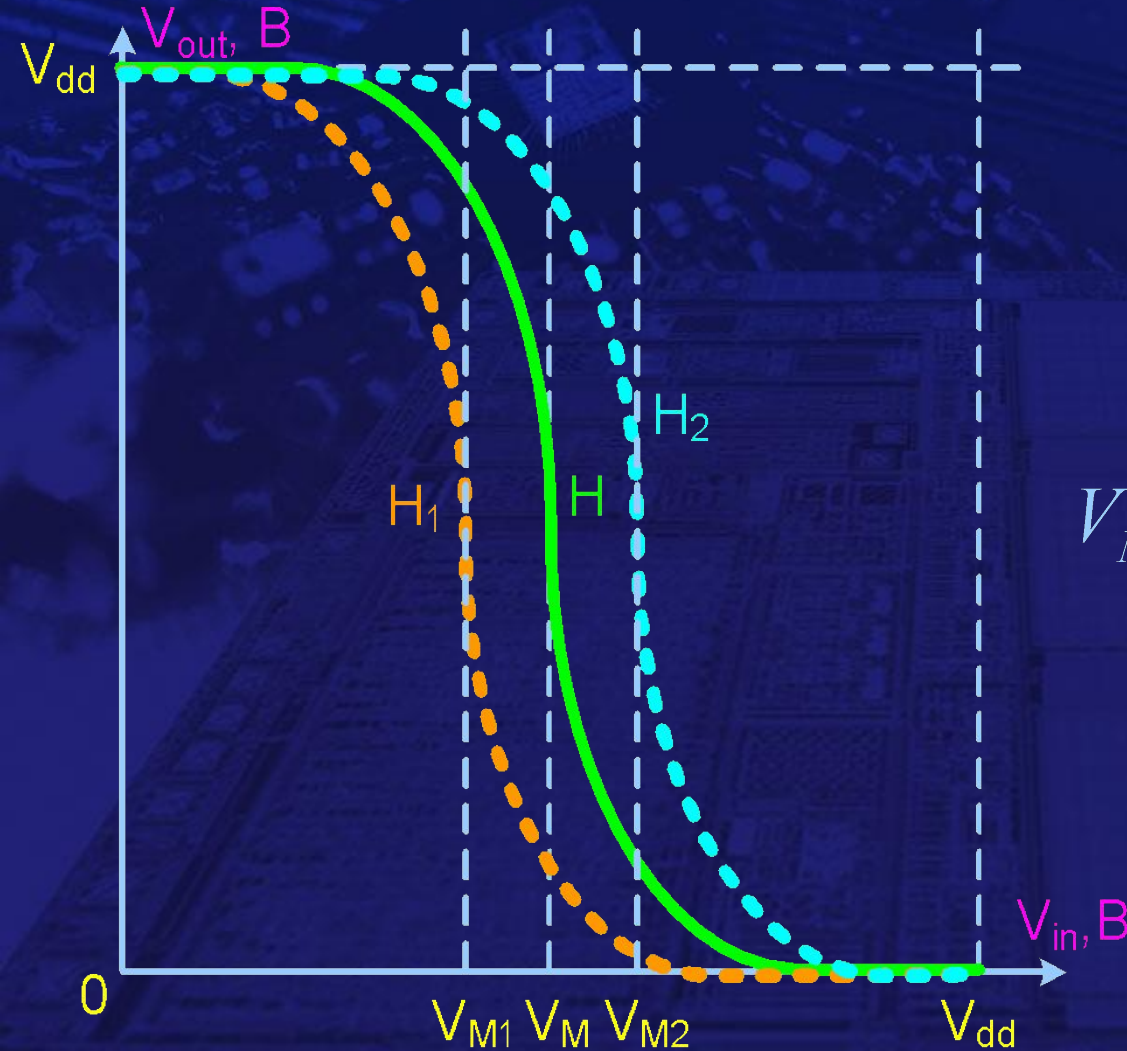
$$\frac{\beta_P}{\beta_N} = \left( \frac{V_M - V_T^N}{V_M - V_{DD} - V_T^P} \right)^2; \quad H = \sqrt{\frac{\beta_P}{\beta_N}} = \pm \frac{V_M - V_T^N}{V_M - V_{DD} - V_T^P};$$

"-" или "+"?

$$V_M - (V_{DD} + V_T^P) < 0 \quad V_M - V_T^N > 0 \quad H = \sqrt{\frac{\beta_P}{\beta_N}} = - \frac{V_M - V_{DD} - V_T^P}{V_M - V_T^N};$$

$$V_M (H + 1) = V_T^N + H (V_{DD} + V_T^P); \quad V_M = \frac{V_T^N + H (V_{DD} + V_T^P)}{H + 1};$$

# Передаточная характеристика инвертора



$$\mu_{TM} = \frac{V_{DD}}{2}, \quad H = 1$$

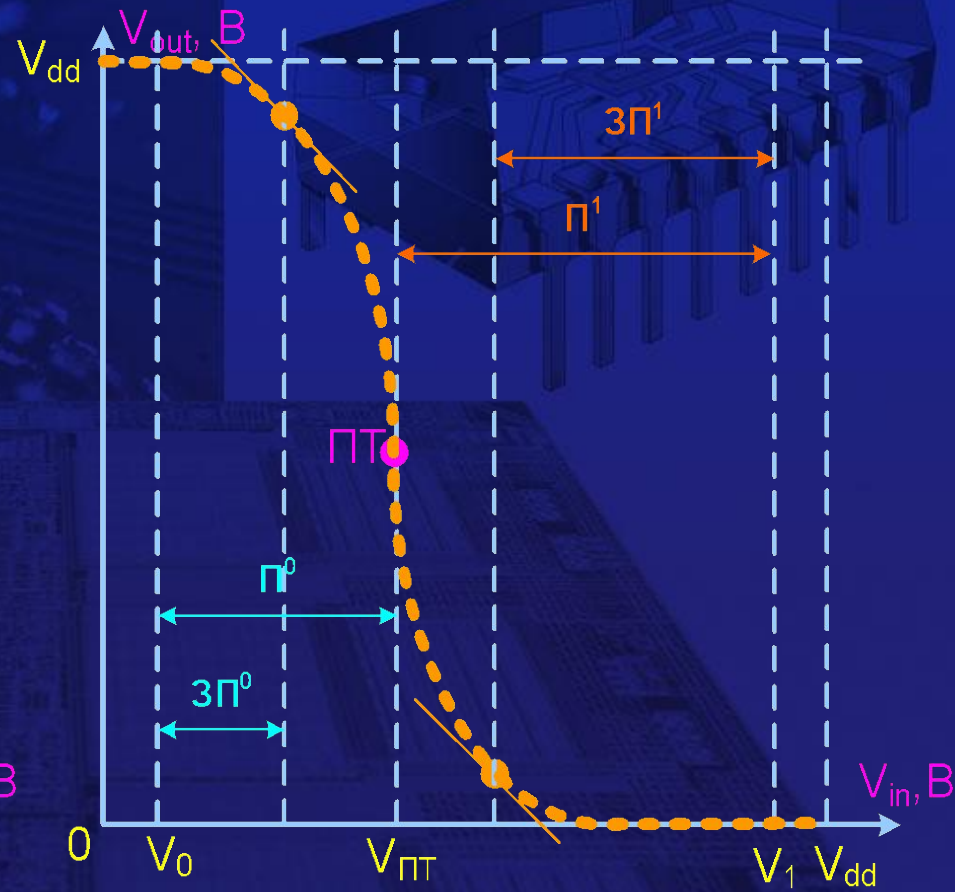
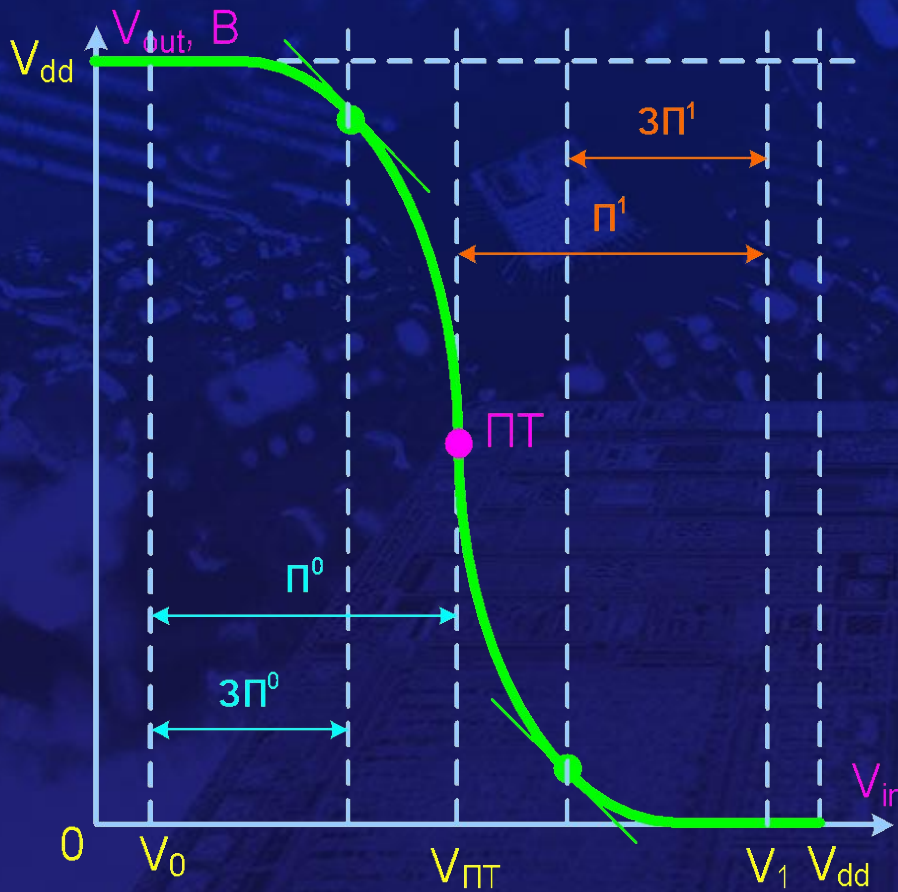
$$H_1 < H < H_2$$

$$V_M = \frac{V_T^N + H(V_{DD} + V_T^P)}{H + 1};$$

$$H_1 < 1, \quad V_{M1} < V_M$$

$$H_2 > 1, \quad V_{M2} > V_M$$

# Помехоустойчивость



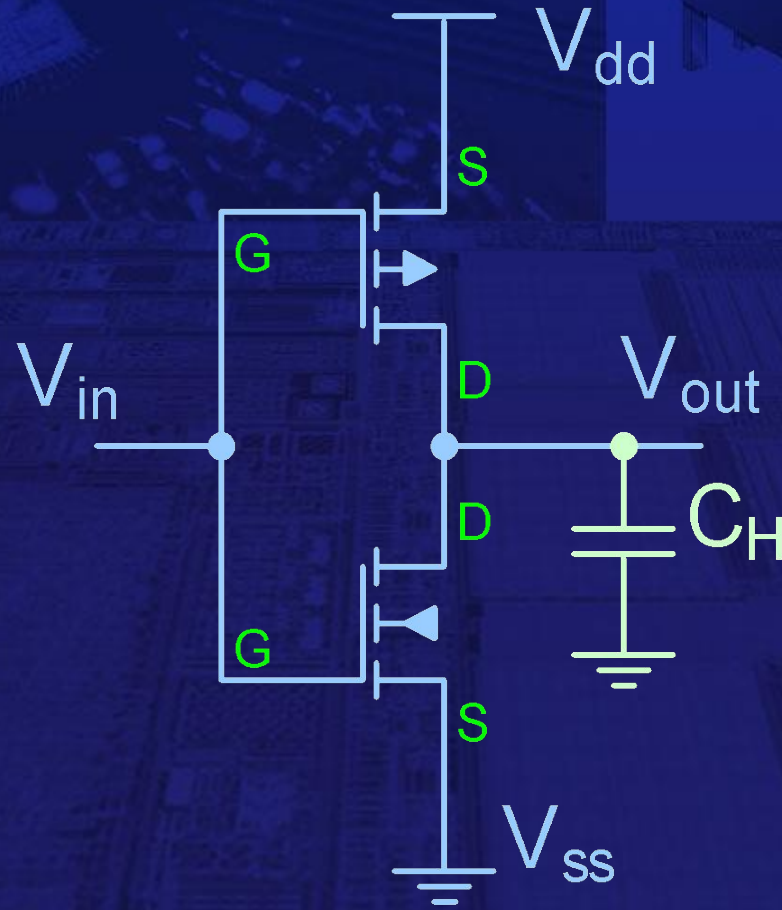
$V_{ПТ}$  – пороговая точка

$3П$  – запас помехоустойчивости

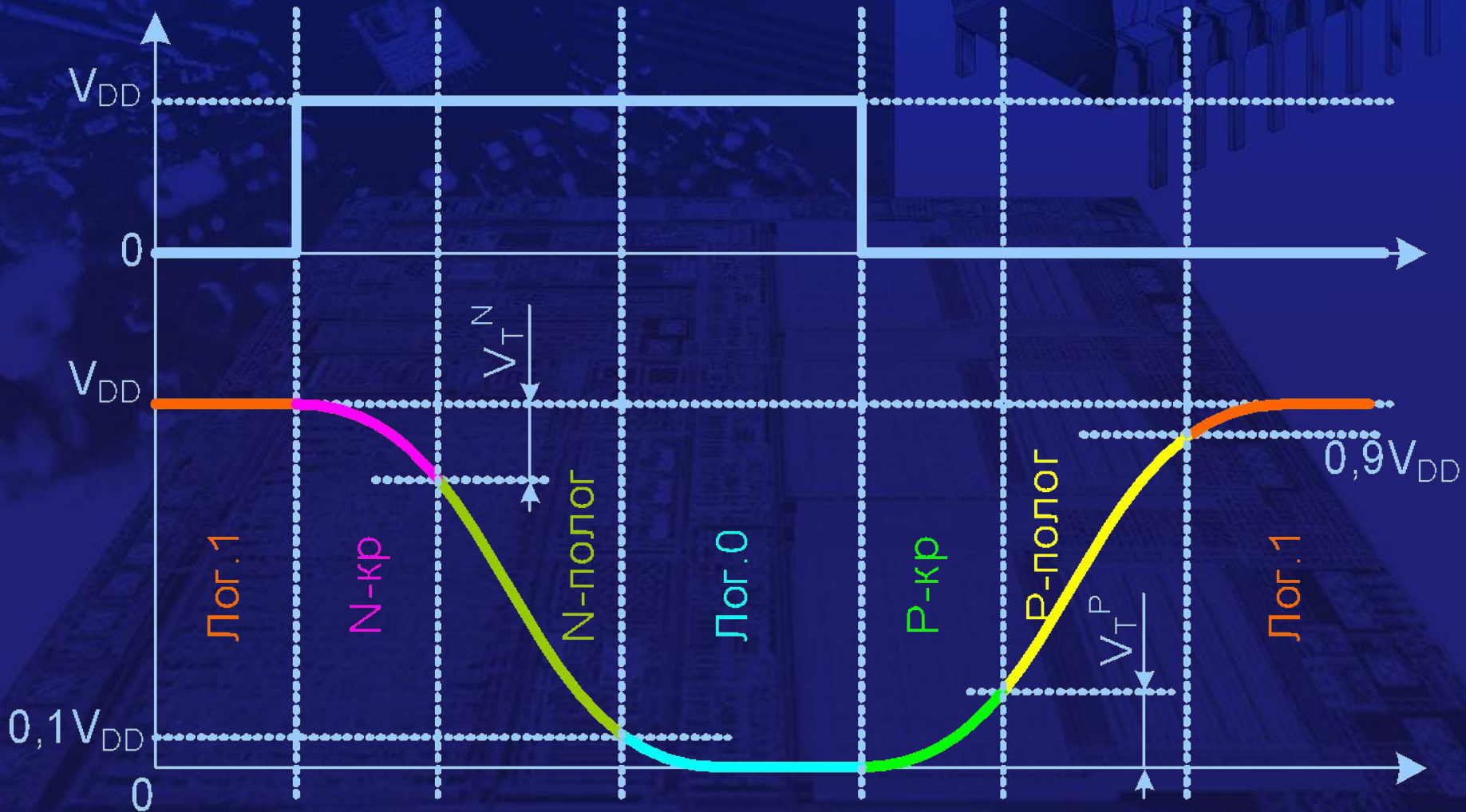
$П$  – помехозащищенность

$ПУ$  – помехоустойчивость,

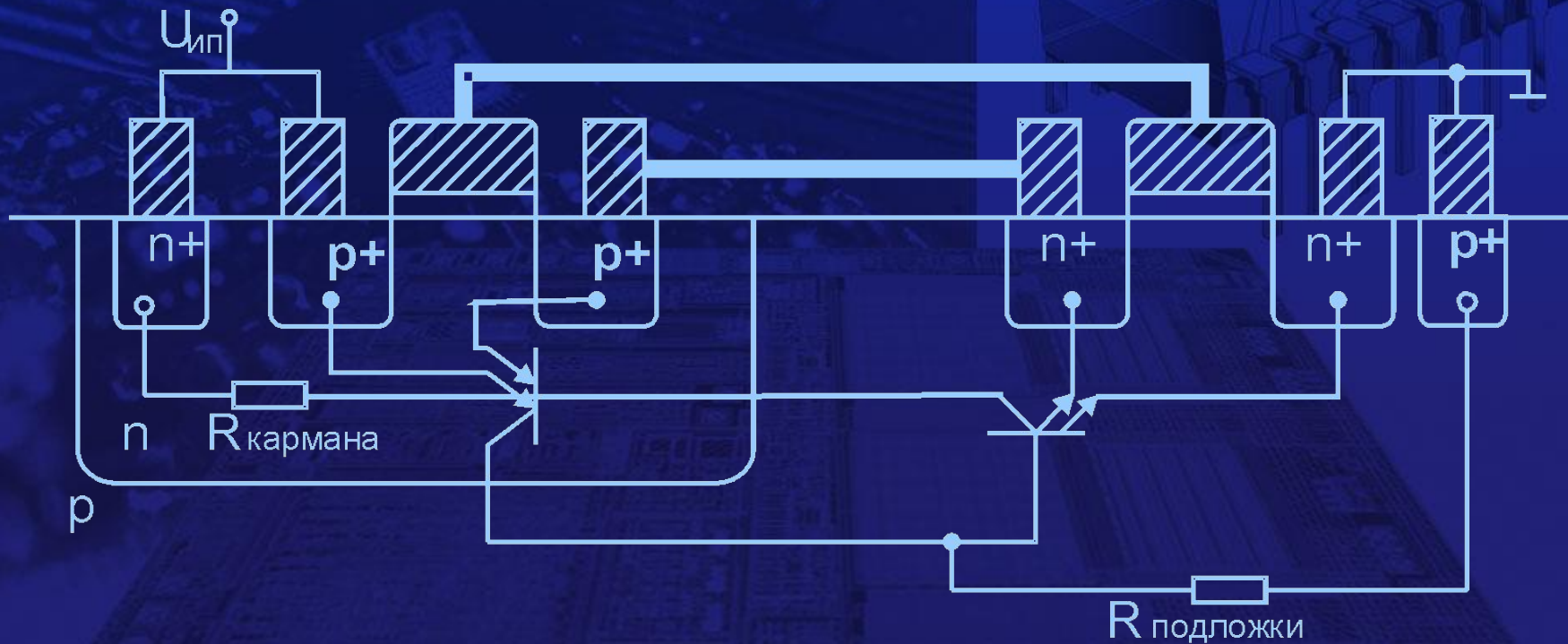
# Динамические характеристики



# Динамические характеристики



# Эффект тиристорной защелки



# Эффект тиристорной защелки



– Условия возникновения (необходимое):

- $V_{SS} - V_{out} > V_{pn}$
- $V_{out} - V_{DD} > V_{pn}$
- Паразитные токи через подложку или карман

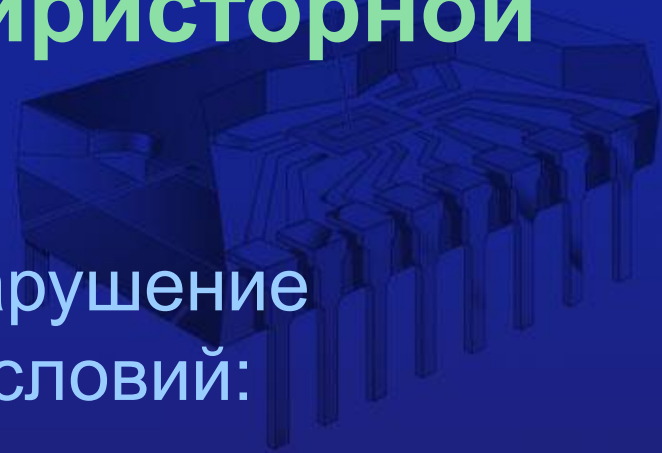
– Условие поддержания (достаточное):

- $\beta_p \beta_n > 1$

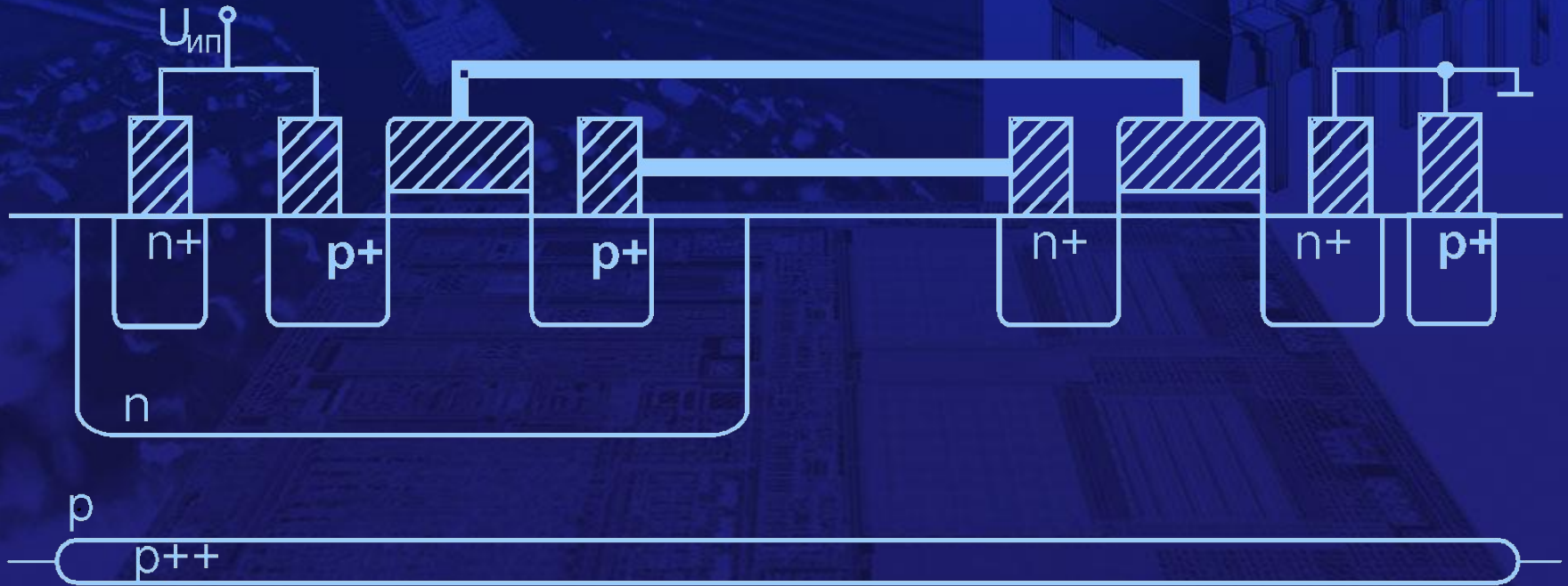


# Защита от эффекта тиристорной защелки

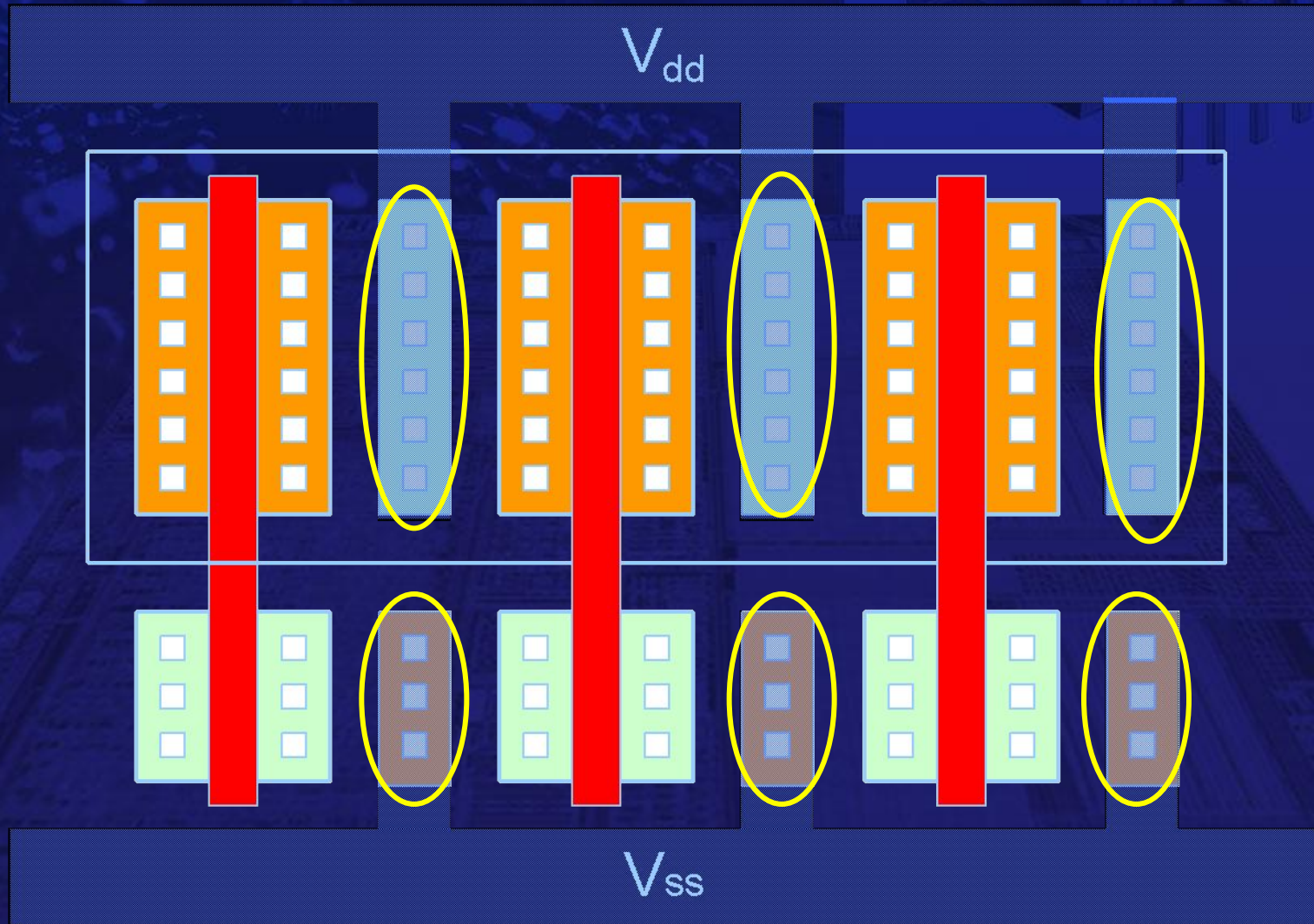
- Принципы защиты от ЭТЗ – нарушение необходимых и достаточных условий:
  - Уменьшение  $R_{\text{кармана}}$  и  $R_{\text{подложки}}$ 
    - Охранные кольца с контактами к  $V_{ss}$  и  $V_{dd}$  по периметру КМДП структур.
    - Шунтирование внутренним высоколегированным слоем с малым сопротивлением.
  - Уменьшение коэффициентов усиления паразитных транзисторов, чтобы  $\beta_p \beta_n < 1$ 
    - Увеличение размеров баз транзисторов



# Защита от эффекта тиристорной защелки (шунтирующий слой)



# Защита от эффекта тиристорной защелки (охранные кольца)

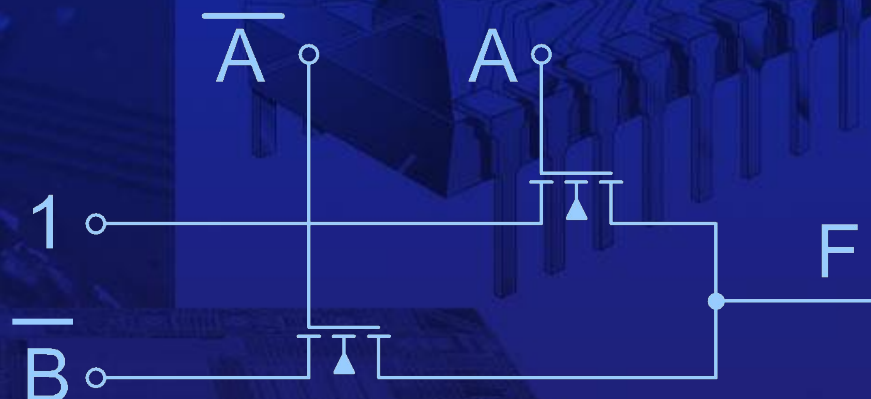
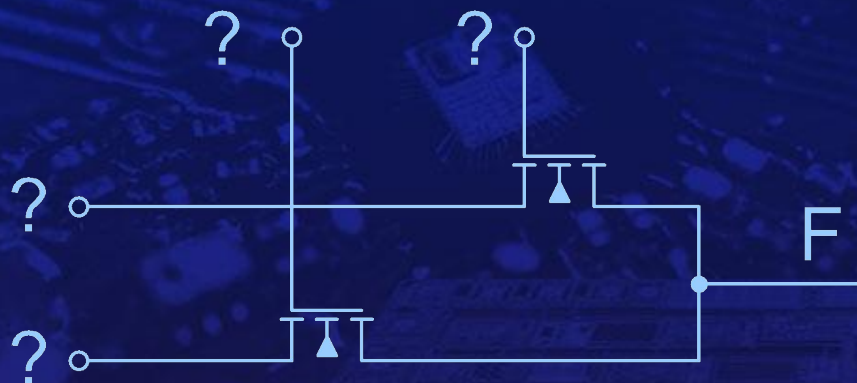


# Логика на проходных транзисторах



- $F = P_1(V_1) + P_2(V_2) + \dots + P_i(V_i)$
- Когда управляющий вход равен «1», то  $F$  равен соответствующему информационному сигналу
- Только один (или ни одного) управляющий сигнал может быть равным «1»

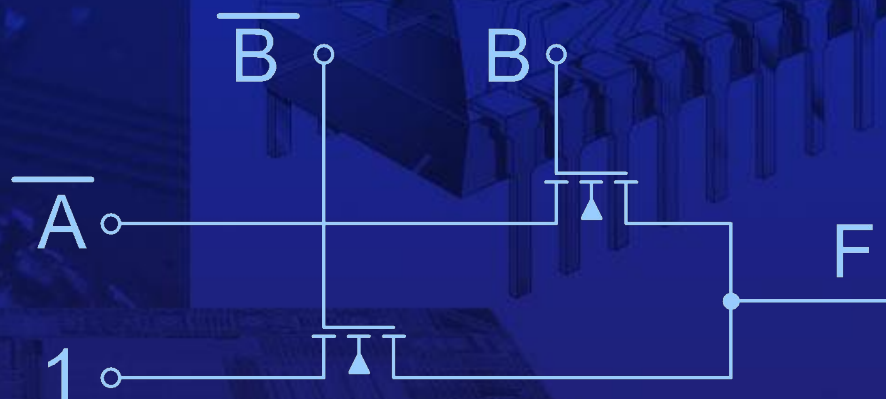
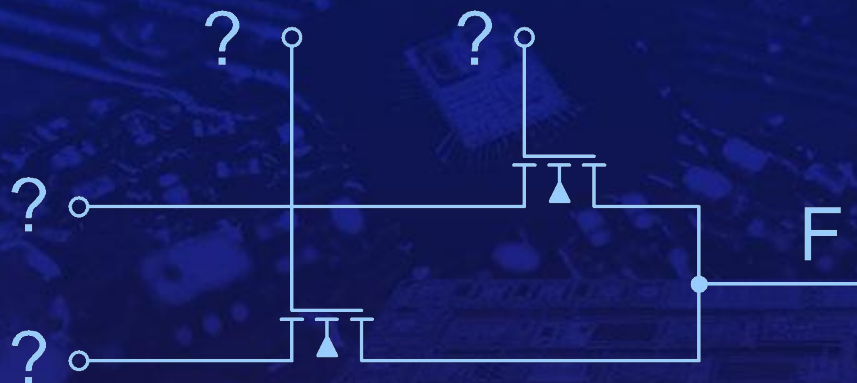
# Логика на проходных транзисторах



A	B	F	Пропускная функция
0	0	1	$\overline{A} + \overline{B}$
0	1	0	$A + \overline{B}$
1	0	1	$A + \overline{B}$
1	1	1	$A + B$

A	0	1
B	0	1
0	$\overline{A}$	$A$
1	$\overline{B}$	$B$

# Логика на проходных транзисторах



A	B	F	Проподная функция
0	0	1	$\overline{A} + \overline{B}$
0	1	1	$\overline{A} + B$
1	0	1	$A + \overline{B}$
1	1	0	$\overline{A} + B$

A	0	1
B	0	1
0	$\overline{A}$	$A$
1	$\overline{A}$	$\overline{A}$

Additional labels in the truth table:  $\overline{B}$  is placed in a box between the 0 and 1 rows of the 0 column;  $B$  is placed in a box between the 0 and 1 rows of the 1 column.