

# Синхронизация последовательных схем

*Divide et impera*

Проектирование цифровой техники  
с применением ПЛИС и аппаратного  
языка разработки System Verilog

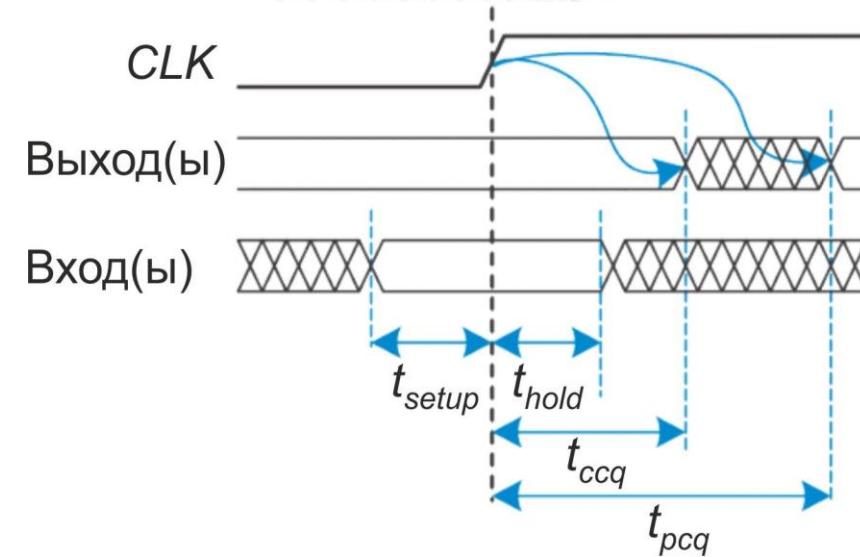
Максим Викторович Кулешов  
Ведущий инженер-электроник ООО «ЛЭМЗ-Т»

Входы: апертурное время.

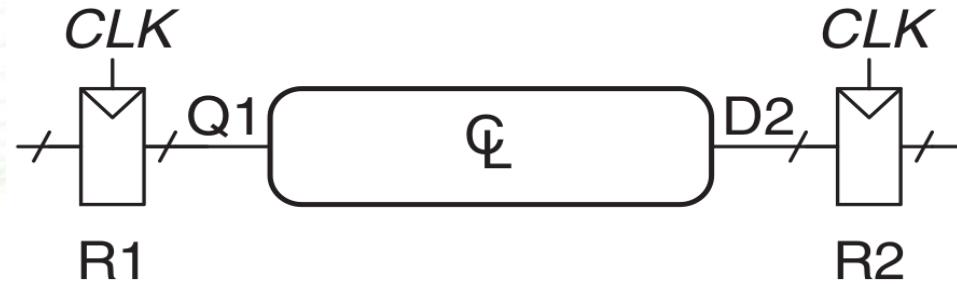
1. Setup Time.
2. Hold Time.

Выходы: время реакции (*Propagation delay*).

1.  $t_{ccq}$  – задержка реакции (min).
2.  $t_{pcq}$  – задержка распространения (max).



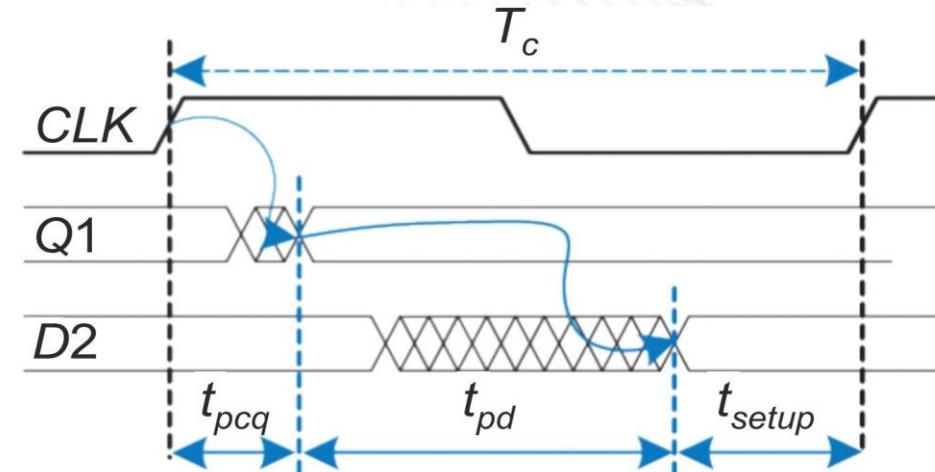
# Временные характеристики системы



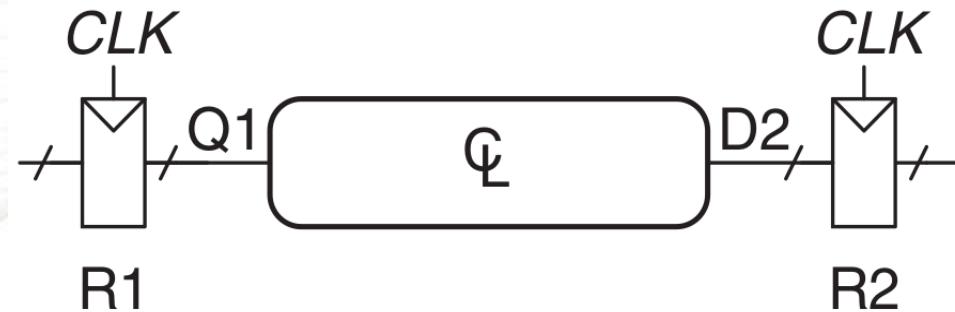
Ограничение времени предустановки  
 $(setup)$ , или критический путь

$$T_c \geq t_{pcq} + t_{pd} + t_{setup},$$

$$t_{pd} \leq T_c - (t_{pcq} + t_{setup}).$$



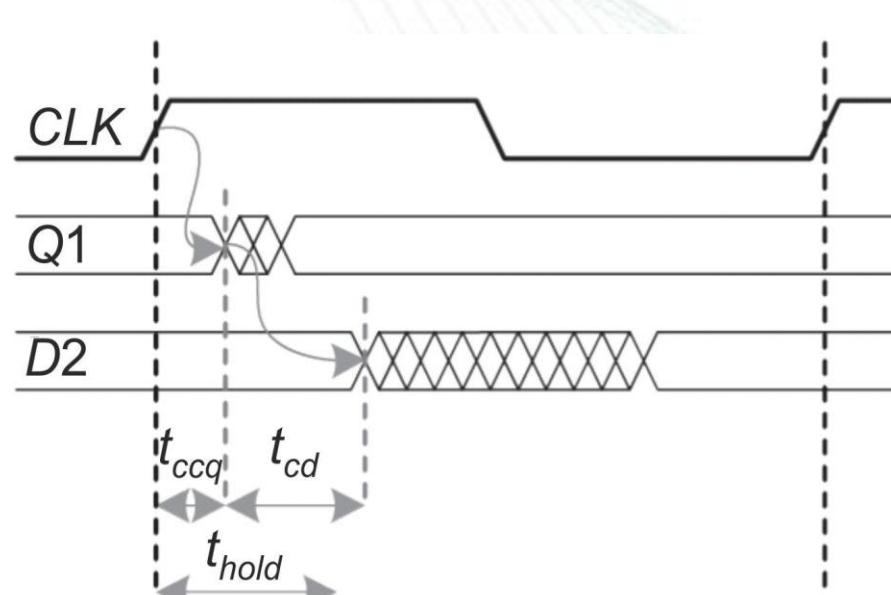
# Временные характеристики системы



Ограничение времени удержания (*hold*), или  
короткий путь

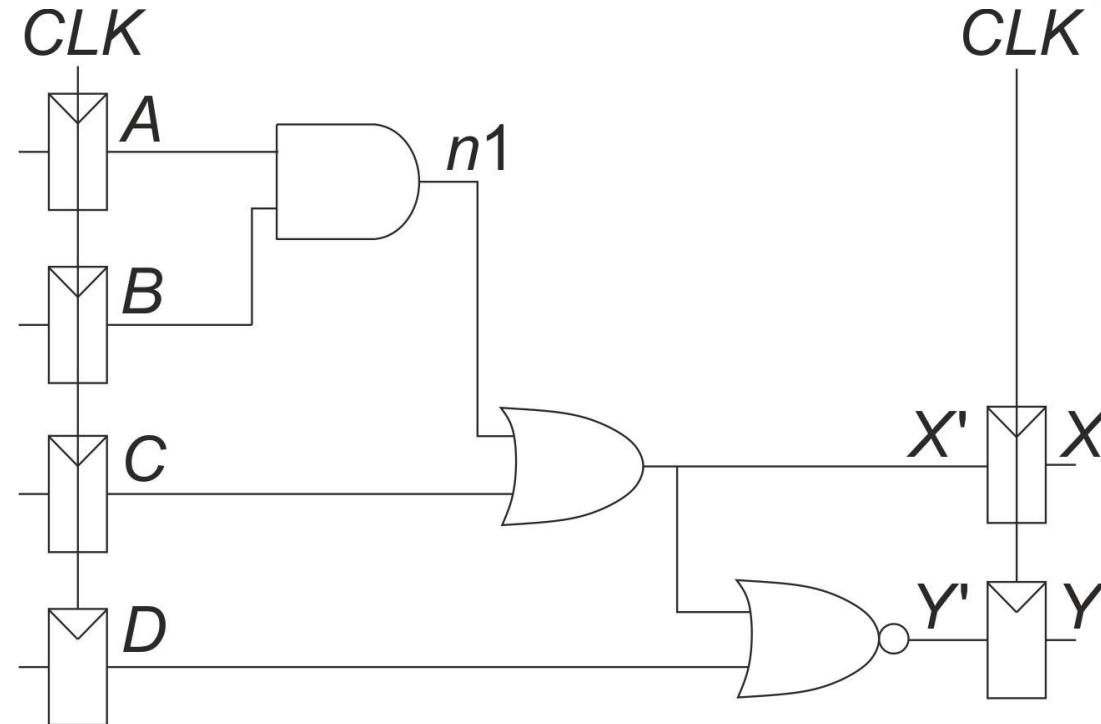
$$t_{ccq} + t_{cd} \geq t_{hold},$$

$$t_{cd} \geq t_{hold} - t_{ccq}.$$



# Временные характеристики системы

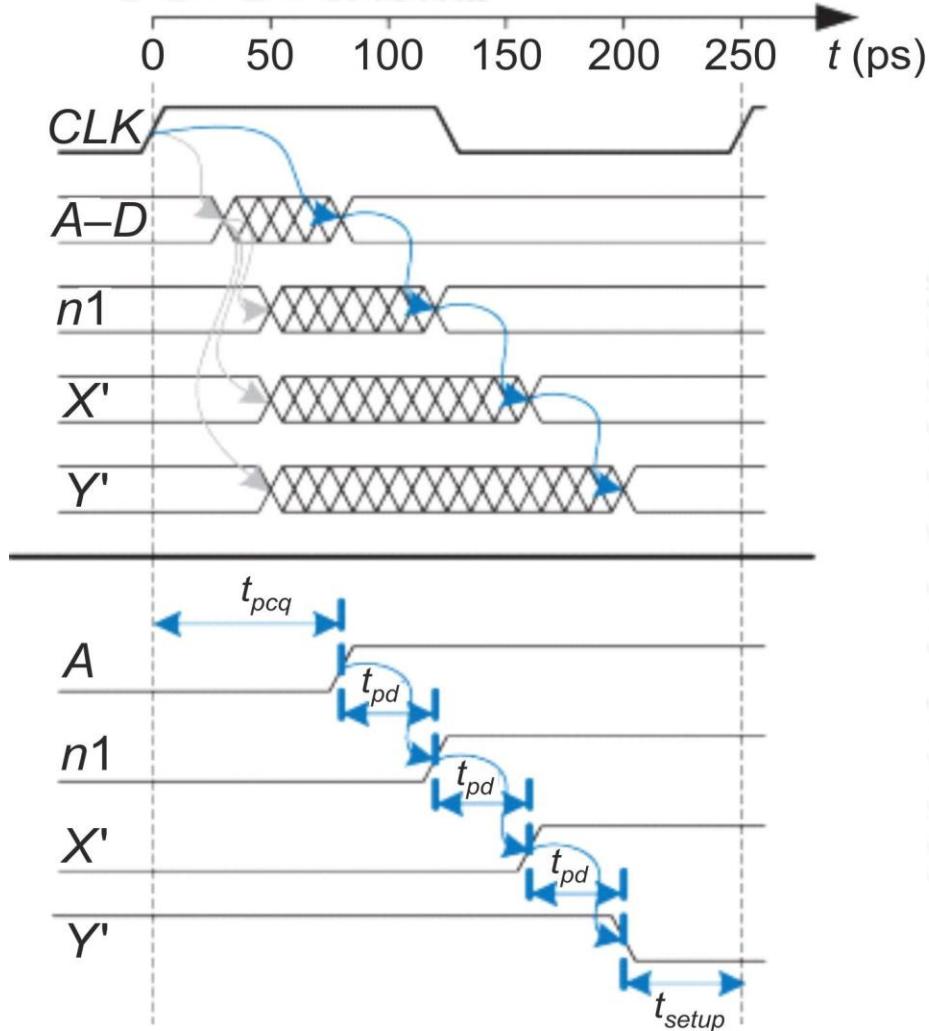
- Задержка реакции  $t_{ccq} = 30$  пс (min PD).
- Задержка распространения  $t_{pcq} = 80$  пс (max PD).
- Время предустановки  $t_{setup} = 50$  пс (setup).
- Время удержания  $t_{hold} = 60$  пс (hold).
- Задержка реакции ЛЭ  $t_{cd} = 25$  пс (min PD).
- Задержка распространения ЛЭ  $t_{pd} = 40$  пс (max PD).



# Временные характеристики системы

Критический путь: ограничение ТЧ.

- $T_C \geq t_{pcq} + 3t_{pd} + t_{setup}$ .
- $T_c \geq 80 + 3 \times 40 + 50$ .
- $T_c \geq 250$  пс.
- $f_{c\max} = 1/T_{c\min} = 4$  ГГц.



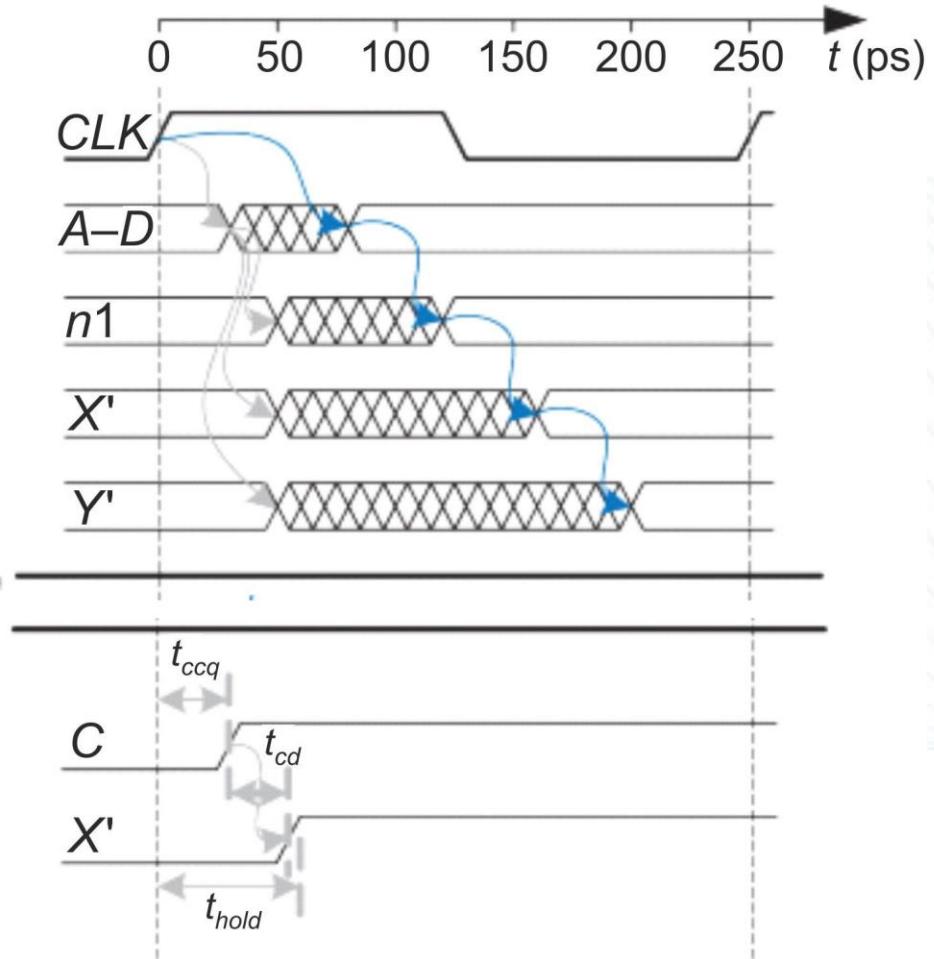
# Временные характеристики системы

Короткий путь: техпроцесс.

Время удержания  $t_{hold}$  должно быть меньше  $t_{ccq} + t_{cd}$ .

$$t_{ccq} + t_{cd} = 30 + 25 = 55 \text{ пс. Не выполняется!}$$

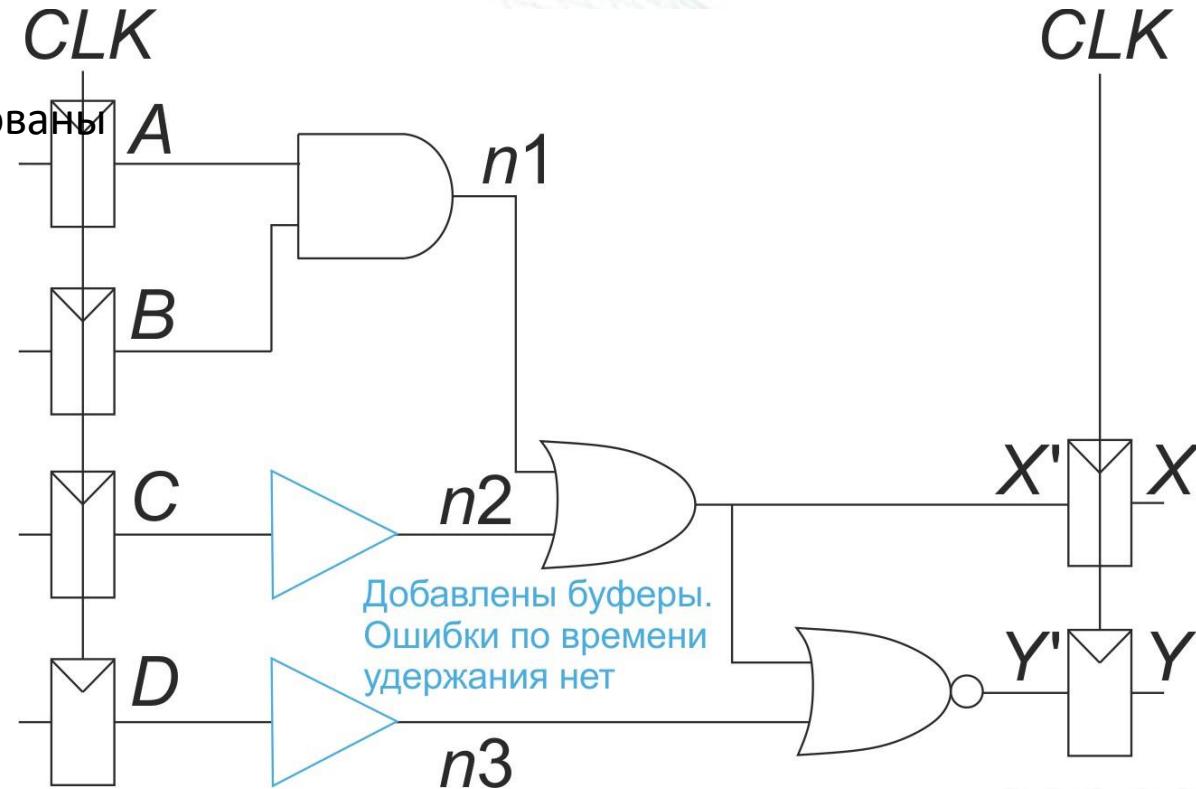
Схема будет работать нестабильно.



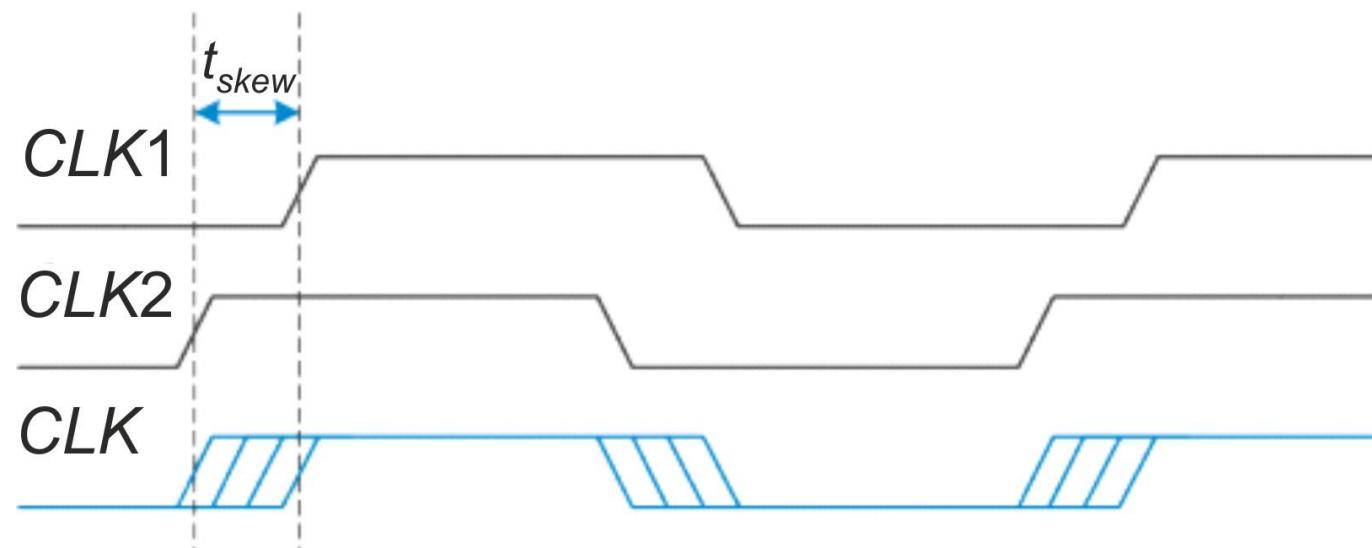
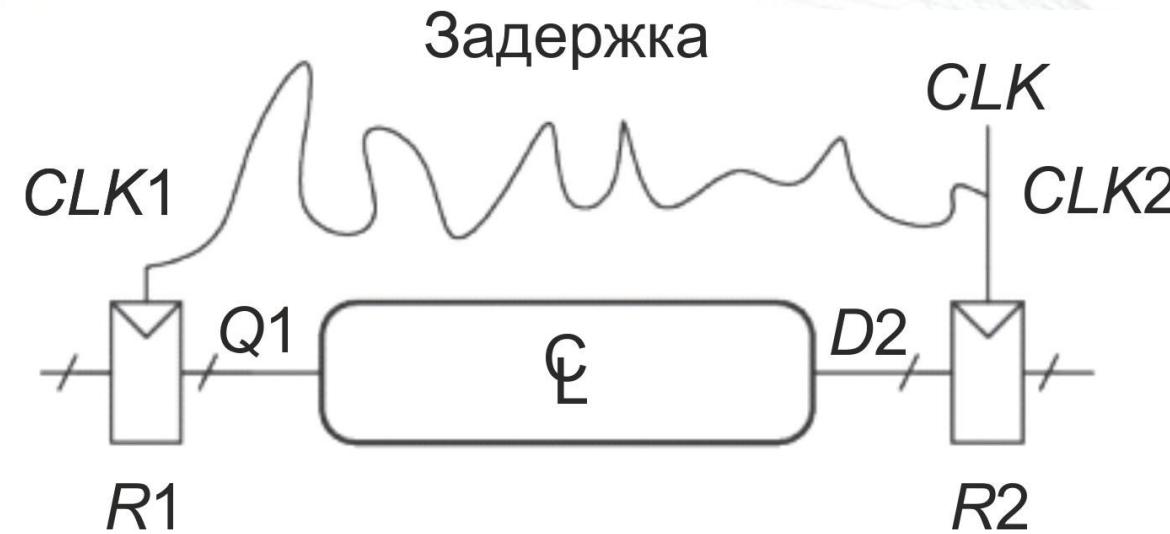
# Временные характеристики системы

$$t_{ccq} + 2t_{cd} = 30 + 2 \times 25 = 80 \text{ пс.}$$

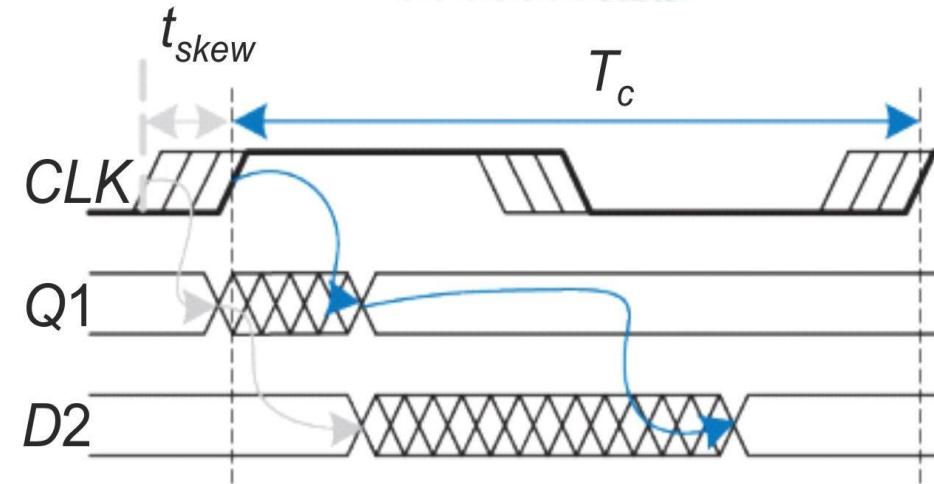
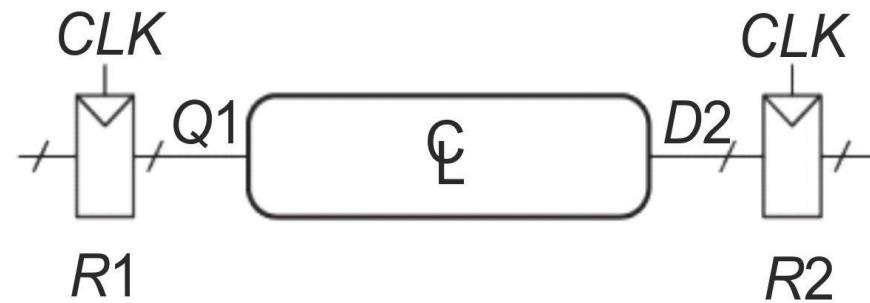
В современных ПЛИС триггеры спроектированы так, что  $t_{hold} < t_{ccq}$ .



# Временные характеристики системы. Расфазировка тактовых сигналов

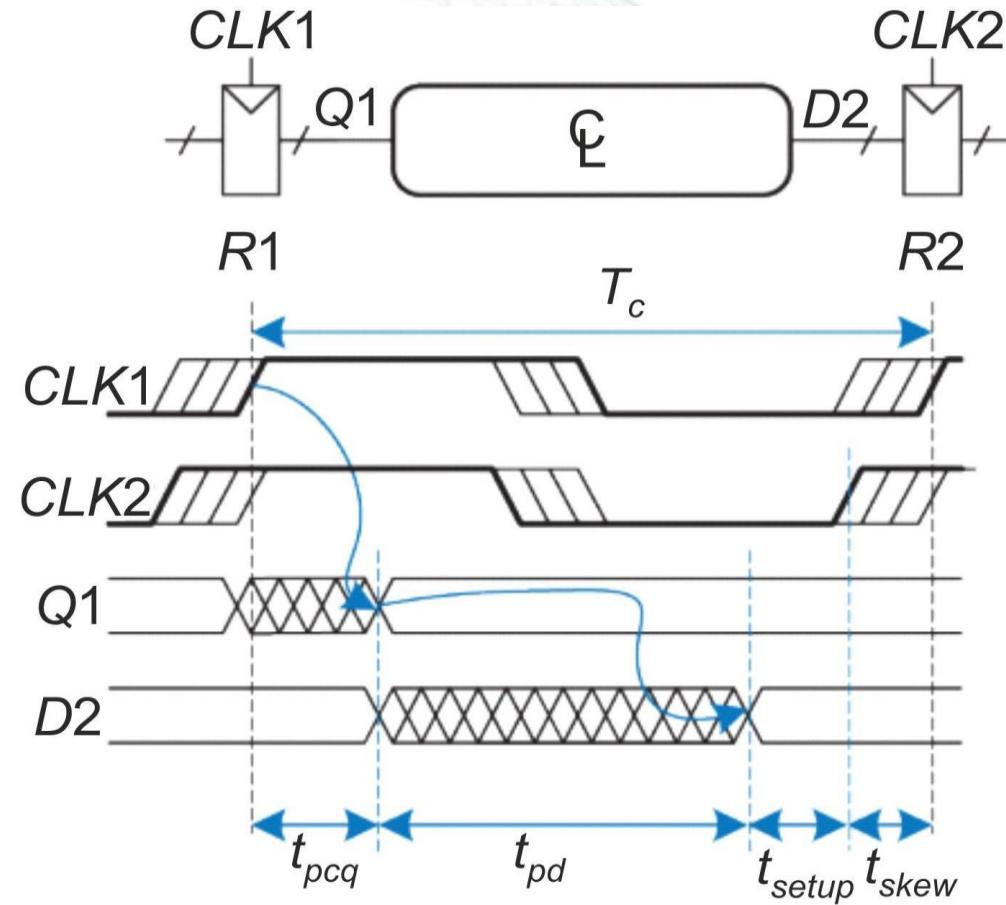


# Временные характеристики системы. Расфазировка тактовых сигналов



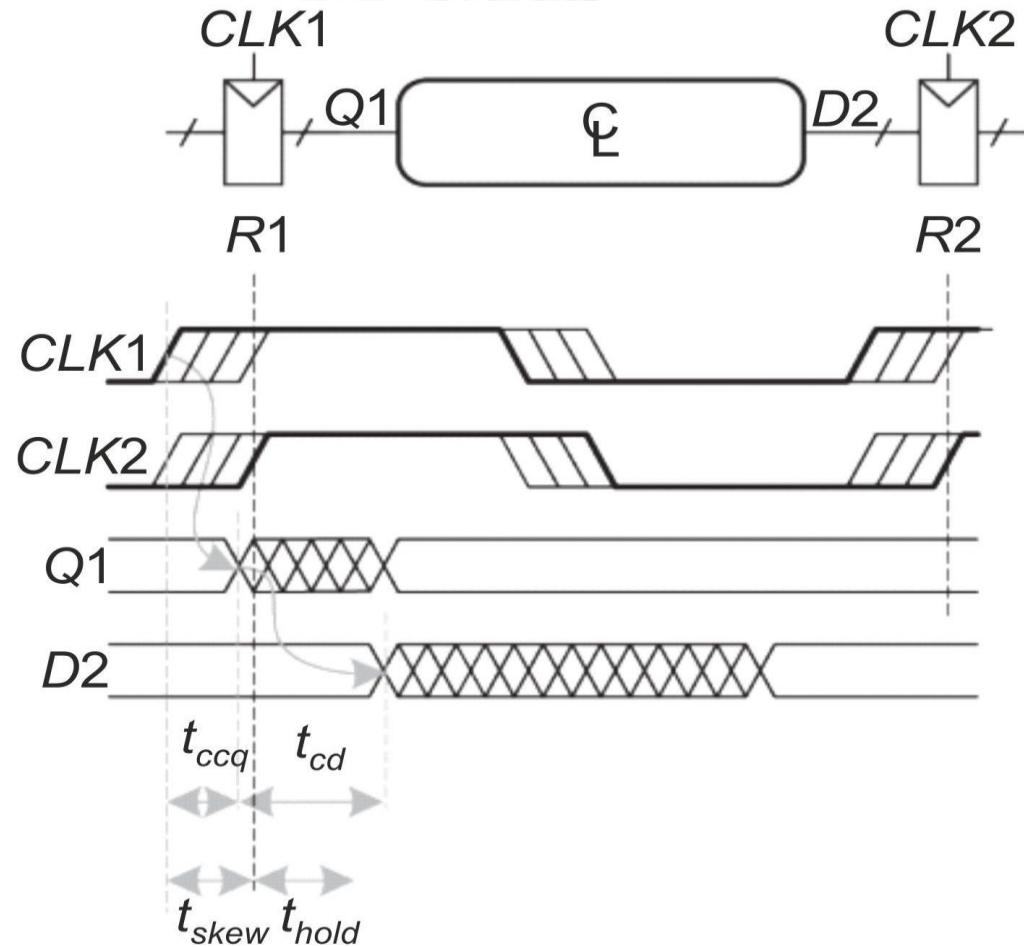
# Временные характеристики системы. Расфазировка тактовых сигналов

$$T_c \geq t_{pcq} + t_{pd} + t_{\text{setup}} + t_{\text{skew}}.$$

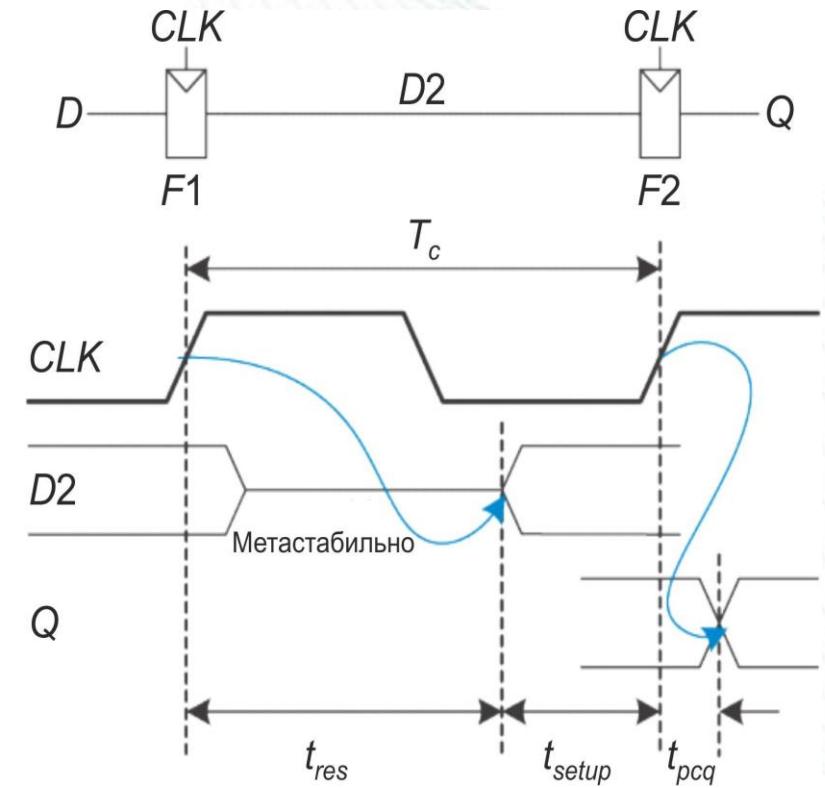
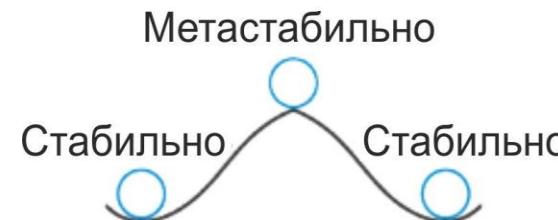
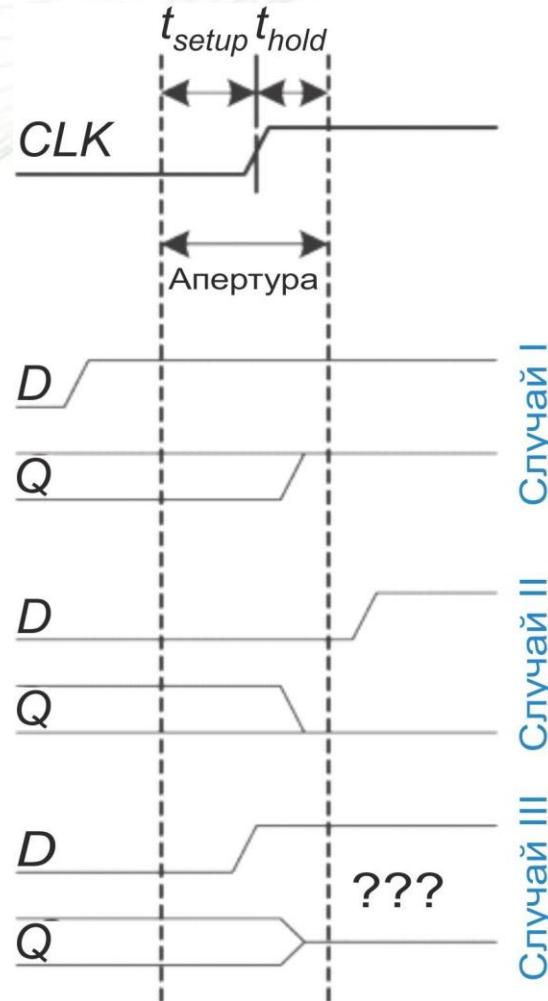


# Временные характеристики системы. Расфазировка тактовых сигналов

$$t_{ccq} + t_{cd} \geq t_{hold} + t_{skew}, \\ t_{cd} \geq t_{hold} + t_{skew} - t_{ccq}.$$



# Временные характеристики системы. Метастабильность

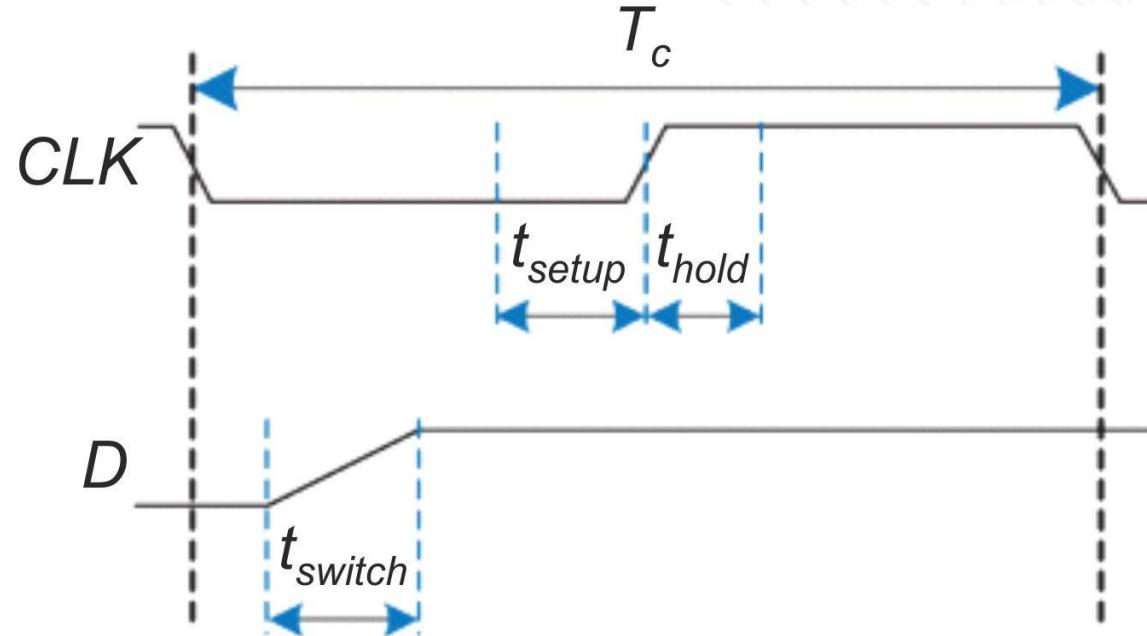


# Временные характеристики системы. Вычисление времени разрешения

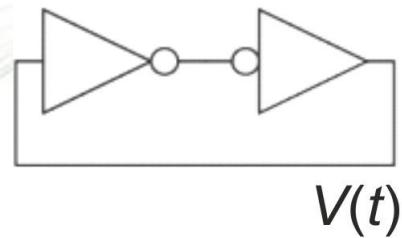
$$P(t_{res} > t) = P(\text{samples changing input}) \cdot P(\text{unresolved})$$

$$P(\text{samples changing input}) = \frac{t_{switch} + t_{setup} + t_{hold}}{T_c}$$

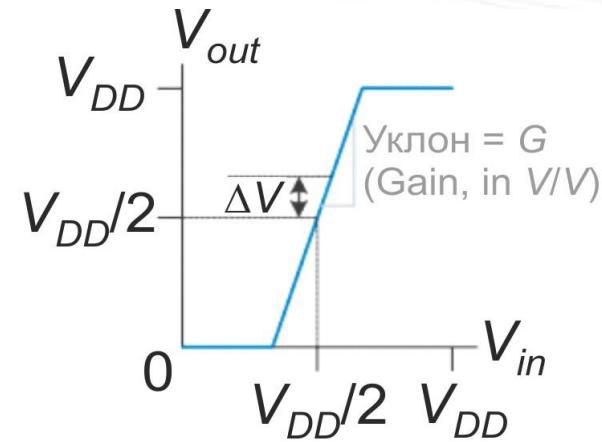
$$\tau = \frac{RC}{G - 1}$$



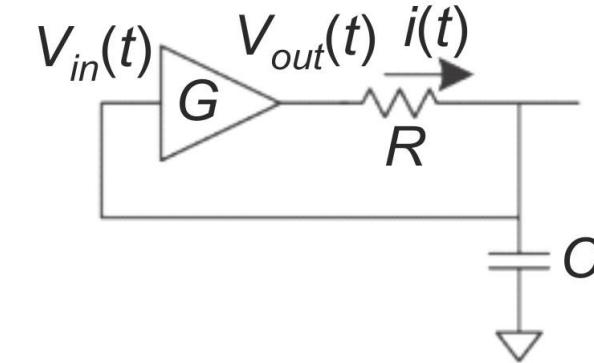
# Временные характеристики системы. Вычисление времени разрешения



a)



b)

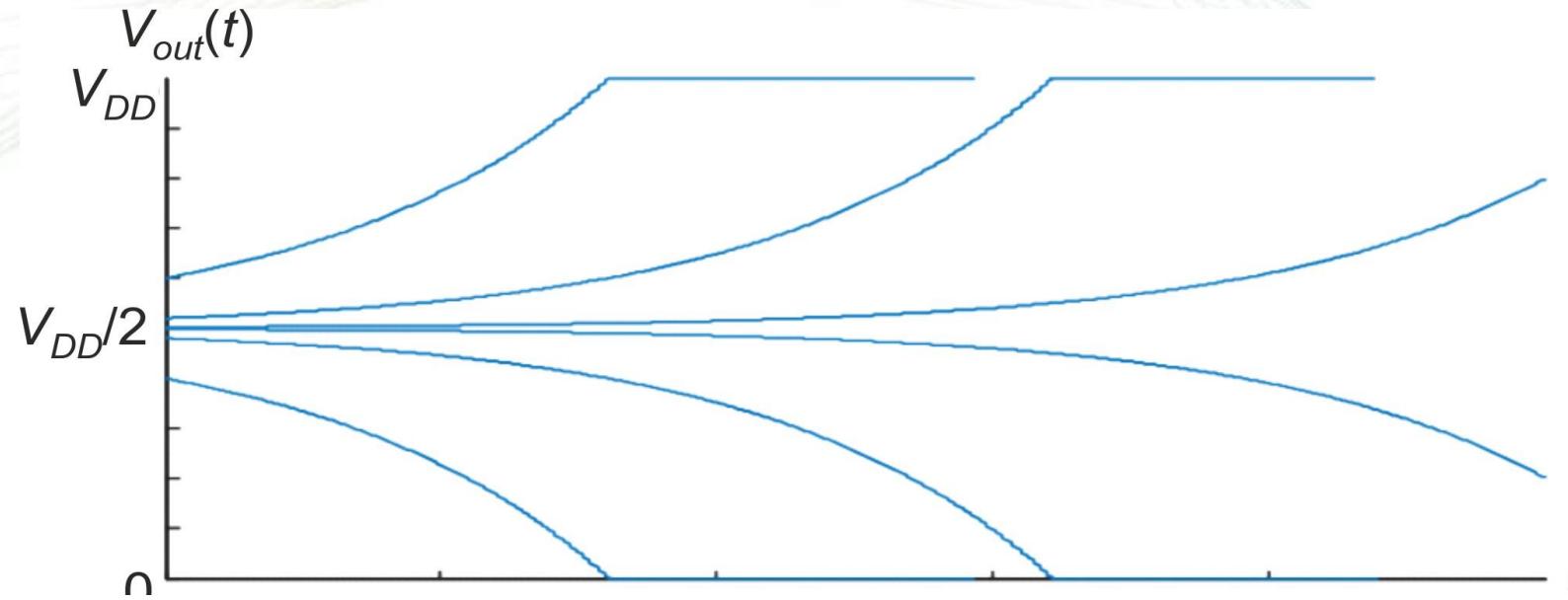


c)

$$\frac{dv_{out}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left( v_{out} - \frac{V_{DD}}{2} \right)$$

$$v_{out}(t) = \frac{V_{DD}}{2} + \Delta V e^{\frac{t}{\tau}}$$

# Временные характеристики системы. Вычисление времени разрешения



$$t_{res} = \tau \ln \frac{V_{DD}}{2 |\Delta V|}$$

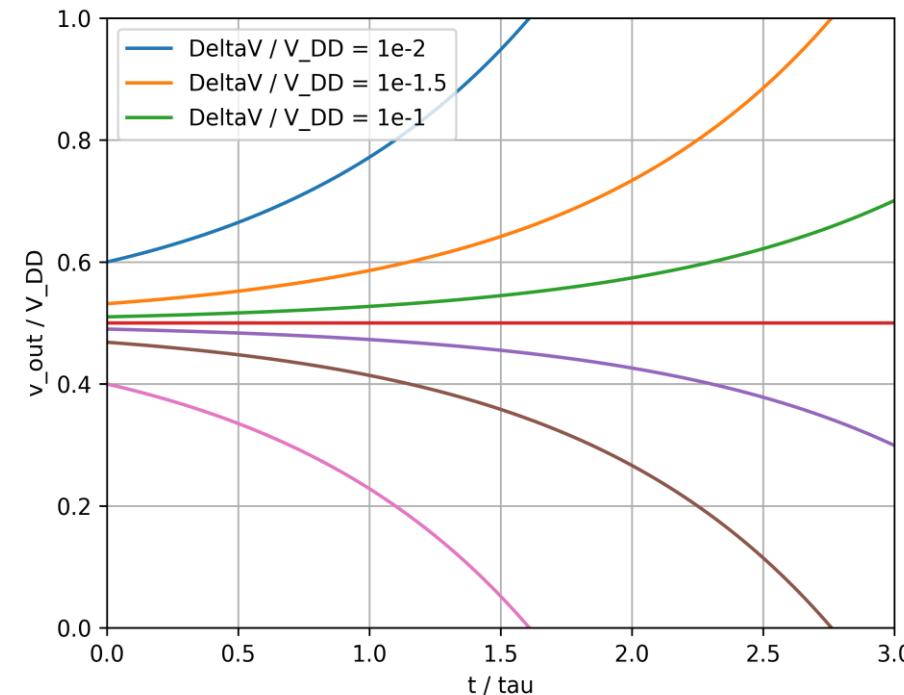
$$P(\text{unresolved}) = P \left( \left| v_{in}(0) - \frac{V_{DD}}{2} \right| < \frac{\Delta V_{res}}{G} \right) = \frac{2 \cdot \Delta V_{res}}{G \cdot V_{DD}}$$

$$P(t_{res} > t) = \frac{t_{switch} + t_{setup} + t_{hold}}{G \cdot T_c} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

# Временные характеристики системы. Вычисление времени разрешения

```
1 # Metastability resolution trajectories
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Initialize parameters
6 V_DD = 1 # power supply voltage (logic "1"), [normalized]
7 K = np.logspace(-2, -1, 3) # logarithmically scaled offset multiplier
8 DeltaV = V_DD * np.concatenate((K[::-1], [0], -K)) # voltage offsets
9
10 tau = 1 # time constant of the system: tau = R * C / (G - 1), [normalized]
11 t = np.linspace(0, 3 * tau, 100) # time vector for X axis
12
13 # Loop over all DeltaVs and plot each curve
14 plt.figure()
15 for DeltaV_i in DeltaV:
16     v_out = V_DD / 2 + DeltaV_i * np.exp(t / tau)
17     plt.plot(t, v_out)
18
19 plt.title('Resolution (exp. growth): v_out(t) = V_DD / 2 + DeltaV * e^(t / tau)\n')
20 plt.xlabel('t / tau')
21 plt.ylabel('v_out / V_DD')
22 plt.legend([f'DeltaV / V_DD = {np.log10(k):.2g}' for k in K])
23 plt.xlim([0, t[-1]])
24 plt.ylim([0, V_DD])
25 plt.grid()
26 plt.show()
```

Resolution (exp. growth):  $v_{out}(t) = V_{DD} / 2 + \Delta V \cdot e^{(t / \tau)}$



Проектирование цифровой техники  
с применением ПЛИС и аппаратного языка  
разработки *System Verilog*