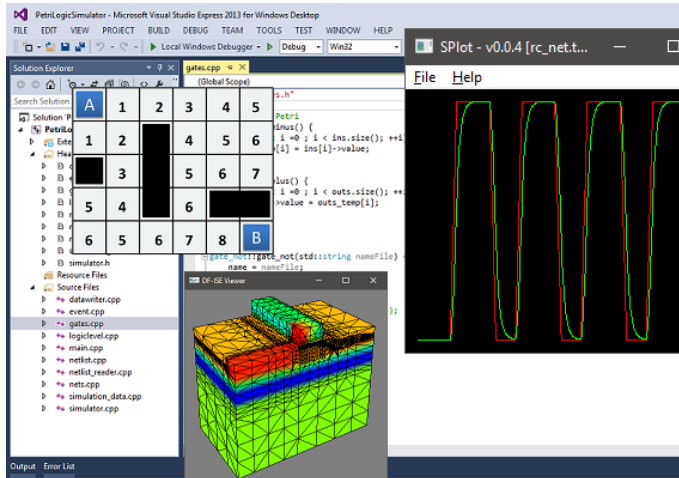




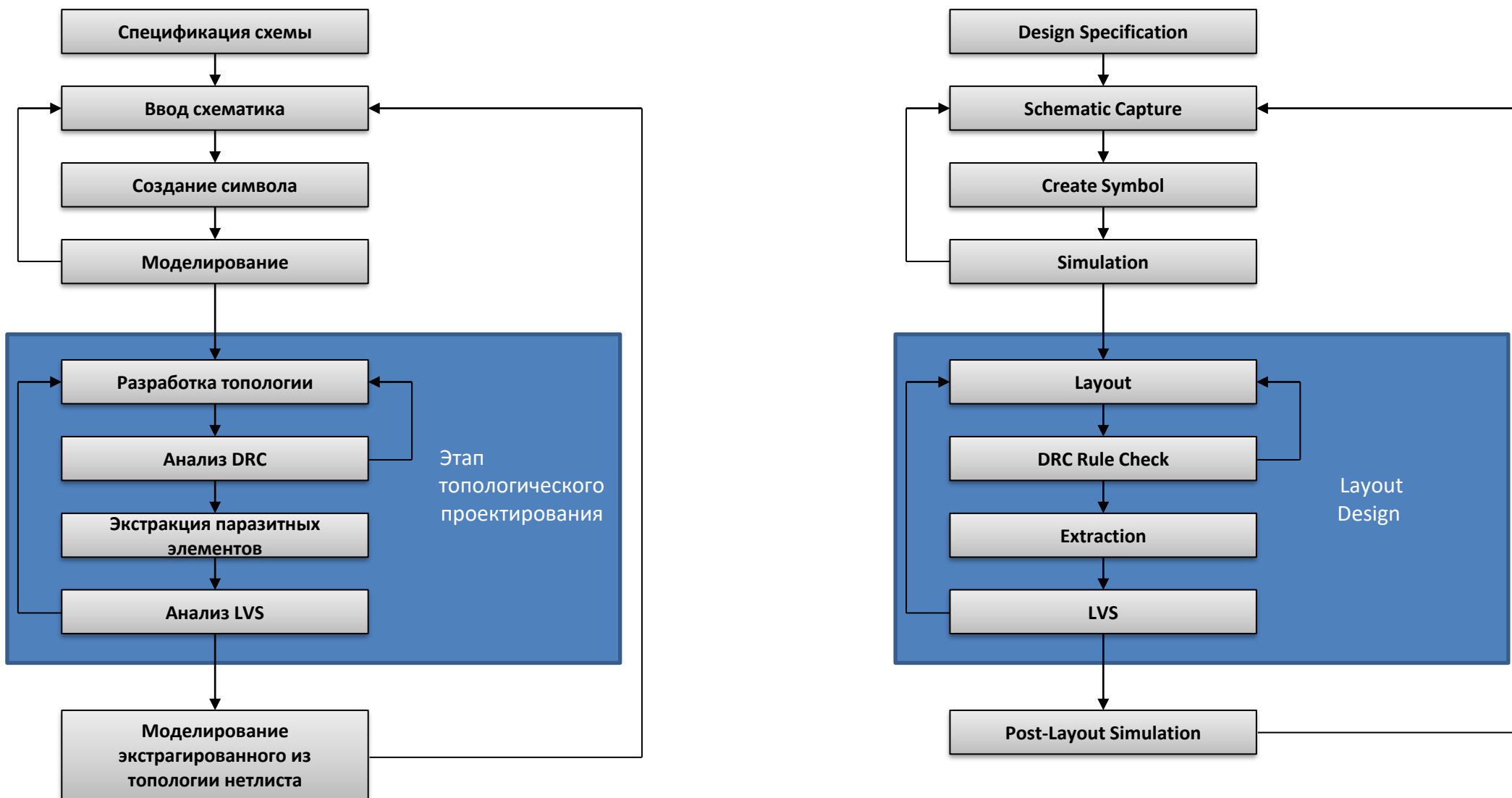
# Программные средства САПР

Лекция 3

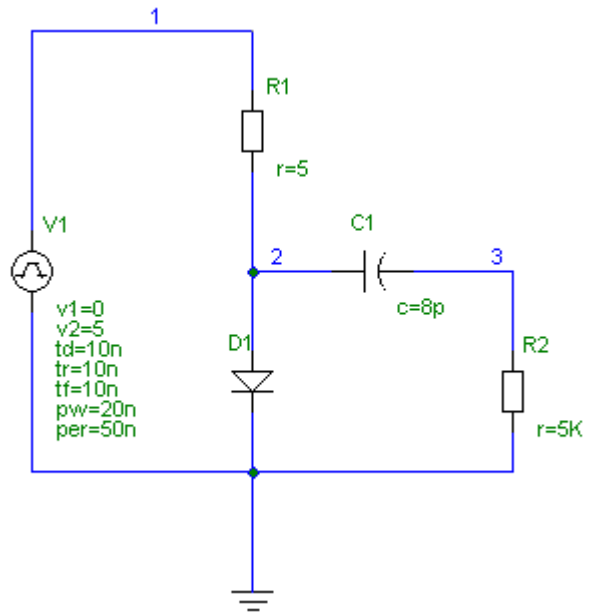
Схемотехнический этап проектирования



## Этапы проектирования



# ПО на этапе схемотехнического проектирования



```
** Test ASHTP::3
** Number of nodes is 2

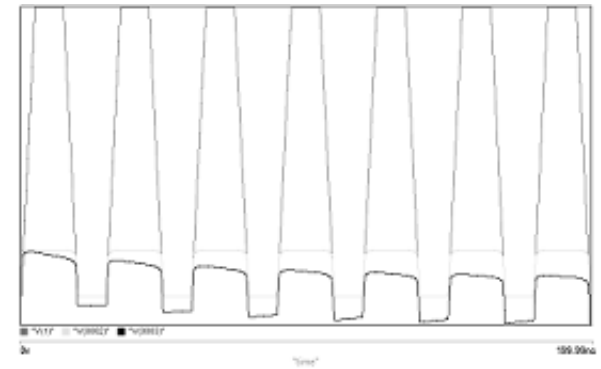
V1 1 0 PULSE 0 5 0 5n 5n 10n 30n

R1 1 2 5
R2 3 0 5K
D1 2 0
C1 2 3 8p

.TRAN 100p 200n
.PROBE V(0) V(1) V(2)
.OPTIONS PROBE OSRF
.END
```

СИМУЛЯТОР

- SPICE
- HSPICE (Synopsys)
  - LTSPICE (Tanner)
  - ELDO SPICE (Mentor)
  - AVOSPICE (Unique IC's)
  - SMARTSPICE (Silvaco)
- PSPICE  
TCLSPICE  
NGSPICE



# Иерархический подход к проектированию

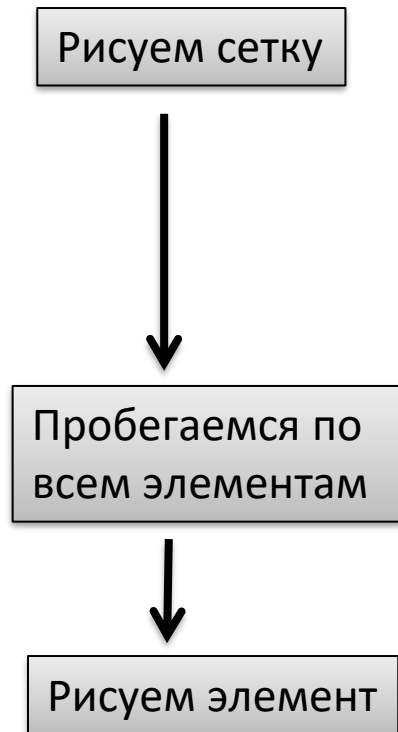
The image displays three screenshots of the SymicaDE Free Edition software interface, illustrating a hierarchical design approach for a NOT gate.

**Top Left Screenshot:** Shows a transistor-level schematic of a NOT gate. The input is labeled 'X' and the output is 'Q'. The circuit consists of two MOSFETs: a PMOS transistor (M0) and an NMOS transistor (M3). Parameters for M0 are: `model=p`, `w=1.4u`, `l=300n`, `m=1`. Parameters for M3 are: `model=n`, `w=500n`, `l=340n`, `m=1`. The PMOS is connected to `VDD!` and the NMOS is connected to `gnd`.

**Top Middle Screenshot:** Shows a hierarchical symbol for the NOT gate. The input is 'X' and the output is 'Q'. The symbol is labeled with `[@instanceName]` and `[@partName]`. The library manager on the left lists components under the 'SHA' library, including `NOTH`.

**Bottom Right Screenshot:** Shows a more complex schematic with multiple NOT gates and other logic components. The input is 'X' and the output is 'Q'. The circuit includes several NOT gates (labeled 11, 12, 14, 17, 18) and other components like `NAND2H`, `NOR2H`, and `RSTH`. The library manager on the left lists components under the 'SHA' library, including `CMP2H`, `NAND2H`, `NOR2H`, `NOTH`, `OY2H`, `PUL`, `REF1H`, `RSTH`, and `SHAH`.

## Отрисовка схематика: что можно улучшить? (1)



```
for(int y = 0; y < window.height; y += step)
  for(int x = 0; x < window.width; x += step)
    SetPixel(hDC, x, y, RGB(0, 0, 255));
```

```
for(int y = 0; y < window.height; y += step)
  for(int x = 0; x < window.width; x += step)
    SetPixel(hDC,
      x*zoom,
      y*zoom,
      RGB(0, 0, 255));
```

```
for(int y = 0; y < window.height; y += step)
  for(int x = 0; x < window.width; x += step)
    SetPixel(hDC,
      x*zoom + dx,
      y*zoom + dy,
      RGB(0, 0, 255));
```

## Отрисовка схематика: что можно улучшить? (2)

Рисуем сетку



Пробегаемся по  
всем элементам



Рисуем элемент

Рисуем сетку



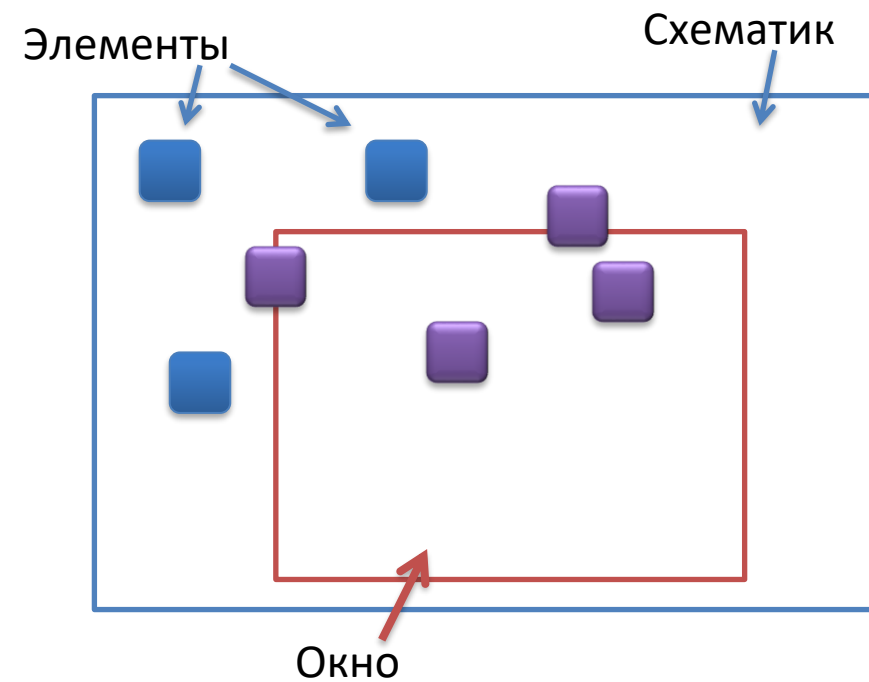
Пробегаемся по всем элементам



Определяем видимость элемента



Рисуем элемент



## История симулятора SPICE: симулятор Cancer

1970 – университет Беркли, США



Лоренс Найджел  
(Laurence W. Nagel)



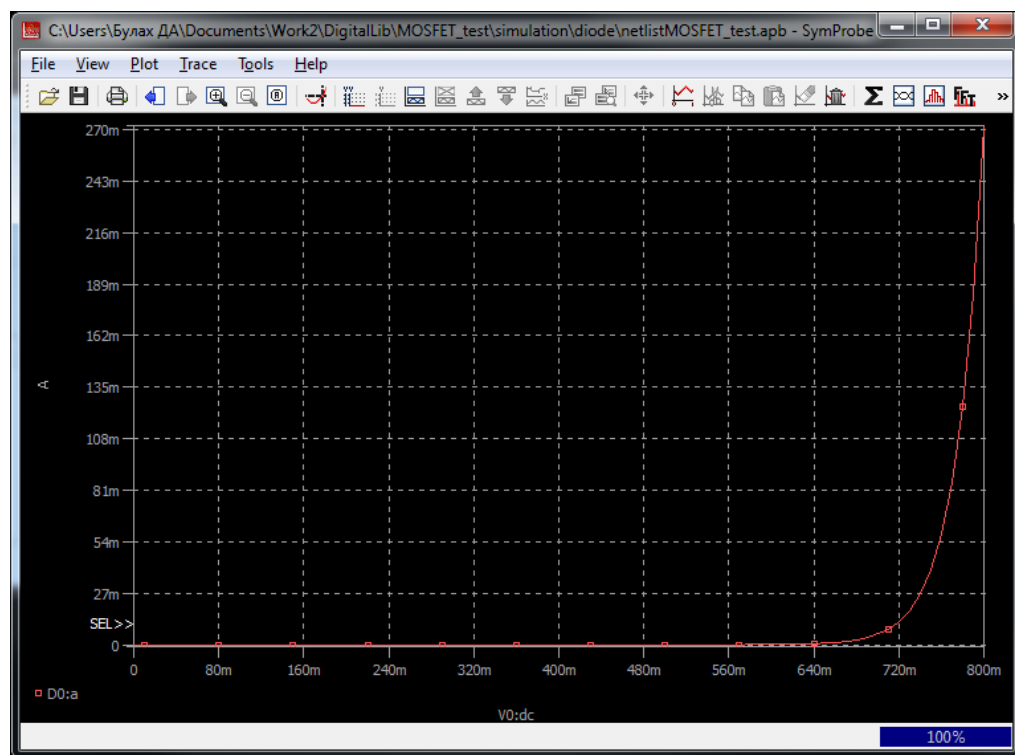
Рон Ропер  
(Ron Rohrer)

**CANCER** - Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation

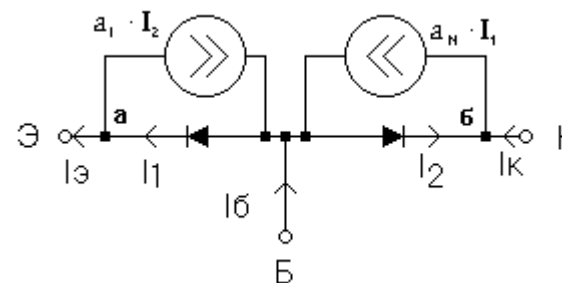
Выполняет AC, DC и TRAN анализ, написан на языке FORTRAN

## Симулятор Cadence: модели элементов

Компоненты: пассивные (R, C)  
диод (уравнения Шокли)  
биполярный транзистор (схема Эберса-Молла)



$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\frac{U_d}{n\varphi_t}} - 1 \right)$$







## Симулятор Cancer: представление результатов моделирования

```
*** id-vds curve temp=0 nmos w=50 l=0.4 dbp011 ***  
*** dc transfer curves tnom= 25.000 temp= 25.000  
*****
```

x

volt	current nmos
0.00000	1.0000p
0.50000	42.3973u
1.00000	80.8944u
1.50000	114.1583u
2.00000	132.4595u
2.50000	136.4053u
3.00000	138.5470u
3.50000	140.3573u
4.00000	142.0558u
4.50000	143.7045u

y

```
***** job concluded
```

## История симулятора SPICE: симуляторы SPICE1, SPICE2

**SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis**

**1973, 1975** – университет Беркли, США



Дональд Педересен  
(Donald O. Pedersen)



Лоренс Найджел  
(Laurence W. Nagel)



IEEE Donald O. Pederson Award in Solid-State  
Circuits

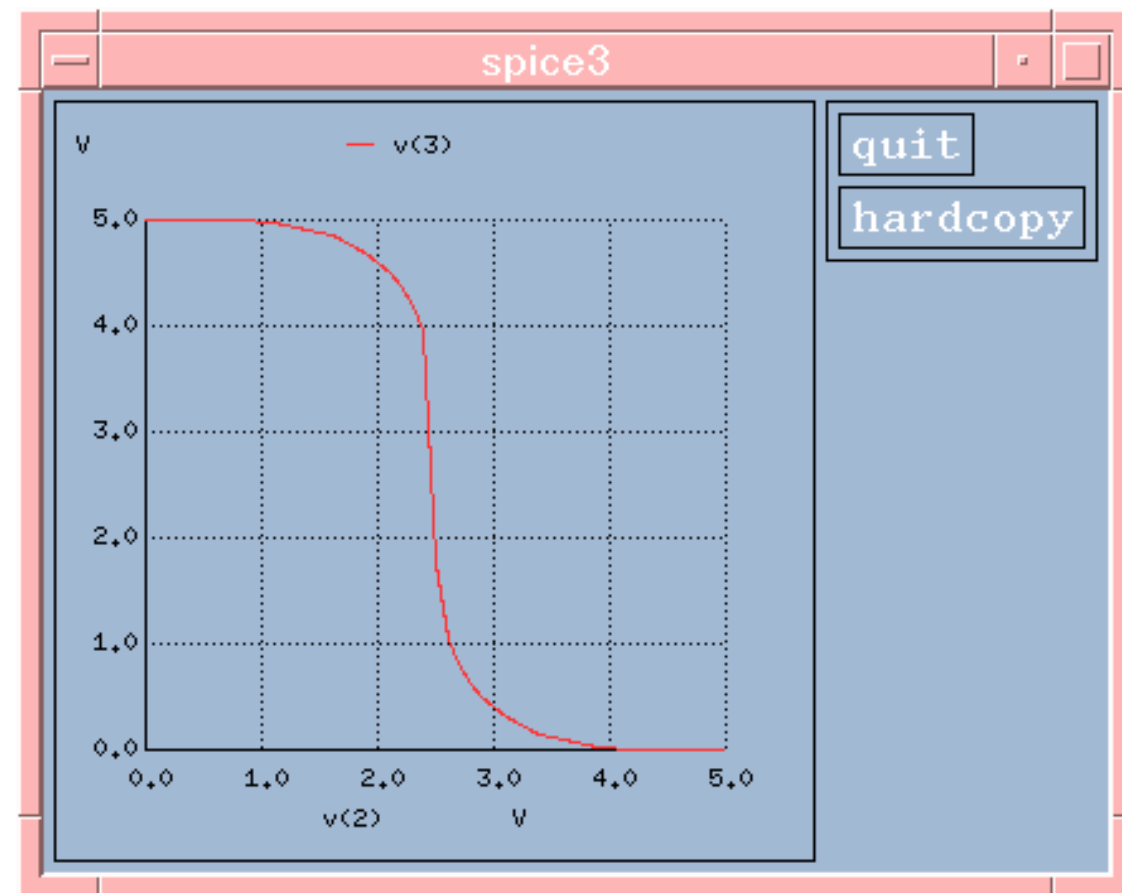
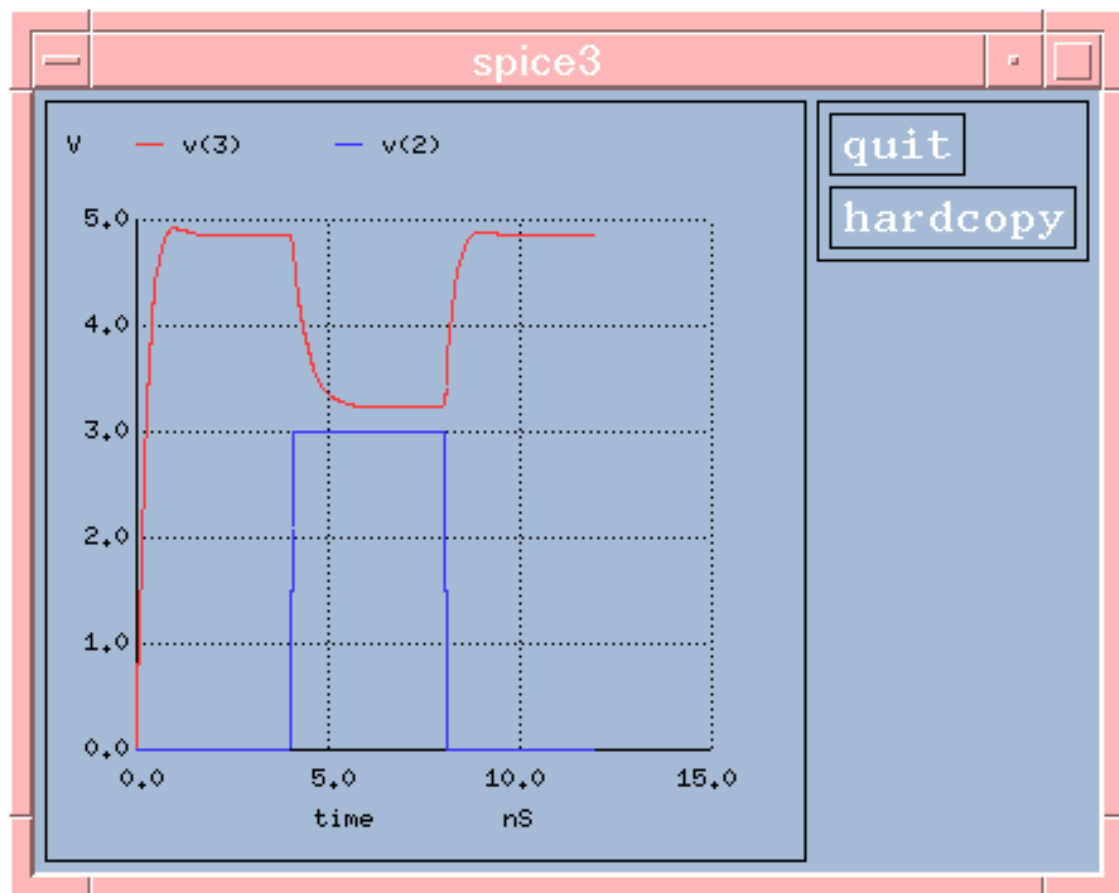
Компоненты: биполярный транзистор (схема Гуммеля-Пуна)  
МОП транзистор

Методы: Методы трапеций и Гира (SPICE2),  
Модифицированный МУП

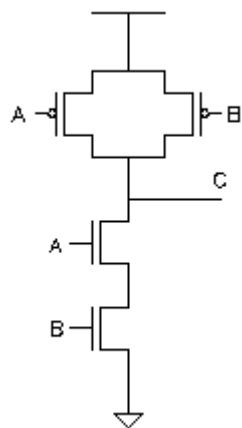
## История симулятора SPICE: симулятор SPICE3

1985 год

Код полностью переписан на языке C, добавлен графический постпроцессор.



## Индивидуальные и групповые параметры элементов



Индивидуальные параметры

Групповые параметры

```
M1 3 2 1 0 NMOS L=1u W=6u
```

```
.MODEL NFET NMOS LEVEL=2  
+ VTO=-1.44  
+ KP=8.64E-6 NSUB=1E17  
+ TOX=20n
```

## Использование моделей в нетлистах

\* CMOS Inverter

```
Vin 1 0 pulse(0v 5v 0ns 5ns 5ns 48ns 120ns)
```

```
Vdd 2 0 5v
```

```
m1 3 1 0 0 nmos1 L=2.5u W=5u AD=1.0e-11 AS=1.0e-11
```

```
m2 3 1 2 2 pmos1 L=2.5u W=15u AD=3.0e-11 AS=3.0e-11
```

```
CL 3 0 100fF
```

```
.model nmos1 nmos (LEVEL=2, UO=150, VTO=1.4581,  
+ GAMMA=1.8658, PHI=0.7974, KP=1.0354e-5 ,LAMBDA=0.02,  
+ XJ=0.2u, LD=0.2u, PB=0.9939, NSUB=5e16, NSS=2e10,  
+ TOX=50n, TPG=+1)
```

```
.model pmos1 pmos (LEVEL=2, UO=316.67, VTO=-1.5488,  
+ GAMMA=1.8658, PHI=0.7974, KP=2.1860e-5, LAMBDA=0.02,  
+ XJ=0.2u, LD=0.2u, PB=0.9939, NSUB=5e16, NSS=2e10,  
+ TOX=50nm, TPG=+1)
```

```
.probe v(1) v(3)
```

```
.tran 10n 200n
```

```
.end
```



## Сложность моделей

```
.MODEL nmos1 nmos LEVEL=2 UO=150 VTO=1.4581 GAMMA=1.8658 PHI=0.7974 KP=1.0354e-5 LAMBDA=0.02 XJ=0.2u LD=0.2u  
+ PB=0.9939 NSUB=5e16 NSS=2e10 TOX=50n TPG=+1
```

```
.MODEL CMOSN NMOS LEVEL=3 PHI=0.700000 TOX=9.6000E-09 XJ=0.200000U TPG=1 VTO=0.6566 DELTA=6.9100E-01 LD=4.7290E-08  
+ KP=1.9647E-04 UO=546.2 THETA=2.6840E-01 RSH=3.5120E+01 GAMMA=0.5976 NSUB=1.3920E+17 NFS=5.9090E+11  
+ VMAX=2.0080E+05 ETA=3.7180E-02 KAPPA=2.8980E-02 CGDO=3.0515E-10 CGSO=3.0515E-10 CGBO=4.0239E-10 CJ=5.62E-04  
+ MJ=0.559 CJSW=5.00E-11 MJSW=0.521 PB=0.99 XW=4.108E-07
```

```
.MODEL CMOSN NMOS LEVEL=49 VERSION=3.1 TNOM=27 TOX=4.1E-9 XJ=1E-7 NCH=2.3549E17  
+ VTH0=0.3618397 K1=0.5916053 K2=3.225139E-3 K3=1E-3 K3B=2.3938862 W0=1E-7  
+ NLX=1.776268E-7 DVT0W=0 DVT1W=0 DVT2W=0 DVT0=1.3127368 DVT1=0.3876801  
+ DVT2=0.0238708 U0=256.74093 UA=-1.585658E-9 UB=2.528203E-18 UC=5.182125E-11  
+ VSAT=1.003268E5 A0=1.981392 AGS=0.4347252 B0=4.989266E-7 B1=5E-6  
+ KETA=-9.888408E-3 A1=6.164533E-4 A2=0.9388917 RDSW=128.705483 PRWG=0.5  
+ PRWB=-0.2 WR=1 WINT=0 LINT=1.617316E-8 XL=0 XW=-1E-8 DWG=-5.383413E-9  
+ DWB=9.111767E-9 VOFF=-0.0854824 NFACTOR=2.2420572 CIT=0 CDSC=2.4E-4 CDSCD=0  
+ CDSCB=0 ETA0=2.981159E-3 ETAB=9.289544E-6 DSUB=0.0159753 PCLM=0.7245546  
+ PDIBLC1=0.1568183 PDIBLC2=2.543351E-3 PDIBLCB=-0.1 DROUT=0.7445011 PSCBE1=8E10  
+ PSCBE2=1.876443E-9 PVAG=7.200284E-3 DELTA=0.01 RSH=6.6 MOBMOD=1 PRT=0 UTE=-1.5  
+ KT1=-0.11 KT1L=0 KT2=0.022 UA1=4.31E-9 UB1=-7.61E-18 UC1=-5.6E-11 AT=3.3E4 WL=0  
+ WLN=1 WW=0 WWN=1 WWL=0 LL=0 LLN=1 LW=0 LWN=1 LWL=0 CAPMOD=2 XPART=0.5  
+ CGDO=4.91E-10 CGSO=4.91E-10 CGBO=1E-12 CJ=9.652028E-4 PB=0.8 MJ=0.3836899  
+ CJSW=2.326465E-10 PBSW=0.8 MJSW=0.1253131 CJSWG=3.3E-10 PBSWG=0.8  
+ MJSWG=0.1253131 CF=0 PVTH0=-7.714081E-4 PRDSW=-2.5827257 PK2=9.619963E-4  
+ WKETA=-1.060423E-4 LKETA=-5.373522E-3 PU0=4.5760891 PUA=1.469028E-14  
+ PUB=1.783193E-23 PVSAT=1.19774E3 PETA0=9.968409E-5 PKETA=-2.51194E-3
```

## SPICE-подобные нетлисты



```
* SPICE netlist written by S-Edit Win32 7.00
* Written on Aug 30, 2008 at 11:36:09
* Waveform probing commands
.probe
.options probefilename="Nand2.dat"
+ probetopmodule="Module0"
+ probesdbfile="C:\udo\Nand2.sdb"
* Main circuit: Module0
M1 outp b N2 Gnd Nh L=.15u W=.45u AD=.3375p PD=2.4u AS=.3375p PS=2.4u
M2 N2 a Gnd Gnd Nh L=.15u W=.45u AD=.3375p PD=2.4u AS=.3375p PS=2.4u
M3 outp a Vdd Vdd Ph L=.15u W=.45u AD=66p PD=2.4u AS=.3375p PS=2.4u
M4 outp b Vdd Vdd Ph L=.15u W=.45u AD=.3375p PD=2.4u AS=.3375p PS=2.4u
v5 b Gnd bit({01011} pw=100n on=1.0 off=0.0 rt=.10n ft=.10n delay=0
+ lt=100n ht=100n)
v6 a Gnd bit({01101} pw=100n on=1.0 off=0.0 rt=.10n ft=.10n delay=0
+ lt=100n ht=100n)
vdd vdd gnd 1
.include dual.md
.tran .1n 800n
.power 100n 200n
.print tran a b outp
.END
```

## Не SPICE-подобные нетлисты

```
xterm
// Default Spectre Simulation run title card.
// Generated for: spectre
// Generated on: Feb 13 22:53:16 2001
// Design library name: ELE462
// Design cell name: inverter
// Design view name: schematic
simulator lang=spectre
global 0 VDD! GND!

// Library name: ELE462
// Cell name: inverter
// View name: schematic
P0 (inv_out inv_in VDD! VDD!) ami06P w=1.5u l=600n as=2.25e-12 ad=2.25e-12 \
    ps=6u pd=6u m=1 region=sat
N0 (inv_out inv_in GND! GND!) ami06N w=1.5u l=600n as=2.25e-12 ad=2.25e-12 \
    ps=6u pd=6u m=1 region=sat

// Spectre Source Statements

// Spectre Analyses and Output Options Statements

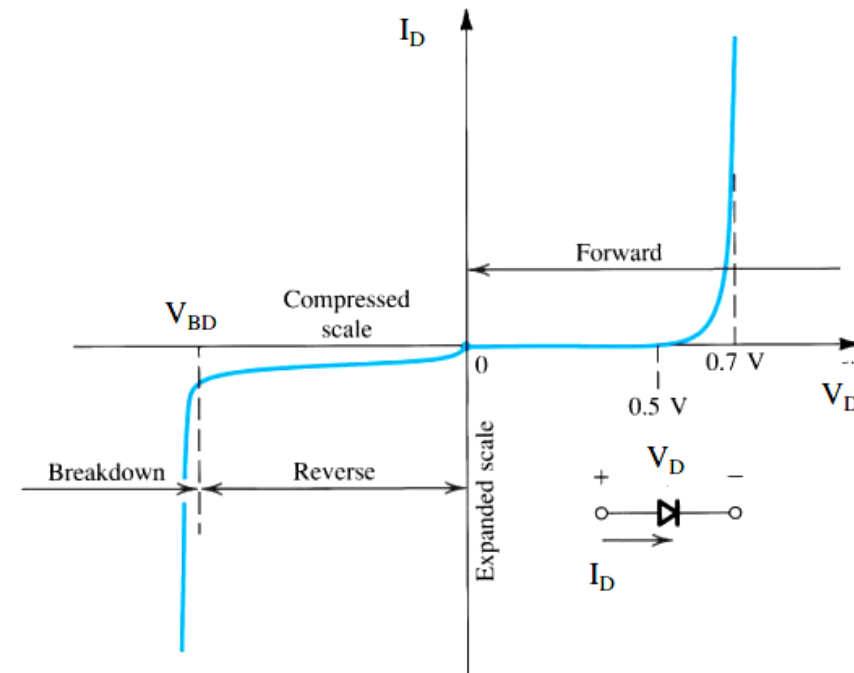
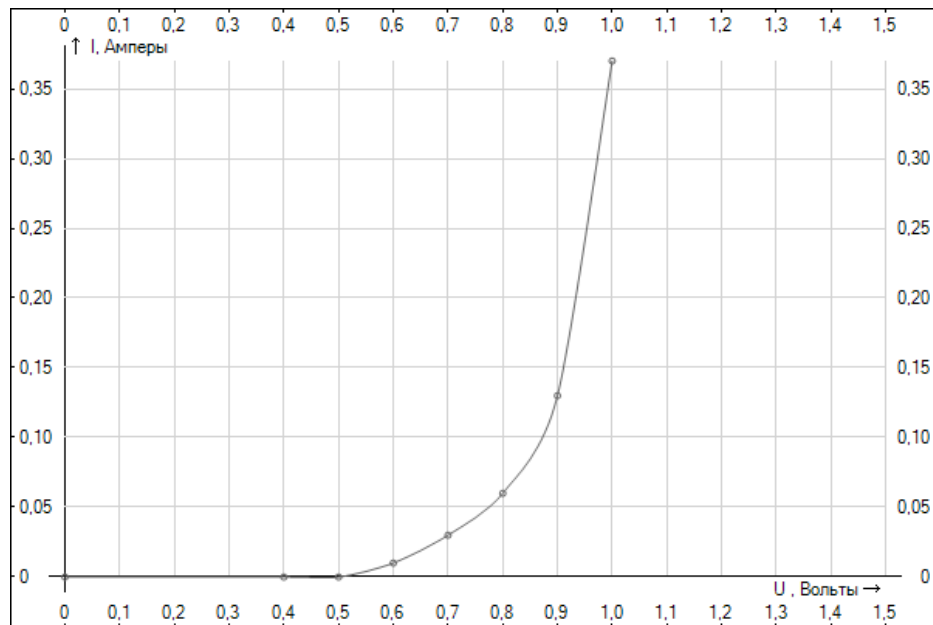
// Output Options
simOptions options
+   reltol = 1.00000000E-03
+   vabstol = 1.00000000E-06
+   iabstol = 1.00000000E-12
+   temp = 27
+   save = allpub
+   currents = selected

// Analyses
// dc1 dc oppoint=logfile homotopy=all
tran1 tran stop=1 errpreset=moderate

// End of Netlist
```



## Сложность моделей схемотехнических элементов: диод



$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\frac{U_d}{n \cdot \varphi_t}} - 1 \right)$$

$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\frac{U_d}{n \cdot \varphi_t}} - 1 \right) + U_d \cdot GMIN,$$

при  $U_d \geq -5 \cdot n \cdot \varphi_t$

$$I_D = -I_0 + U_d \cdot GMIN,$$

при  $U_d < -5 \cdot n \cdot \varphi_t$

$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{-\left( \frac{U_{BD} + U_D}{n \cdot \varphi_t} \right)} - 1 + \frac{U_d}{n \cdot \varphi_t} \right),$$

при  $U_d < U_{BD}$

## Сложность моделей схмотехнических элементов: резистор

Описание резистора на языке симулятора SPICE:

```
RXXXXXXX N1 N2 VALUE
```

Пример описания:

```
R1 1 2 100
```

```
RC1 12 17 1K
```

Полный вариант описания резистора на языке симулятора SPICE:

```
RXXXXXXX N1 N2 <VALUE> <MNAME> <L=LENGTH> <W=WIDTH> <TEMP=T>
```

$$R = RSH \cdot \frac{L - NARROW}{W - NARROW}$$

Примеры описания:

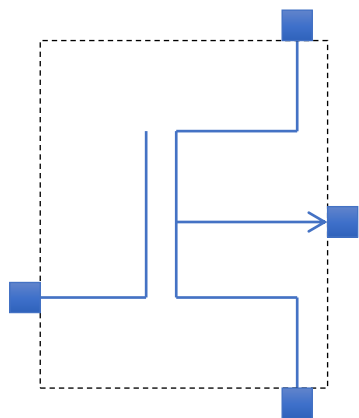
```
RLOAD 2 10 10K
```

```
RMOD 3 7 RMODEL L=10u W=1u
```

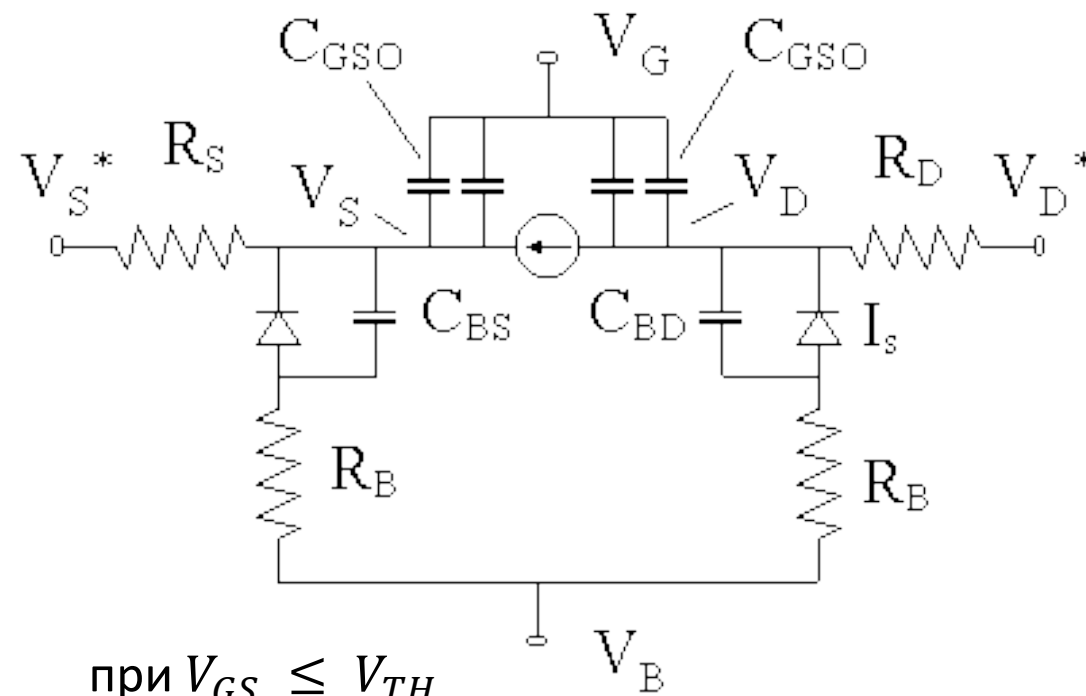
$$R(T) = T(T_0) \cdot [1 + TC_1 \cdot (T - T_0) + TC_2 \cdot (T - T_0)^2]$$

name	parameter	units	default	example
TC1	first order temperature coeff.	$\Omega/C$	0.0	-
TC2	second order temperature coeff.	$\Omega/C^2$	0.0	-
RSH	sheet resistance	$\Omega/q$	-	50
DEFW	default width	meters	1.e-6	2.e-6
NARROW	narrowing due to side etching	meters	0.0	1.e-7
TNOM	parameter measurement temperature	C	27	50

## Сложность моделей схемотехнических элементов: транзистор



Компактная модель МДП-транзистора:



при  $V_{GS} \leq V_{TH}$

при  $V_{GS} - V_{TH} \leq V_{DS}$

при  $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$

$$I_{DS} = 0$$

$$I_D = \frac{KP}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + LAMBDA \cdot V_{DS}),$$

$$I_D = \frac{KP}{2} \frac{W}{L_{eff}} V_{DS} (2(V_{GS} - V_{TH}) - V_{DS}) (1 + LAMBDA \cdot V_{DS}),$$

## Компонентные уравнения основных элементов

Резистор:

$$I_R = \frac{\varphi_{plus} - \varphi_{minus}}{R}$$

Конденсатор:

$$I_C = C \frac{d(\varphi_{plus} - \varphi_{minus})}{dt}$$

Индуктивность:

$$I_C = \frac{1}{L} \int (\varphi_{plus} - \varphi_{minus}) dt$$

Диод:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{\varphi_{anode} - \varphi_{cathode}}{n\varphi_t}} - 1 \right)$$

# Топологические уравнения (1)

Метод контурных токов

Метод узловых потенциалов

Метод переменных состояния



Метод узловых потенциалов



Метод узловых потенциалов — формальный метод расчета электрических цепей путём записи системы линейных алгебраических уравнений, в которой неизвестными являются потенциалы в узлах цепи. В результате применения метода определяются потенциалы во всех узлах цепи, а также, при необходимости, силу тока во всех ветвях. [Википедия](#)

Метод контурных токов



Метод контурных токов — метод сокращения размерности системы уравнений, описывающей электрическую цепь. Метод контурных токов — метод расчёта электрических цепей, при котором за неизвестные принимаются токи в контурах, образованных некоторым условным делением электрической цепи. [Википедия](#)

## Топологические уравнения (2)

Метод узловых потенциалов

$$Y \cdot \vec{\varphi} + \vec{I} = \vec{0} \quad \longrightarrow \quad Y \cdot \vec{\varphi} = -\vec{I}$$

Проводимость резистора:

$$y_R = \frac{1}{R}$$

Формула расчёта проводимости:

$$y = \frac{\partial I}{\partial \varphi}$$

Проводимость диода:

$$y_d = \frac{I_0}{n\varphi_T} e^{\frac{U_D}{n\varphi_T}}$$

## Как работает симулятор SPICE?

Математическая модель схемы:  
 $F(x, \dot{x}, t) = 0$

Алгебраизация математической  
модели схемы:  
 $F(x) = 0$

- Метод трапеций
- Метод Гира
- Методы Эйлера

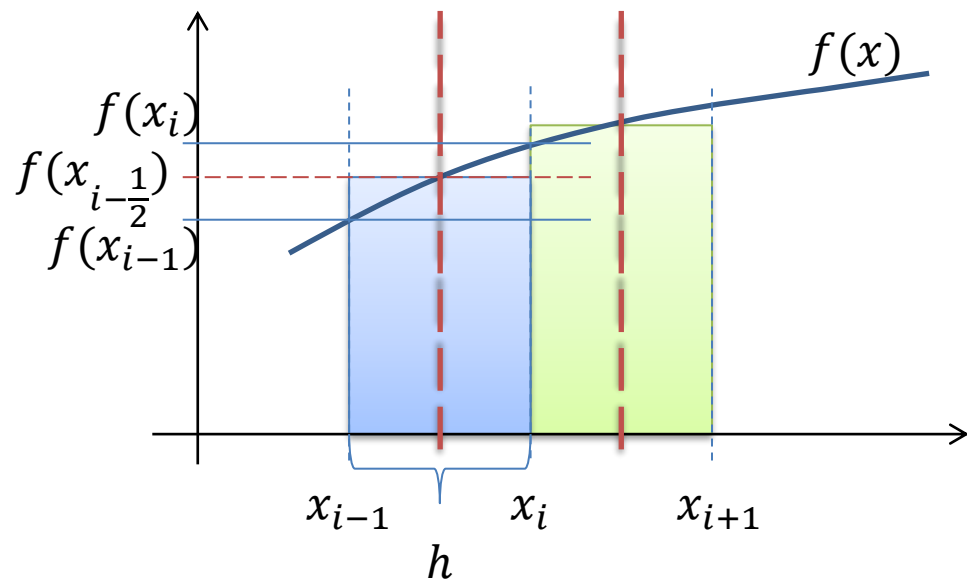
Метод  
Ньютона-Рафсона

Линеаризация математической  
модели схемы:  
 $Yx + I = 0$

Метод Гаусса  
Метод Гаусса-Зейделя

Решение математической  
модели схемы:  
 $Yx + I = 0$

## Методы алгебраизации: метод прямоугольников



$$I = \int_a^b f(x) dx$$



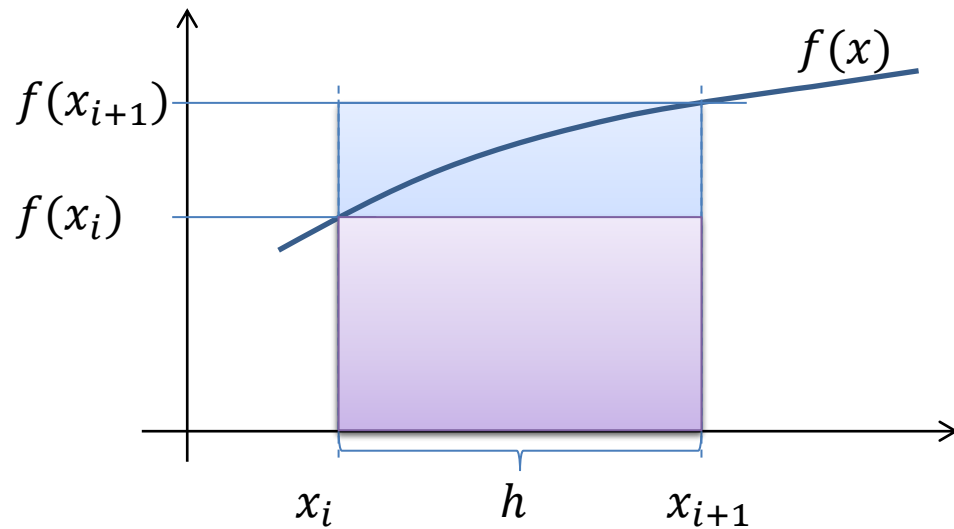
$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx \approx f(x_{i-\frac{1}{2}}) \cdot h$$

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \approx f(x_{i+\frac{1}{2}}) \cdot h$$

$$I = \int_a^b f(x) dx \approx \sum_{i=1}^N f(x_{i-\frac{1}{2}}) \cdot h$$



## Методы алгебраизации: методы Эйлера



$$I = \int_a^b f(x) dx$$

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \approx f(x_i) \cdot h$$

$$\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \approx f(x_{i+1}) \cdot h$$

## Методы линеаризации: метод Ньютона (1)

Метод линеаризации Ньютона позволяет итерационно найти решение нелинейной функции вида:

$$f(x) = 0$$

Метод основан на разложении функции в ряд Тейлора:

$$f(x)_{x=x_n} = f(x_n) + \frac{f'(x_n)}{1!} (x - x_n) + \frac{f''(x_n)}{2!} (x - x_n)^2 + \dots$$

Помня, что мы решаем уравнение  $f(x) = 0$ , получаем:

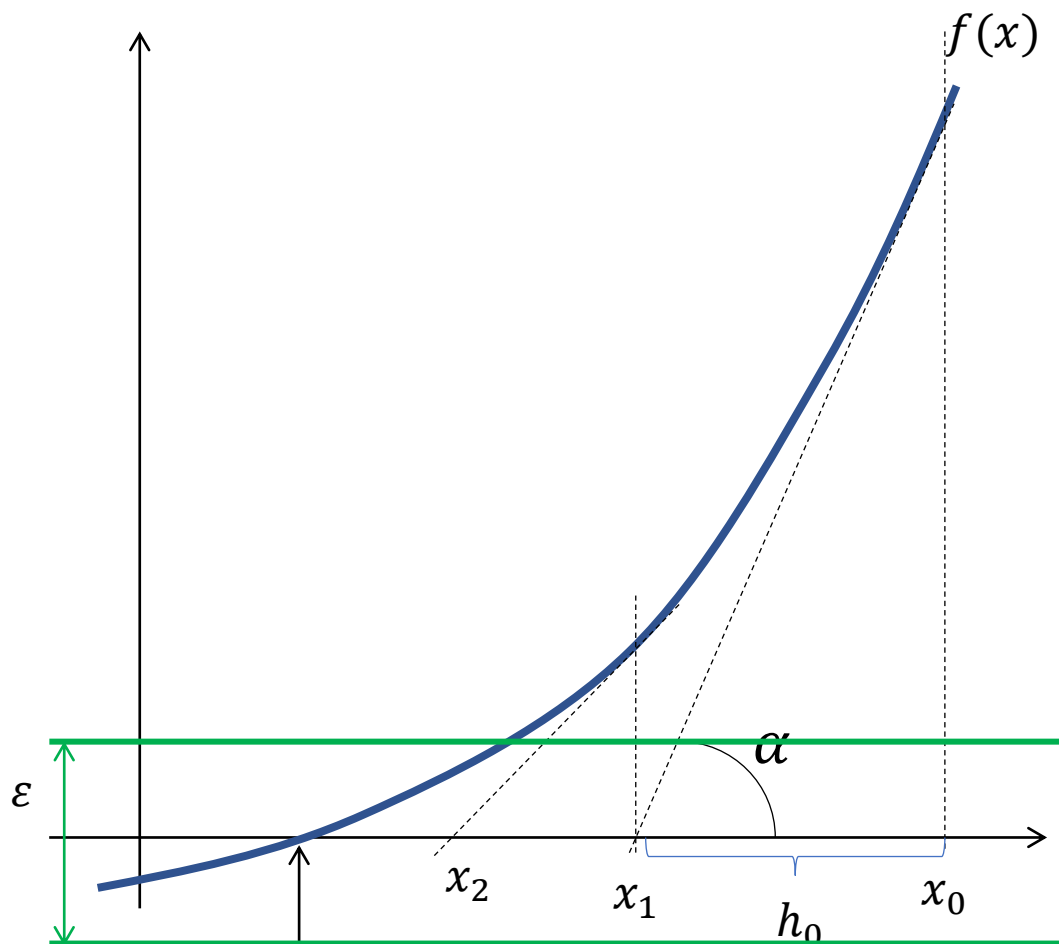
$$f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n) = 0$$

$$x = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Отсюда следует итерационная формула метода Ньютона:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

## Методы линеаризации: метод Ньютона (2)



Решение:

$$f(x) = 0$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = f'(x_0)$$

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Критерий остановки:

$$|f(x_{n+1})| < \varepsilon$$

## Методы линеаризации: метод Ньютона (3)

Для одного уравнения формула метода Ньютона имеет вид:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

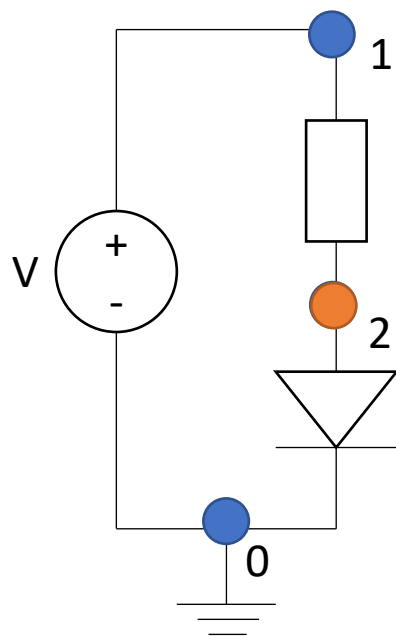
Для системы уравнений формула метода Ньютона имеет вид:

$$x_{n+1} = x_n - Я^{-1}f(x_n)$$

$$\begin{cases} f_1(x, y) \\ f_2(x, y) \end{cases} \longrightarrow \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial f_2(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial f_2(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

## Пример формирования СЛАУ по МУП для схемы

$$Y \cdot \vec{\varphi} = -\vec{I}$$



Шаг 1. Определяем количество узлов в схеме

Шаг 2. Определяем количество неизвестных узлов в схеме

Шаг 3. Составляем вектор независимых источников тока  $\vec{I}$

$$I = I_R - I_D$$

$$I = \frac{V - \varphi_2}{R} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{\varphi_2}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

Шаг 4. Составляем матрицу проводимостей  $Y$

$$Y = -\frac{1}{R} - \frac{I_0}{\varphi_T} \cdot \left( e^{\frac{\varphi_2}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

Шаг 5. Выписываем СЛАУ

$$\left[ -\frac{1}{R} - \frac{I_0}{\varphi_T} \cdot \left( e^{\frac{\varphi_2}{\varphi_T}} - 1 \right) \right] \cdot \varphi = -\left[ \frac{V - \varphi_2}{R} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{\varphi_2}{\varphi_T}} - 1 \right) \right]$$

# Методы решения СЛАУ

Методы решения СЛАУ делятся на

Прямые

Метод Гаусса  
LU-разложение  
Алгоритм Краута

$$\left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 11 \end{array} \right]$$



$$\left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{array} \right]$$

$$\begin{cases} x + y + z = 2 \\ x + 2y + 3z = 5 \\ 2x + 3y + 4z = 11 \end{cases}$$

Итерационные

Якоби  
Гаусса-Зейделя

$$\begin{aligned} x^{(k+1)} &= 2 - y^{(k)} - z^{(k)} \\ y^{(k+1)} &= \frac{1}{2} \cdot (5 - x^{(k)} - 3z^{(k)}) \\ z^{(k+1)} &= \frac{1}{4} \cdot (11 - 2x^{(k)} - 3y^{(k)}) \end{aligned}$$

## Как формируется и решается мат. модель?

Математическая модель схемы:

$$Yx + I = 0$$

В соответствии с МУП:

$Y$  – матрица узловых проводимостей,

$I$  – вектор независимых источников тока.

На каждом шаге метода интегрирования

Избавляемся от  
дифференциалов

На каждой итерации метода линеаризации

Избавляемся от  
нелинейностей

Формирование ММ

Обращение к каждому элементу схемы

**Определение вклада  
в матрицу узловых  
проводимостей**

**Определение вклада  
в вектор независимых  
источников тока**

Решение ММ

Решение математической модели

## Формирование мат. модели резистора

Имеется схема, содержащая 10 узлов.

```
double fi[10];
```

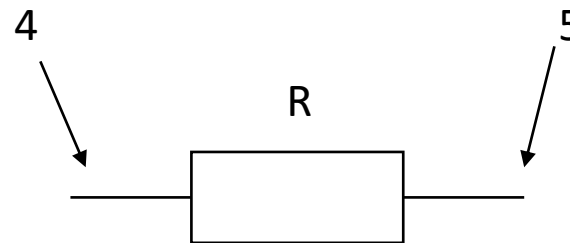
```
double I[10];
```

```
double Y[10][10];
```

```
class Resistor {  
private:  
    double R_value;  
    int    pin_plus, pin_minus;  
public:  
    double Get_I(double *I);  
    double Get_Y(double **Y);  
};
```

$$I_R = \frac{\varphi_{plus} - \varphi_{minus}}{R}$$

$$y_R = \frac{dI_R}{d\varphi} = \pm \frac{1}{R}$$





## Проблемы оригинальных методов и алгоритмов SPICE

Формирование математических моделей:

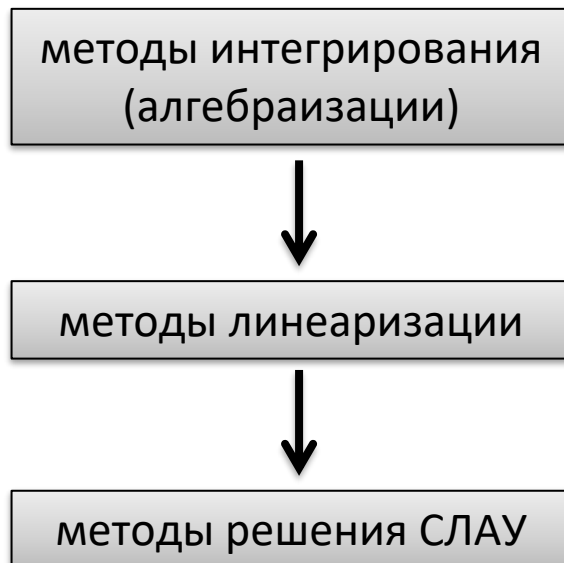
1. запись математической модели в соответствии с МУП позволяет записывать ограниченное число элементов;
2. тратится слишком много времени на формирование математической модели ИС;

Решение математических моделей:

1. методы интегрирования работают слишком медленно;
2. метод Ньютона работает слишком медленно;
3. метод Ньютона работает не всегда точно;
4. прямые методы решения не всегда могут давать правильный результат;

# Модифицированный метод узловых потенциалов: ММУП (1)

Решаем проблему с ограниченным числом элементов



Резистор:

$$I_R = \frac{\varphi_{plus} - \varphi_{minus}}{R}$$

Конденсатор:

$$I_C = C \frac{d(\varphi_{plus} - \varphi_{minus})}{dt}$$

Диод:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{\varphi_{anode} - \varphi_{cathode}}{n\varphi_t}} - 1 \right)$$

Общий вид мат. модели по МУП:

$$Y \cdot \varphi = I$$

Индуктивность:

$$I_C = \frac{1}{L} \int (\varphi_{plus} - \varphi_{minus}) dt$$

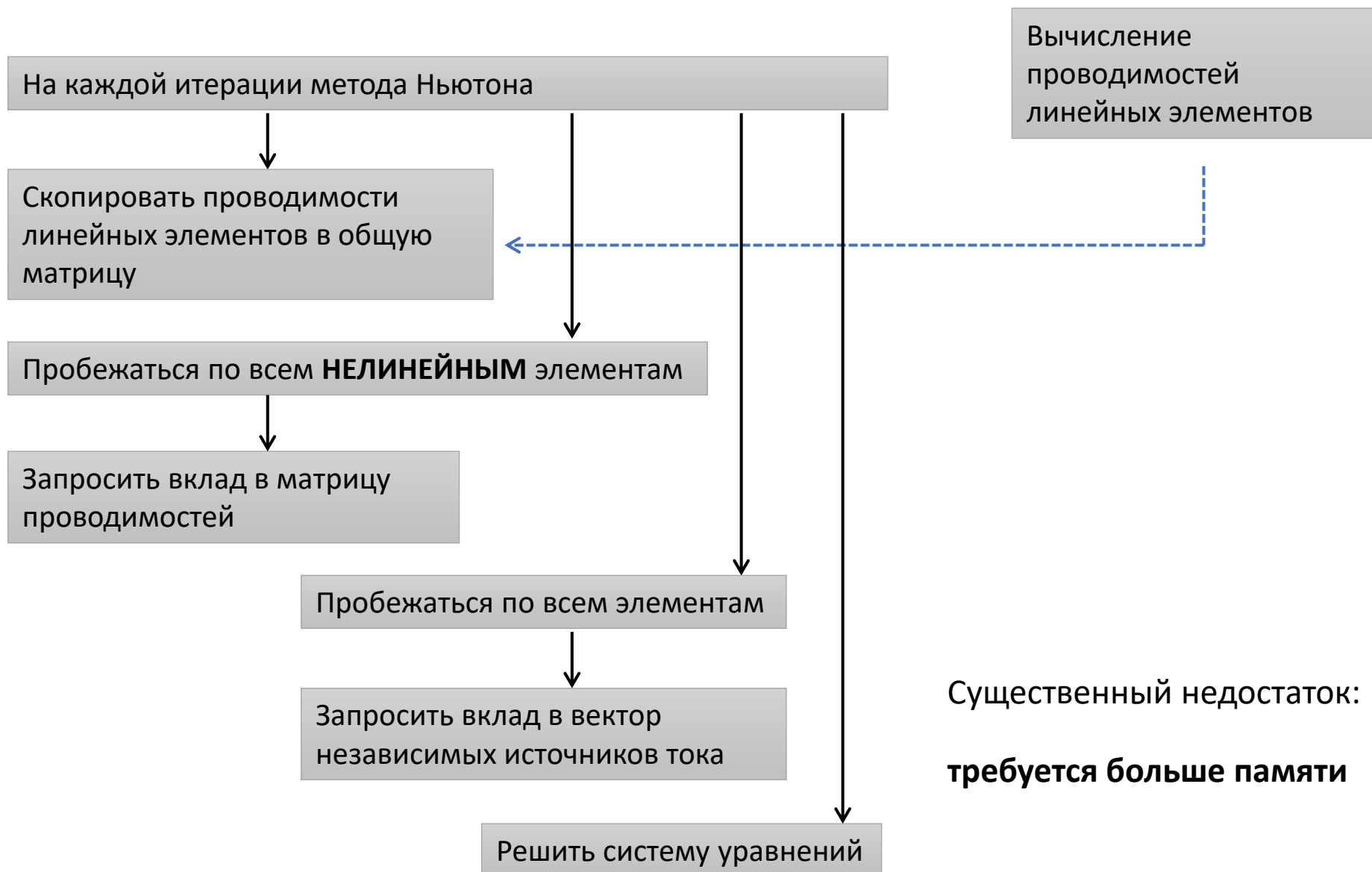
## Модифицированный метод узловых потенциалов: ММУП (2)

$$Y \cdot \vec{\varphi} = \vec{I} \quad + \quad Z \cdot \vec{j} = \vec{E}$$



$$\begin{bmatrix} Y & 0 \\ 0 & Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ E \end{bmatrix}$$

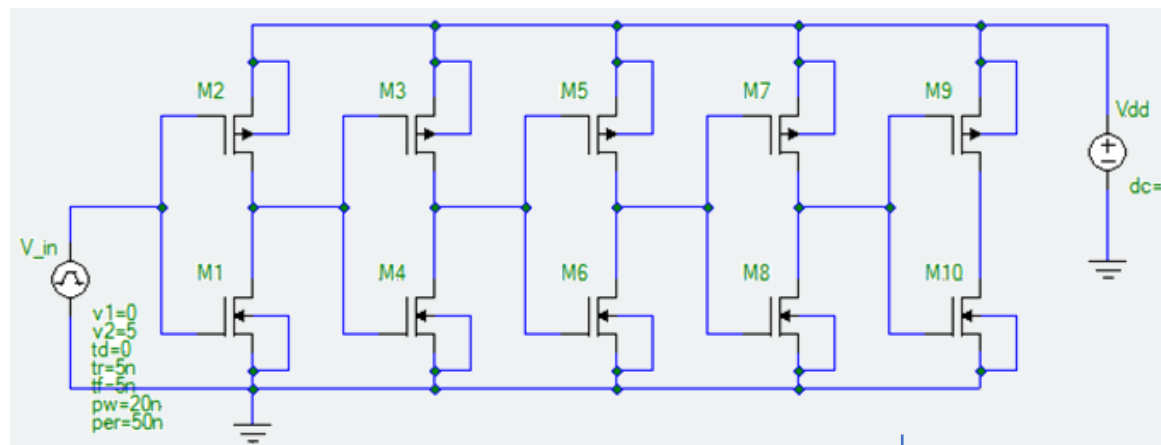
## Две матрицы проводимости



## Затраты памяти на хранение мат. модели

$$N * N + 2 * N = 2 \text{ Гб}$$

$$N \cong 16 \text{ 000 элементов}$$



$$AN = \{Y_{11}, Y_{12}, Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{32}, Y_{33}, Y_{34}, \dots\}$$

$$JA = \{1, 2, 1, 2, 3, 2, 3, 4, \dots\}$$

$$IA = \{1, 3, 6, \dots\}$$

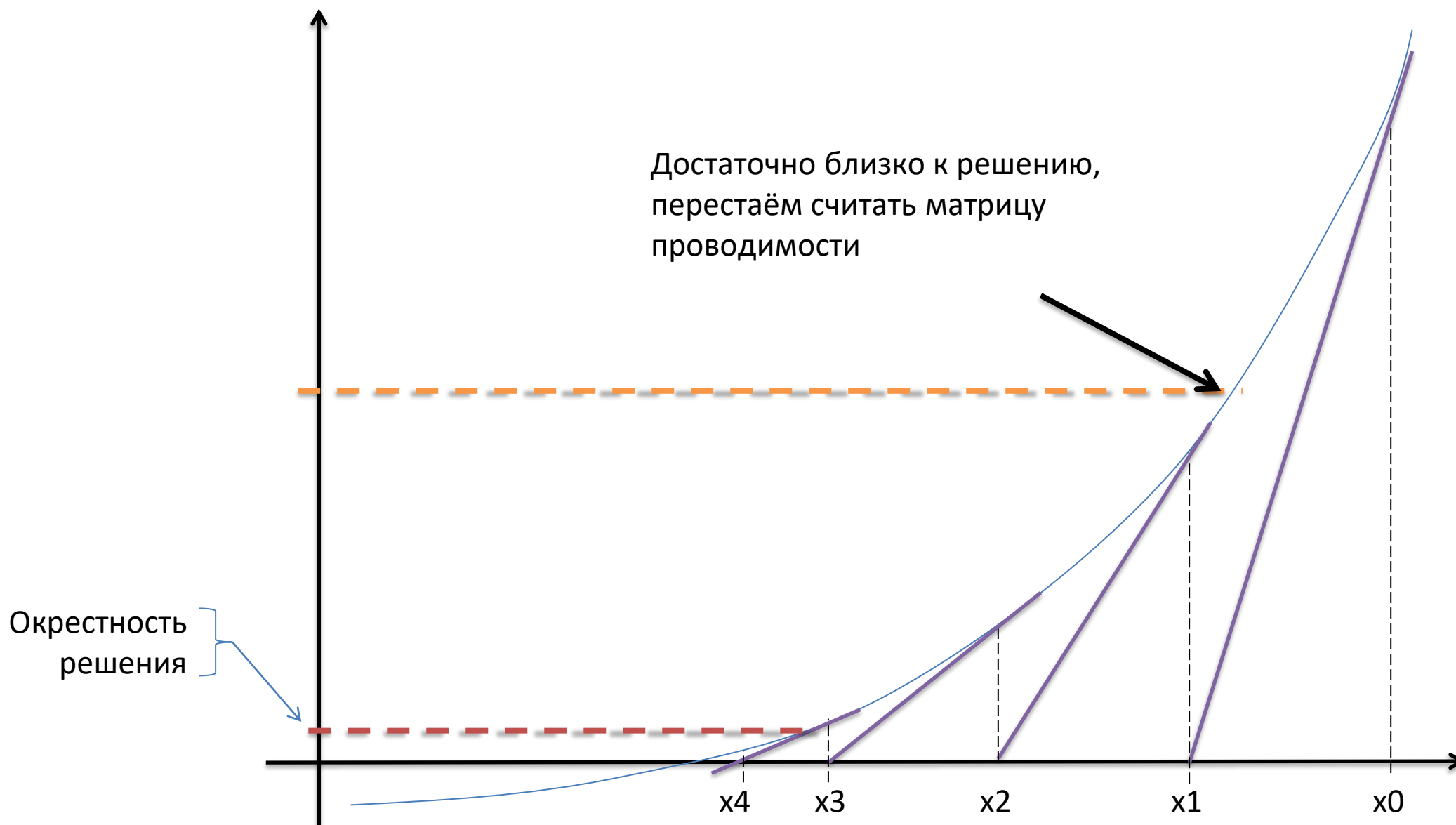
Объём памяти, требуемый  
для хранения ММ схемы  
из 5 элементов:

$$13 * 8 + 13 * 4 + 5 * 4 = 176 \text{ байт}$$

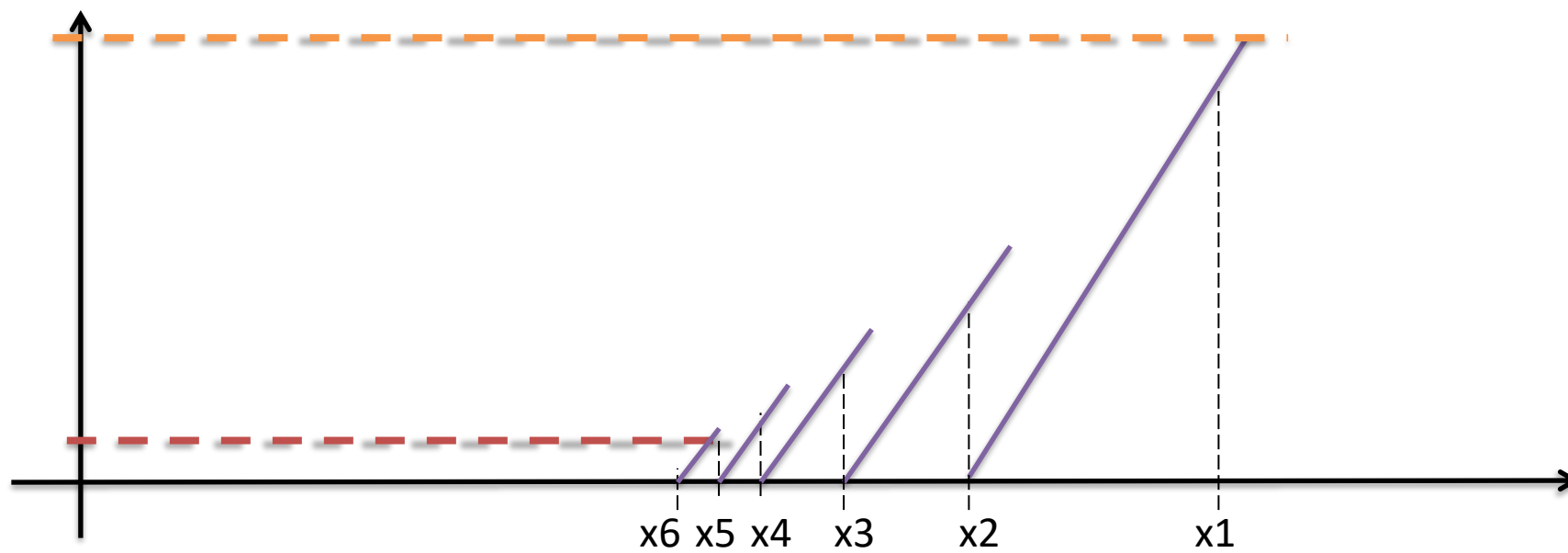
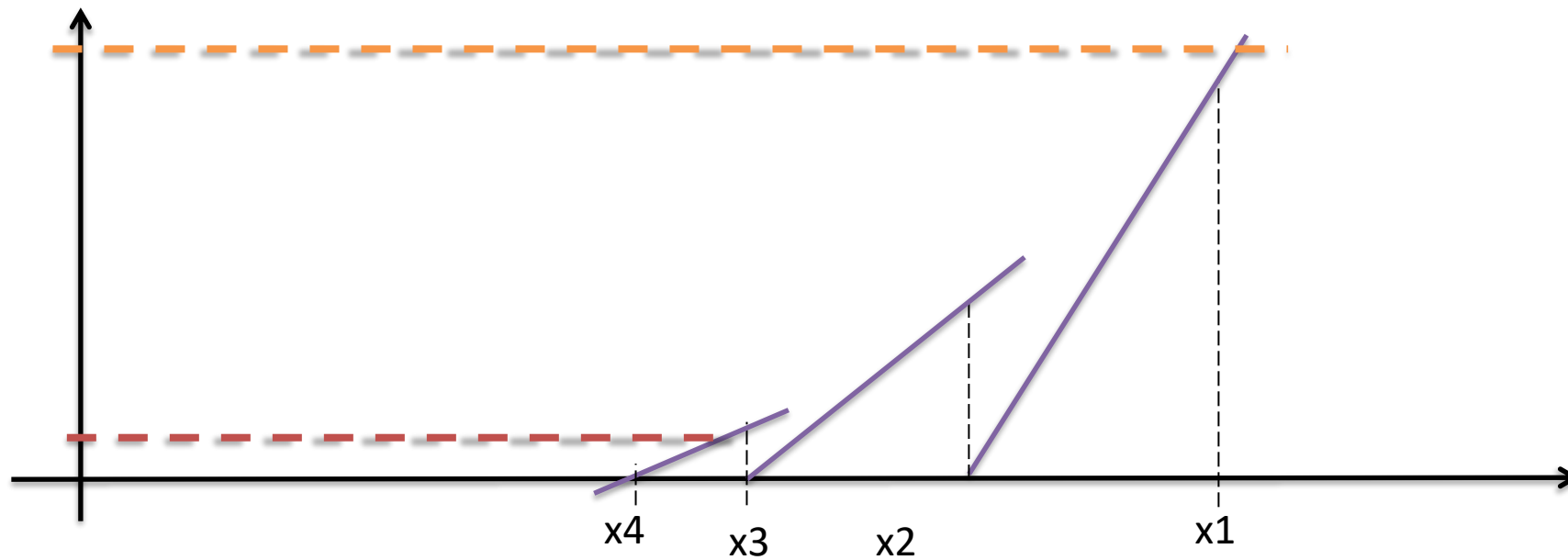
$Y_{11}$	$Y_{12}$			
$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$		
	$Y_{32}$	$Y_{33}$	$Y_{34}$	
		$Y_{43}$	$Y_{44}$	$Y_{45}$
			$Y_{54}$	$Y_{55}$

200 байт

## Огрублённый метод Ньютона (1)



## Огрублённый метод Ньютона (2)



## Повышение сходимости: метод Ньютона-Рафсона

$$x_{n+1} = x_n - Я^{-1} \cdot F(x_n)$$



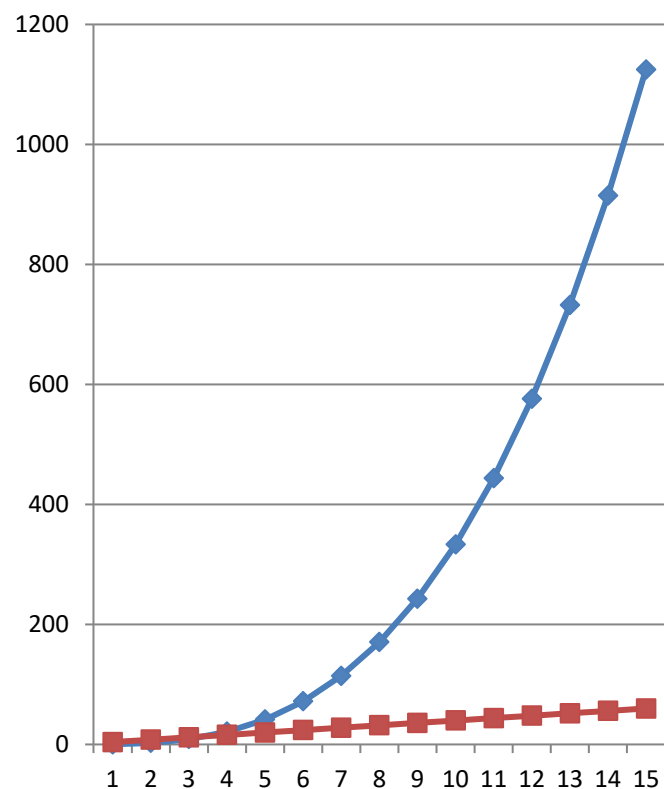
$$x_{n+1} = x_n - \alpha \cdot [Я^{-1} \cdot F(x_n)]$$



## Методы формирования и решения СЛАУ

Сложность  
формирования  
СЛАУ по МУП:

$$\sim N^2$$



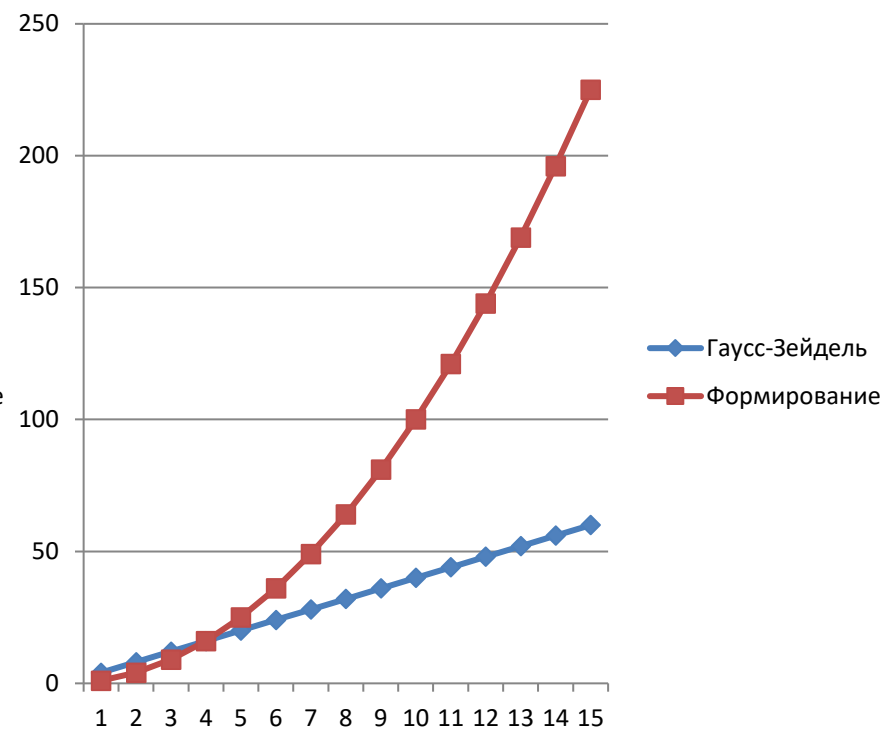
Сложность  
решения СЛАУ  
методом Гаусса:

$$\sim N^3$$

—♦— Гаусс  
—■— Формирование

Сложность решения  
СЛАУ методом  
Гаусса-Зейделя:

$$\sim K \cdot N$$



## Обусловленность систем уравнений

Пример хорошо обусловленной системы уравнений:

$$\begin{cases} 2x_1 - x_2 = 0 \\ -x_1 + 2x_2 = 3 \end{cases}$$

Решение:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1 \\ x_2 &= 2 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} 2x_1 - x_2 = 0 \\ -x_1 + 2x_2 = 3.003 \end{cases}$$

Решение:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1.001 \\ x_2 &= 2.002 \end{aligned}$$

Пример плохо обусловленной (жёсткой) системы уравнений:

$$\begin{cases} x_1 + 5x_2 = 17 \\ 15x_1 + 75.01x_2 = 255 \end{cases}$$

Решение:

$$\begin{aligned} x_1 &= 17 \\ x_2 &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} x_1 + 5x_2 = 17 \\ 15x_1 + 75.01x_2 = 255.03 \end{cases}$$

Решение:

$$\begin{aligned} x_1 &= 2 \\ x_2 &= 3 \end{aligned}$$

## Визуализация результатов моделирования: формат PSF ASCII

### HEADER

```
"PSFversion" "1.00"  
"simulator" "HSPICE"  
"runtype" "Transient Analysis"
```

### TYPE

```
"node" FLOAT DOUBLE PROP(  
"key" "node"  
)  
"branch" FLOAT DOUBLE PROP(  
"key" "branch"  
)  
"sweep" FLOAT DOUBLE
```

### SWEEP

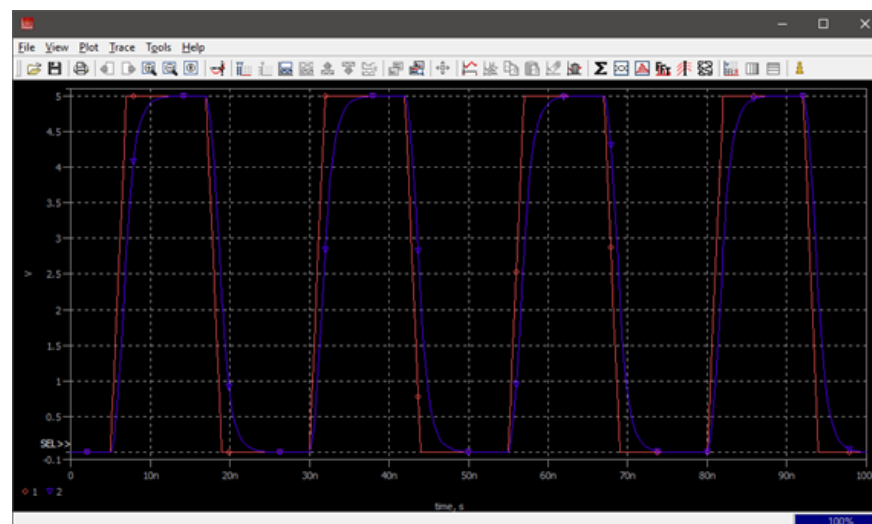
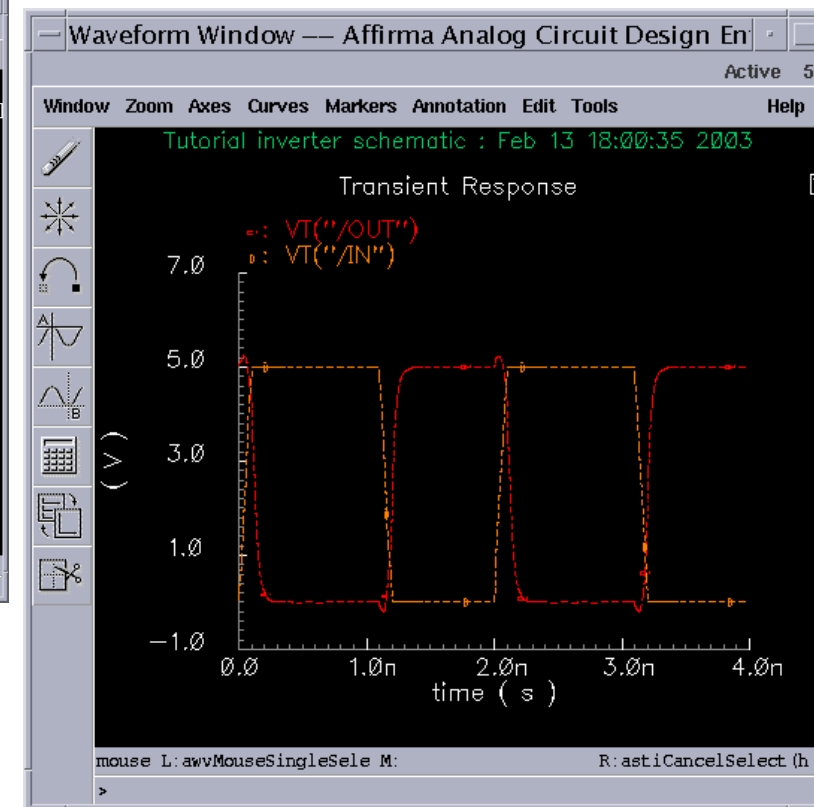
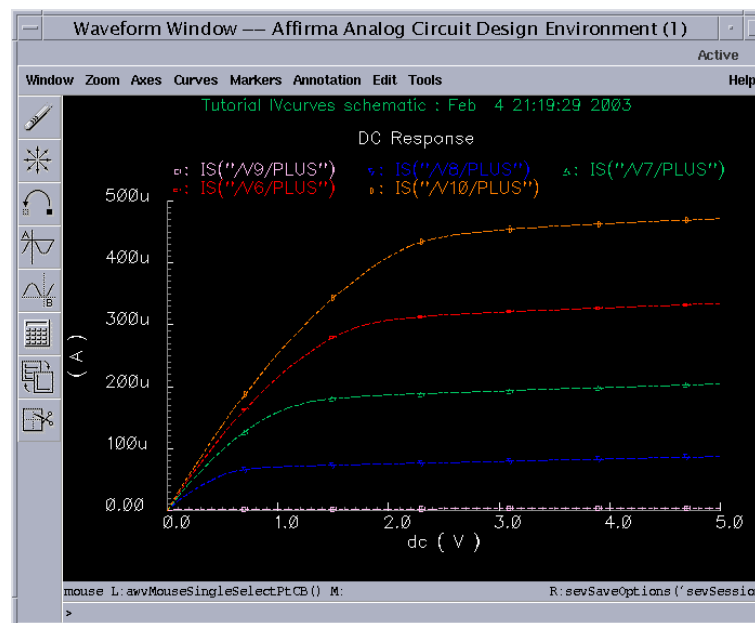
```
"time" "sweep"
```

### TRACE

```
"group" GROUP 2  
"1" "node"  
"2" "node"
```

### VALUE

```
"time" 0.000000e+00  
"group"  
0.000000e+00  
0.000000e+00  
"time" 1.000000e-09  
"group"  
0.000000e+00  
0.000000e+00  
...
```



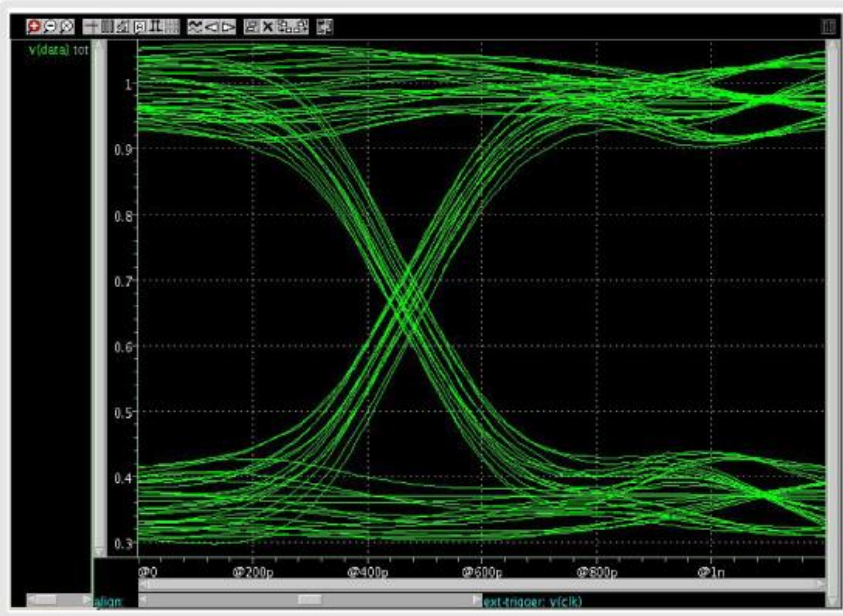
## Визуализация результатов моделирования: форматы CSV и CSDF

```
; Additional parameters:  
; Temperature (TEMP) = 2.50000000e+001  
; Temperature (TNOM) = 2.50000000e+001  
; Local inaccuracy = 9.99999700e-003  
; reltol = 1.00000000e-003  
; Acceleration level = without acceleration
```

TIME	'v(1)'	'v(2)'
0.00000000e+000	0.00000000e+000	0.00000000e+000
2.00000000e-009	0.00000000e+000	0.00000000e+000
5.00000000e-009	0.00000000e+000	0.00000000e+000
5.02386518e-009	5.96629438e-002	1.39067797e-003
5.07159553e-009	1.78988831e-001	6.88855948e-003
5.12889016e-009	3.22225398e-001	2.04634393e-002
5.18236485e-009	4.55912118e-001	3.96611966e-002
5.28931422e-009	7.23285558e-001	9.54911926e-002
5.42992725e-009	1.07481814e+000	2.01060109e-001
5.60837057e-009	1.52092642e+000	3.80746951e-001
5.81707047e-009	2.04267617e+000	6.45518006e-001
6.06470662e-009	2.66176655e+000	1.02159440e+000
6.35438100e-009	3.38595250e+000	1.52822094e+000
6.69637078e-009	4.24092695e+000	2.19562050e+000
7.00000000e-009	5.00000000e+000	2.83483203e+000
7.14454208e-009	5.00000000e+000	3.10826704e+000
7.38134698e-009	5.00000000e+000	3.50881305e+000
7.85495678e-009	5.00000000e+000	4.07983339e+000
8.25644207e-009	5.00000000e+000	4.38750412e+000
8.67525042e-009	5.00000000e+000	4.59960723e+000
9.11298514e-009	5.00000000e+000	4.74340123e+000

```
#H  
SOURCE='SYMSPICE'  
TITLE='* # file name: F:\rc'  
SUBTITLE=''  
TIME='08:37:36' DATE='9/11/2018'  
ANALYSIS='TR'  
TEMPERATURE=' 2.500000E+001'  
SWEEPVAR='TIME'  
COMPLEXVALUES='NO' FORMAT='1 VOLTSorAMPS;EFLOAT'  
XBEGIN=' 0.000000e+000' XEND=' 1.000000e-007'  
NODES=' 2'  
#N 'v(1)' 'v(2)'  
  
#C 0.00000000e+000 2 0.00000000e+000 0.00000000e+000  
#C 2.00000000e-009 2 0.00000000e+000 0.00000000e+000  
#C 5.00000000e-009 2 0.00000000e+000 0.00000000e+000  
#C 5.02386518e-009 2 5.96629438e-002 1.39067797e-003  
#C 5.07159553e-009 2 1.78988831e-001 6.88855948e-003  
#C 5.12889016e-009 2 3.22225398e-001 2.04634393e-002  
#C 5.18236485e-009 2 4.55912118e-001 3.96611966e-002  
#C 5.28931422e-009 2 7.23285558e-001 9.54911926e-002  
#C 5.42992725e-009 2 1.07481814e+000 2.01060109e-001
```

# Постобработка результатов моделирования



File Tools View Options Constants Help **cadence**

Results Dir: /fe.up.pt/user/doliveira/projects/austriamicrosystems/hit-kit-4.0/pll/Sim/AND20\_TB/spectre/config/psf

vt  vf  vdc  vs  op  var  vn  sp  vswr  hp  zm  
 it  if  idc  is  opt  mp  vn2  zp  yp  gd  data

Off  Family  Wave  Clip  New Window

Pop | M+ ME

All

1/x	cosh	frequency	iinteg	peak	sample	xval
10**x	cross	ga	imag	period_jitter	settlingTime	y**x
Rn	dB10	gac_freq	int	phase	sin	ymax
abs	dB20	gac_gain	integ	phaseMargin	sinh	ymin
acos	dBm	gainBwProd	intersect	phaseNoise	slewRate	
acosh	delay	gainMargin	ipn	psd	spectralPower	
asin	deriv	getAsciiWave	ipnVRI	psdbb	spectrum	
asinh	dft	gmax	kf	pzbode	sqrt	
atan	dftbb	gmin	ln	pzfilter	ssb	
atanh	dnl	gmsg	loadpull	real	stddev	
average	dutyCycle	gp	log10	riseTime	tan	
b1f	evmQAM	gpc_freq	lsb	rms	tangent	
bandwidth	evmQpsk	gpc_gain	lshift	rmsNoise	tanh	
clip	exp	groupDelay	mag	m	thd	
compare	eyeDiagram	gt	nc_freq	root	unityGainFreq	
compression	flip	gumx	nc_gain	s11	value	
compressionVRI	fourEval	harmonic	nf	s12	x**2	
convolve	freq	harmonicFreq	nfmin	s21	xmax	
cos	freq_jitter	histo	overshoot	s22	xmin	

status area

10 | Browser