

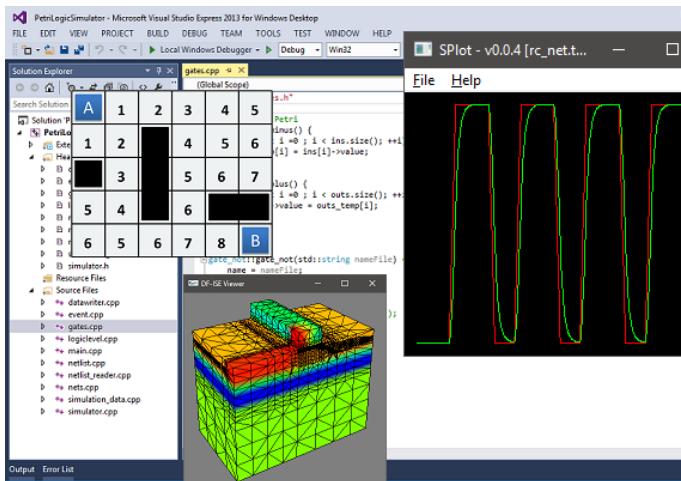


МИЭТ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Институт интегральной электроники (группы ЭН-34-35, каф. ПКИМС)

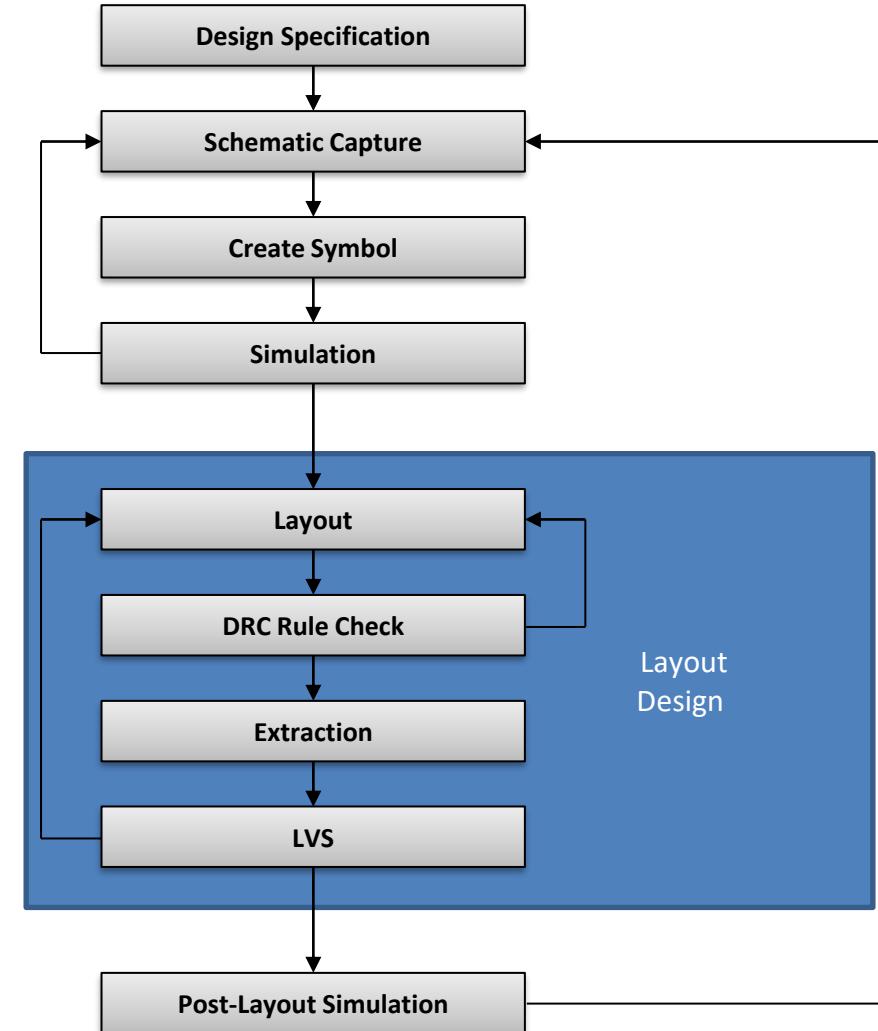
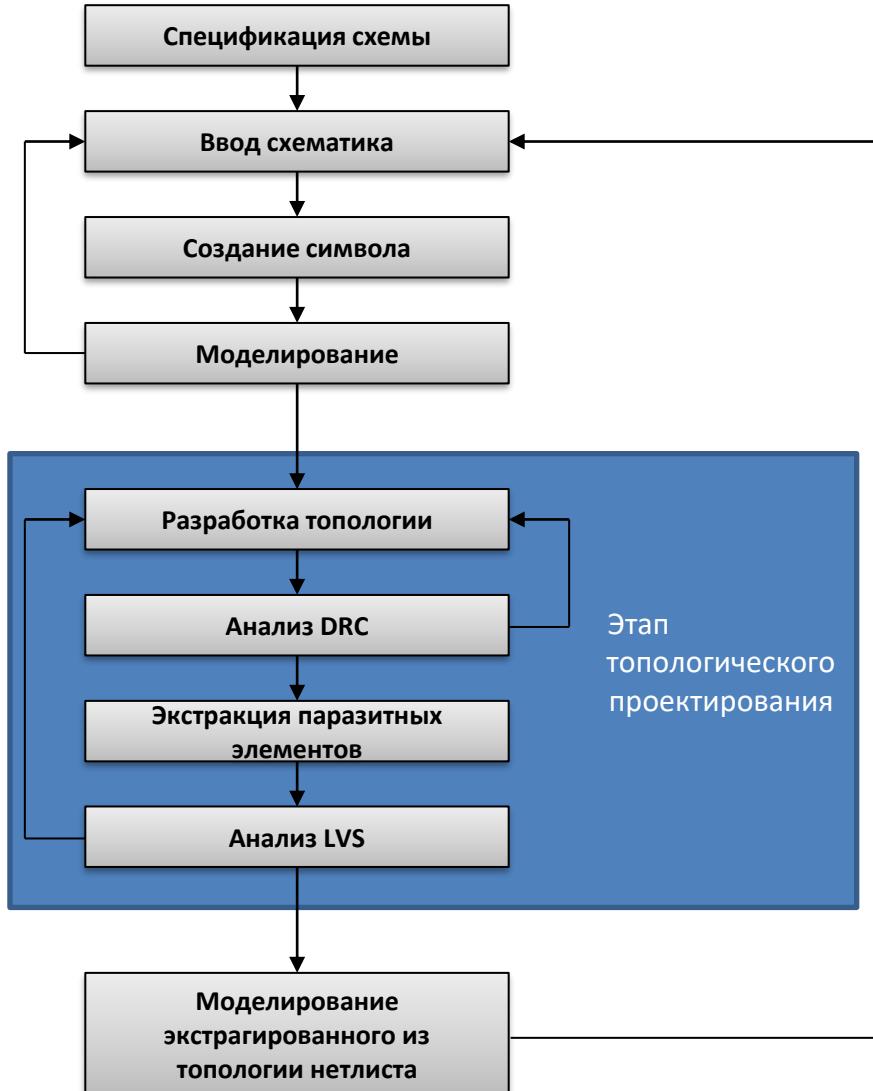
Программные средства САПР



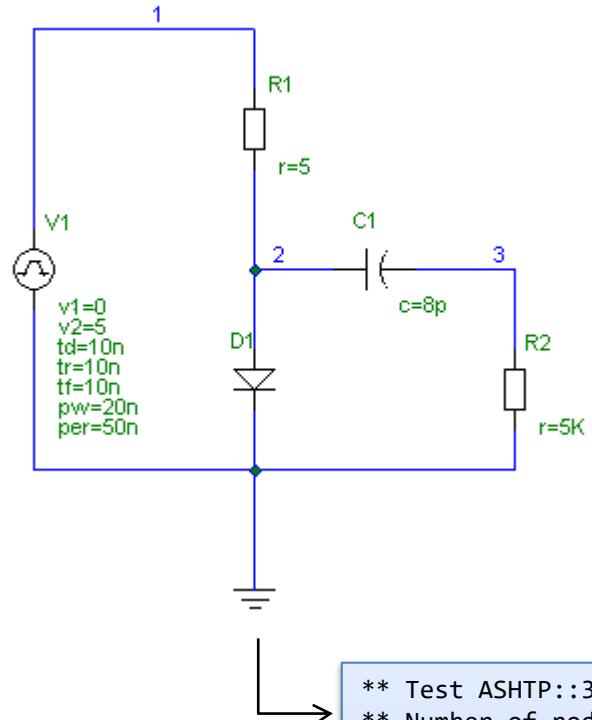
Лекция 3

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

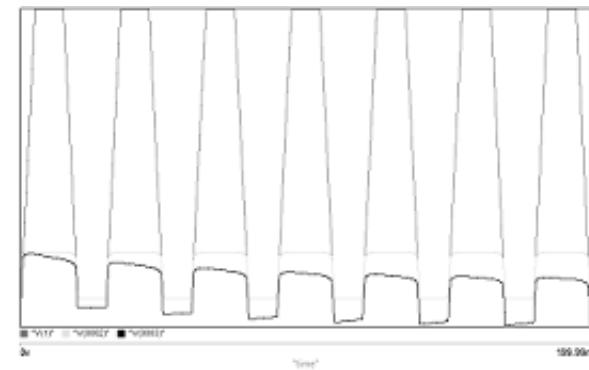
.TRAN 100p 200n
.PROBE V(0) V(1) V(2)
.OPTIONS PROBE OSRF
.END
```

СИМУЛЯТОР

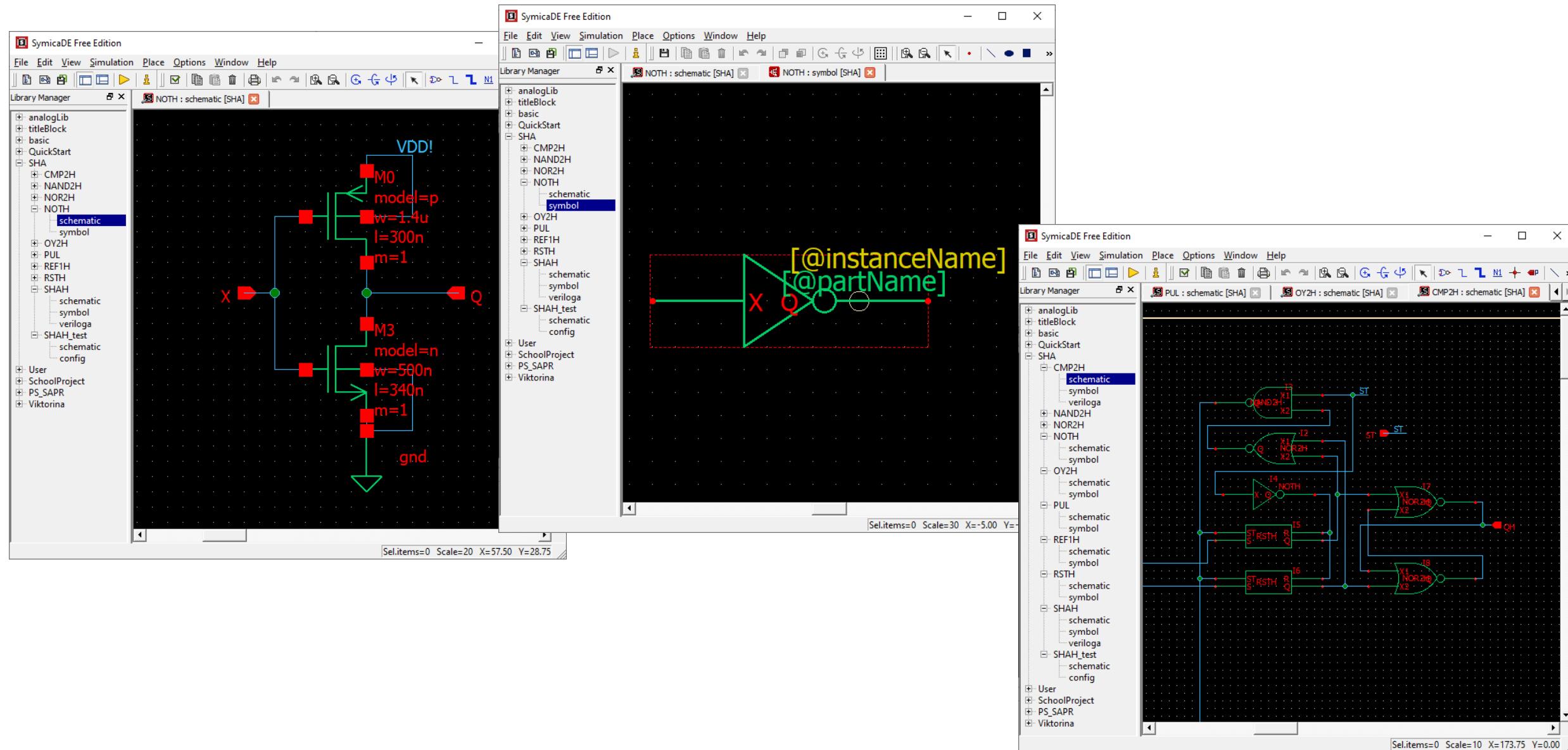
SPICE

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

PSPICE
TCLSPICE
NGSPICE



Иерархический подход к проектированию



Отрисовка схематика: что можно улучшить? (1)

Рисуем сетку



```
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));
```

Пробегаемся по
всем элементам

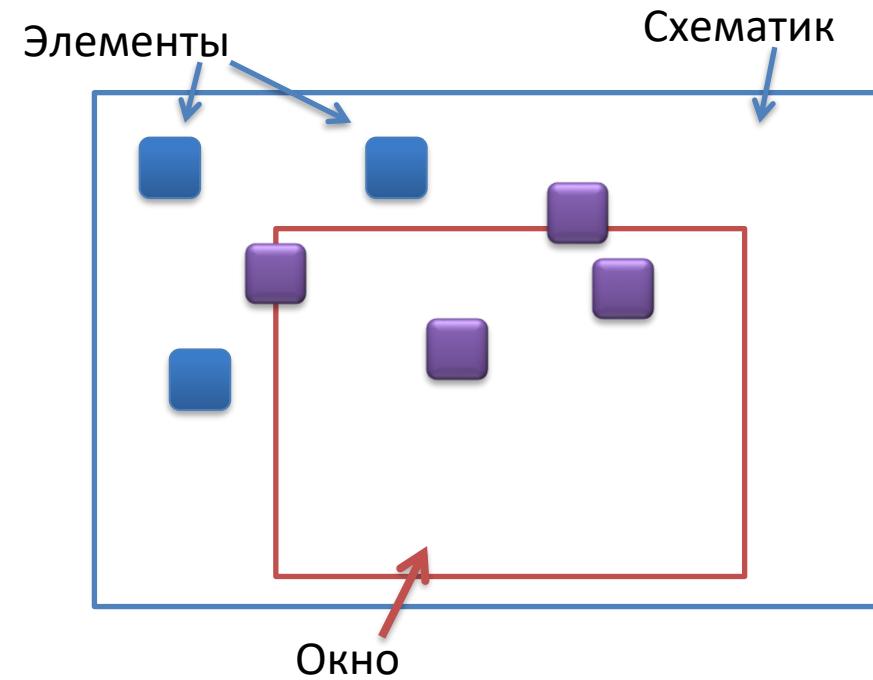
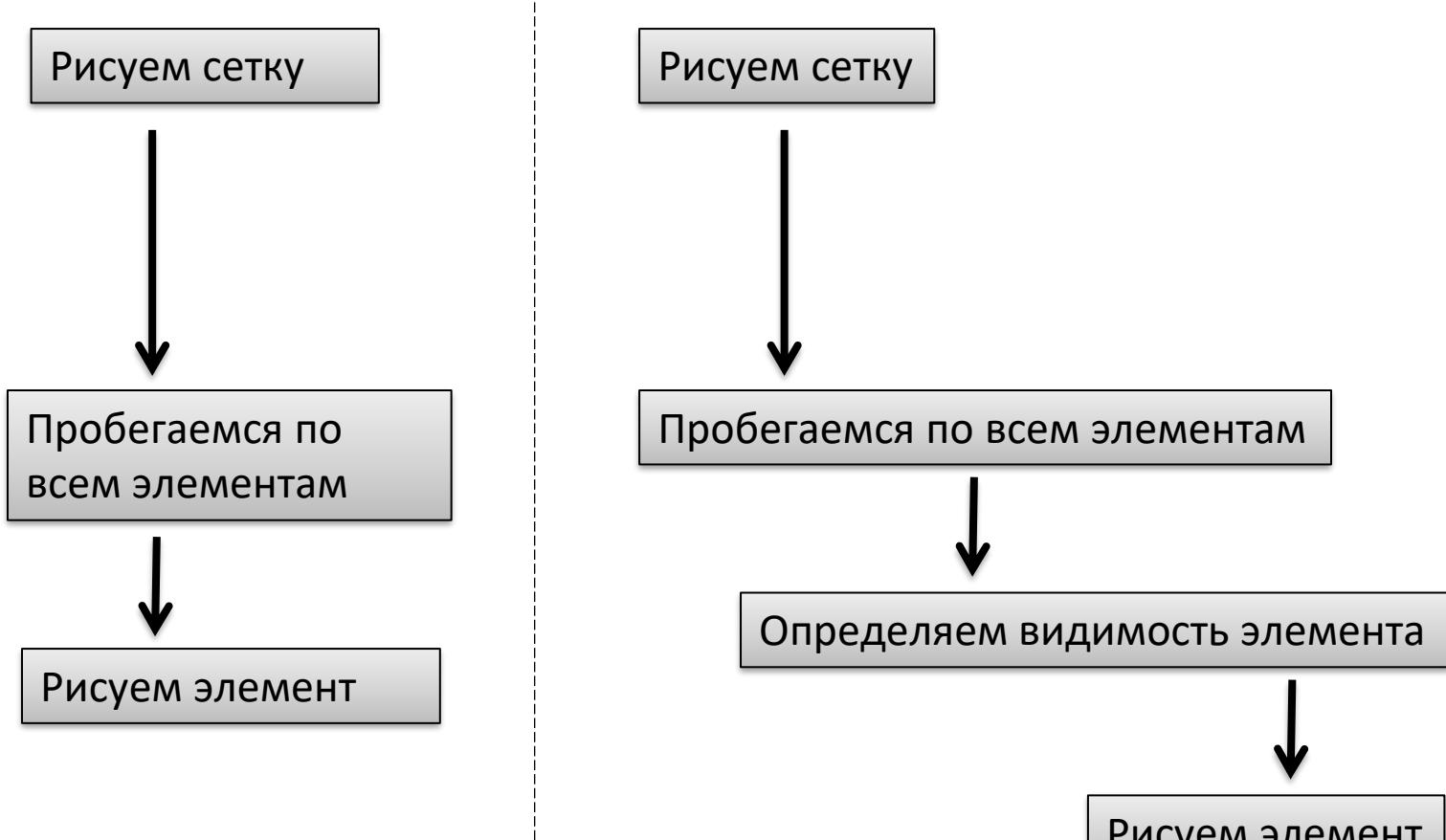


Рисуем элемент

```
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)



История симулятора SPICE: симулятор Cancer

1970 – университет Беркли, США



Лоренс Найджел
(Laurence W. Nagel)



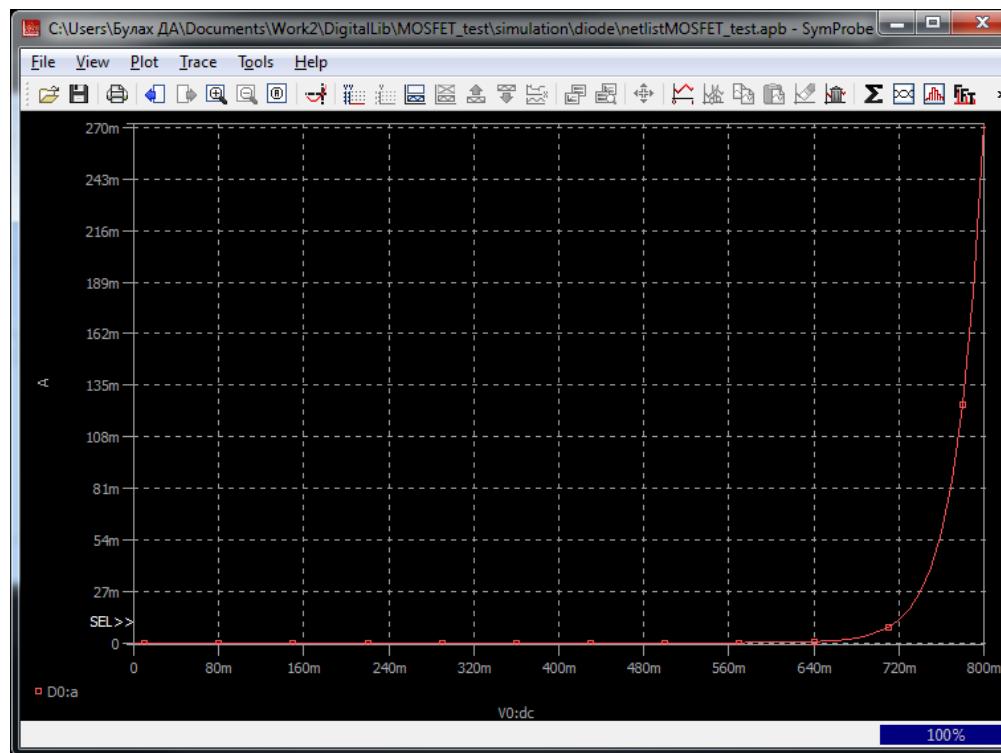
Рон Рорер
(Ron Rohrer)

CANCER - Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation

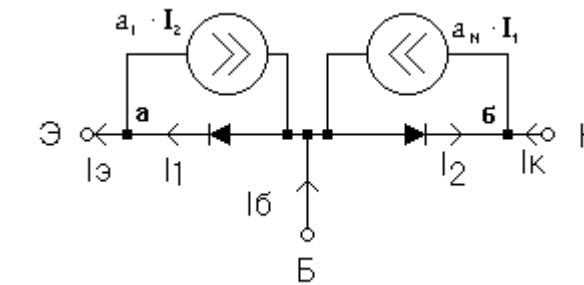
Выполняет AC, DC и TRAN анализ, написан на языке FORTRAN

Симулятор Cancer: модели элементов

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



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



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 mmos
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 Педерсен
(Donald O. Pedersen)



Лоренс Найджел
(Laurence W. Nagel)



IEEE Donald O. Pederson Award in Solid-State Circuits

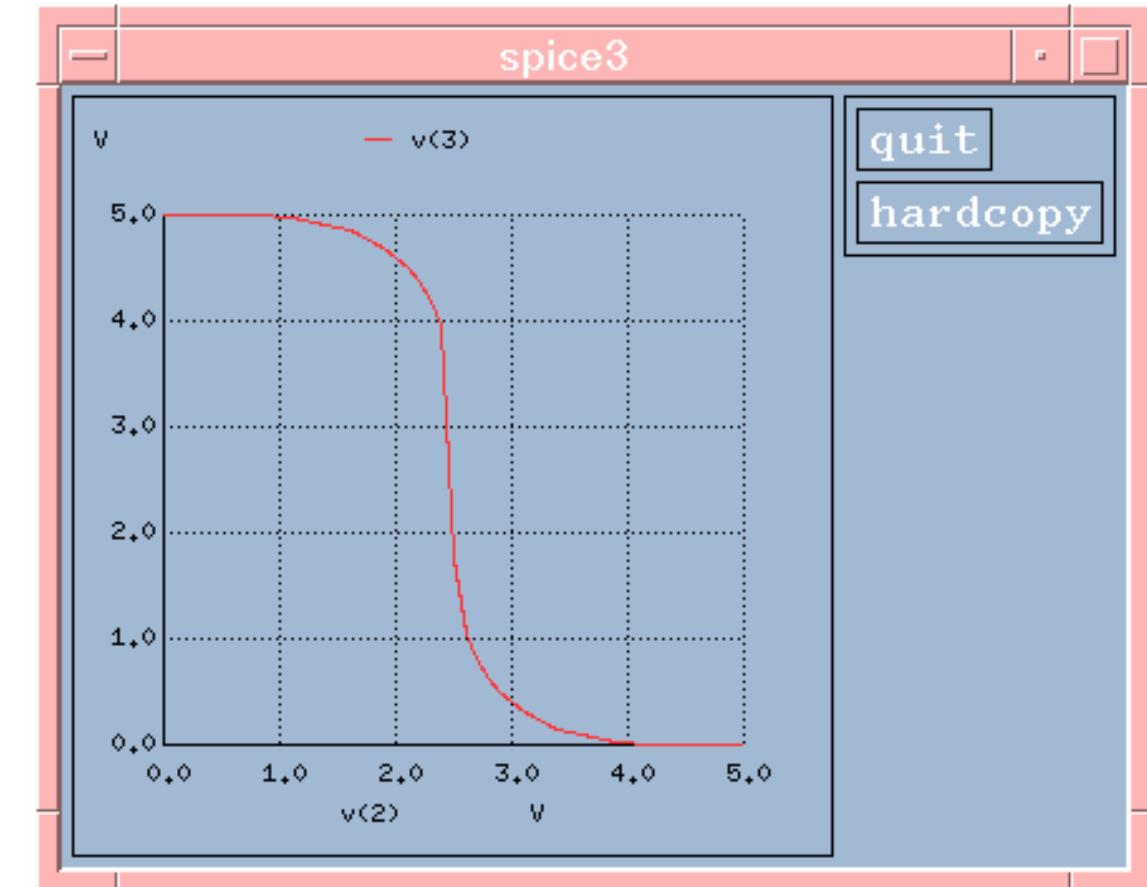
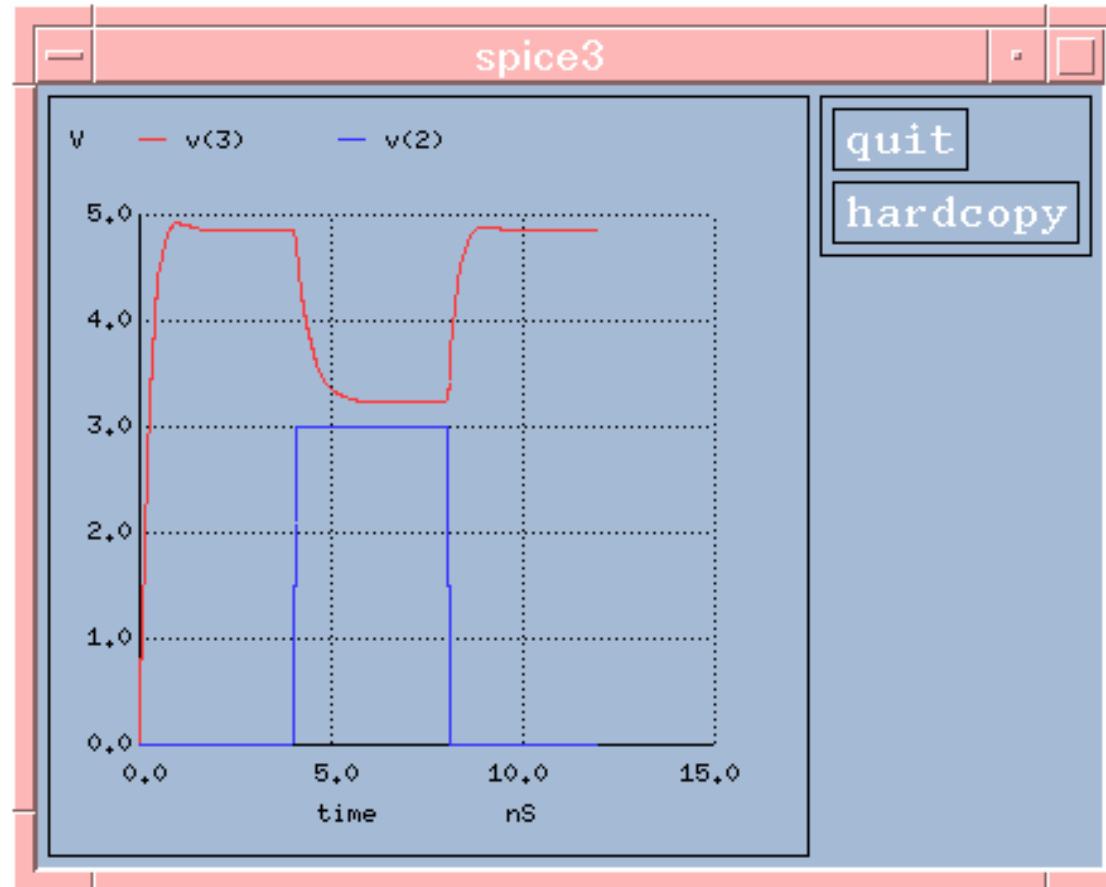
Компоненты: биполярный транзистор (схема Гуммеля-Пуна)
МОП транзистор

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

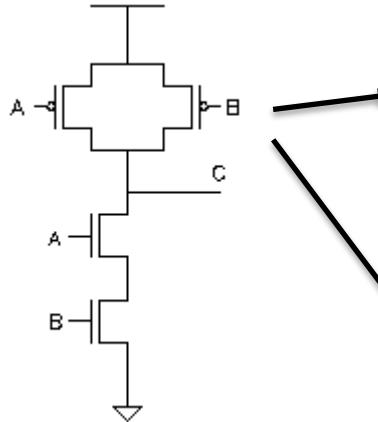
История симулятора SPICE: симулятор SPICE3

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
+ VT0=-1.44
+ KP=8.64E-6 NSUB=1E17
+ TOX=20n
```

Использование моделей в нетлистиах

* 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, U0=150, VT0=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, U0=316.67, VT0=-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 VT0=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 VT0=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 CGB0=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 NFACT0R=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 CGB0=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

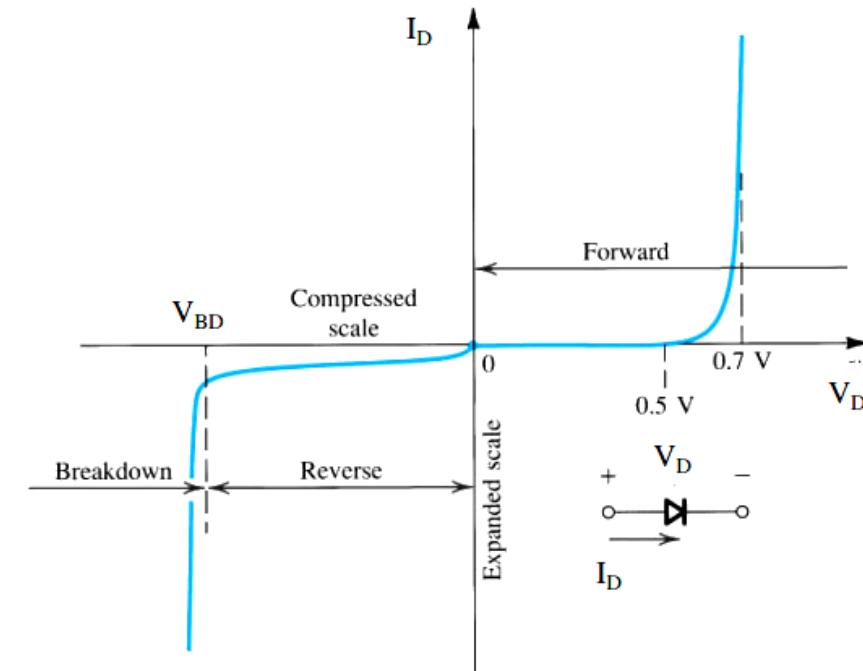
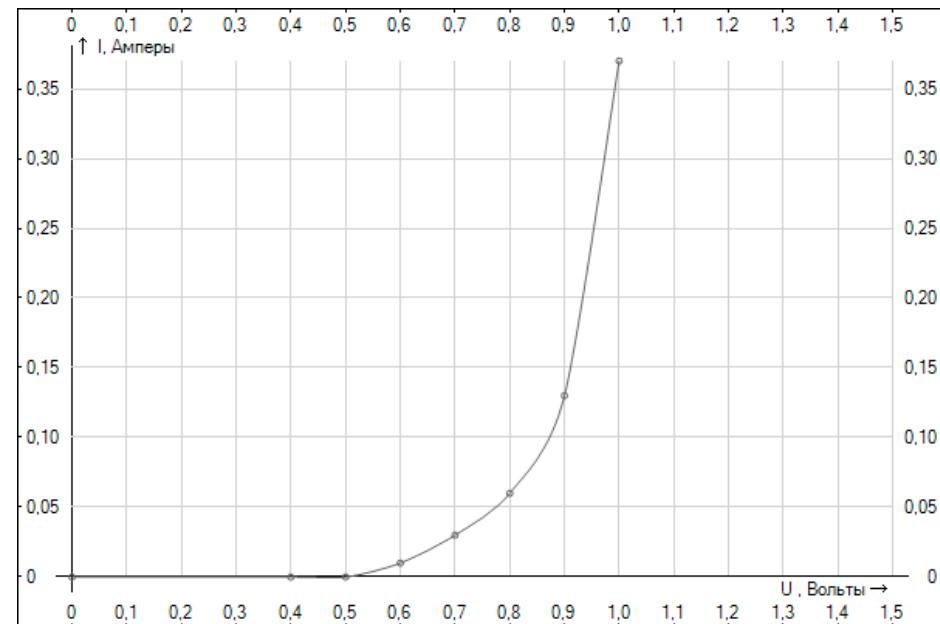
// Output Options
simOptions options
+     reltol = 1.0000000E-03
+     vabstol = 1.0000000E-06
+     iabstol = 1.0000000E-12
+     temp = 27
+     save = allpub
+     currents = selected

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

// End of Netlist
```

cādence®

Сложность моделей схемотехнических элементов: диод



$$I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_d}{n \cdot \varphi_t}} - 1) \quad I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_d}{n \cdot \varphi_t}} - 1 \right) + U_d \cdot GMIN, \quad \text{при } U_d \geq -5 \cdot n \cdot \varphi_t$$

$$I_D = -I_0 + U_d \cdot GMIN, \quad \text{при } U_d < -5 \cdot n \cdot \varphi_t$$

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

Сложность моделей схемотехнических 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:

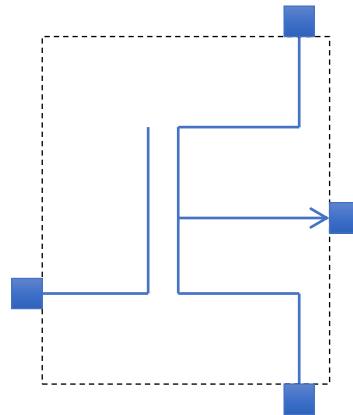
RLOAD 2 10 10K

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

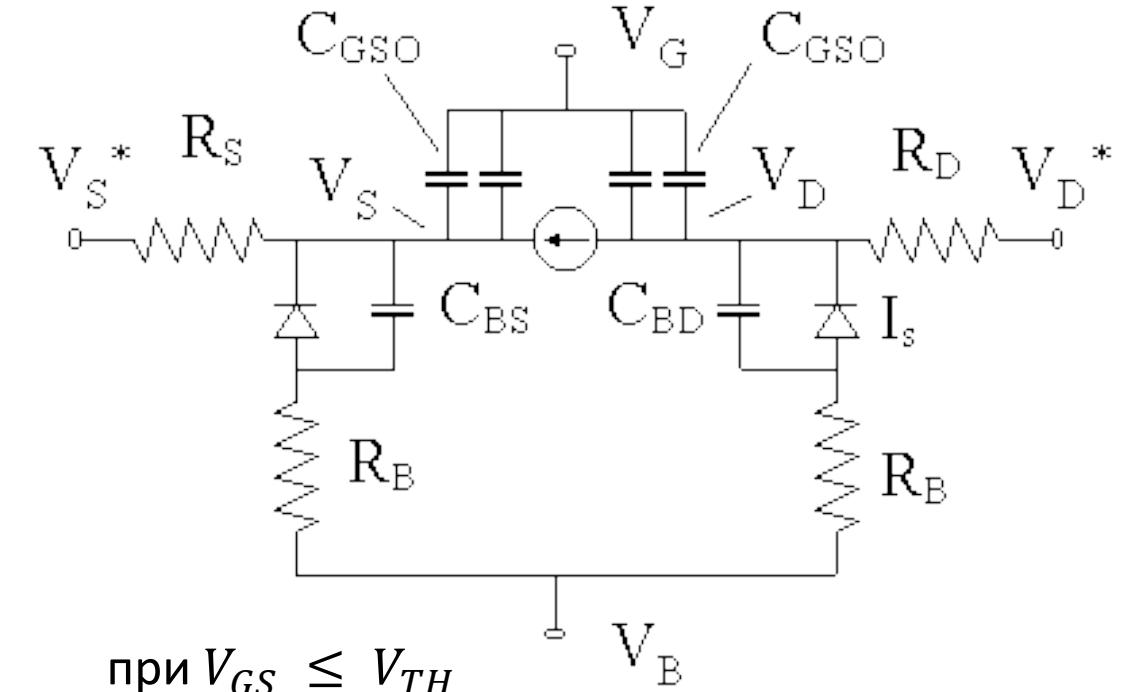
$$R(T) = T(T_0) \cdot [1 + TC_1 \cdot (T - T_0) + TC_2 \cdot (T - T_0)^2]$$

name	parameter	units	default	example
TC1	first order temperature coeff.	Ω/C	0.0	-
TC2	second order temperature coeff.	Ω/C^2	0.0	-
RSH	sheet resistance	Ω/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:



$$I_{DS} = 0$$

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

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

при $V_{GS} - V_{TH} \leq V_{DS}$

при $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$

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



Мéтод узловых потенциáлов — 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 ёбрах. [Википедия](#)

Метод контурных токов



Мéтод контурных тóков — 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

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

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:

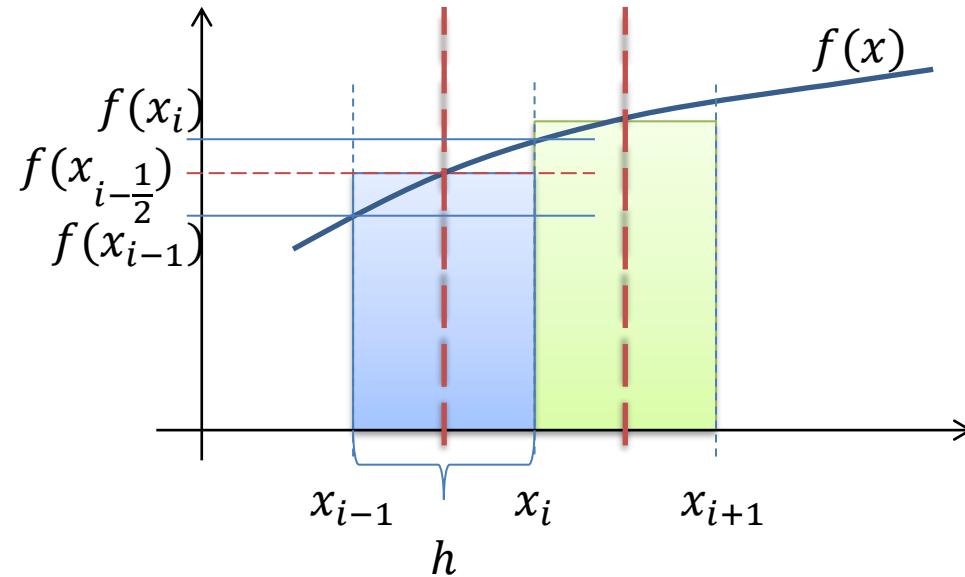
$$Yx + I = 0$$

Метод Гаусса
Метод Гаусса-Зейделя

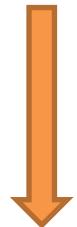
Решение математической модели схемы:

$$Yx + I = 0$$

Методы алгебраизации: метод прямоугольников



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

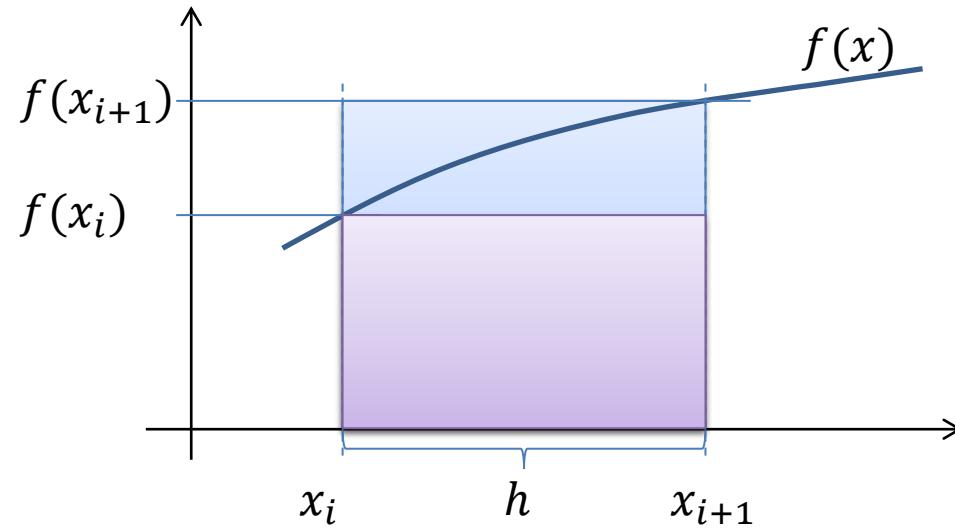


$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx \approx f(x_{i-\frac{1}{2}}) \cdot h$$

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

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

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:

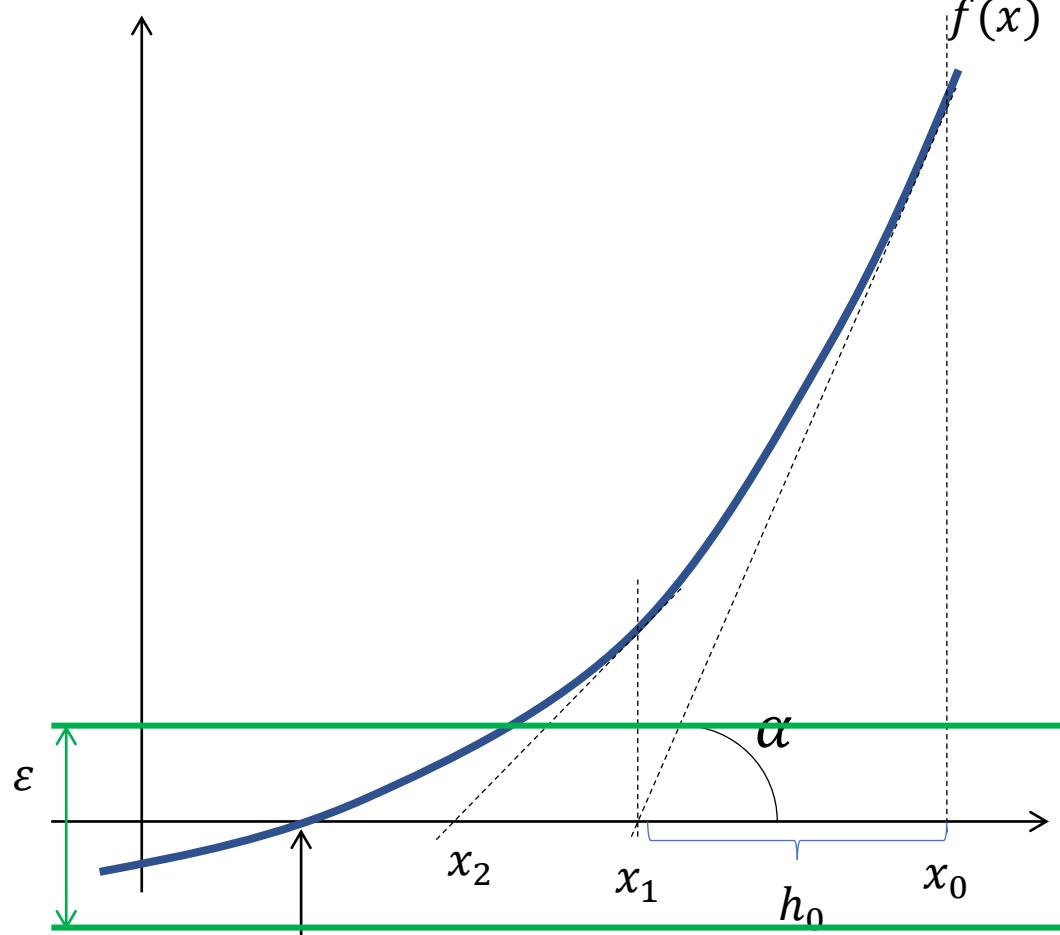
$$f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n) = 0$$

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

Отсюда следует итерационная формула метода Ньютона:

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

Методы линеаризации: метод Ньютона (2)



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

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

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

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:

$$x_{n+1} = x_n - \mathbf{J}^{-1} f(x_n)$$

$$\begin{cases} f_1(x, y) \\ f_2(x, y) \end{cases} \xrightarrow{\hspace{1cm}} \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial f_2(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f_1(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial f_2(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

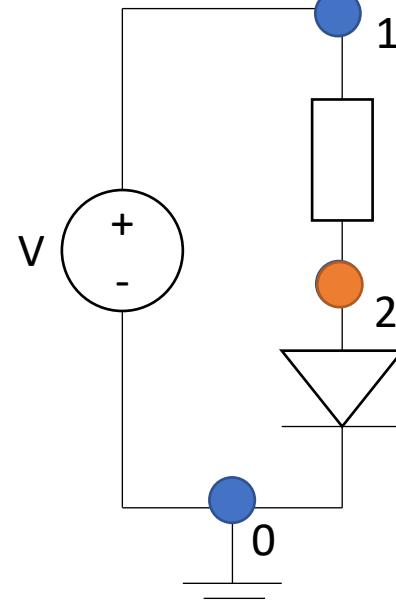
Пример формирования СЛАУ по МУП для схемы

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

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

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

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

Итерационные

Якоби

Гаусса-Зейделя

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

$$x^{(k+1)} = 2 - y^{(k)} - z^{(k)}$$

$$y^{(k+1)} = \frac{1}{2} \cdot (5 - x^{(k)} - 3z^{(k)})$$

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

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

Обращение к каждому элементу схемы

Определение вклада
в матрицу узловых
проводимостей

Определение вклада
в вектор независимых
источников тока

Формирование ММ

Решение ММ

Формирование мат. модели резистора

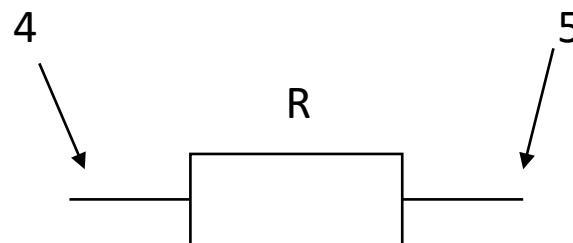
Имеется схема, содержащая 10 узлов.

```
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:

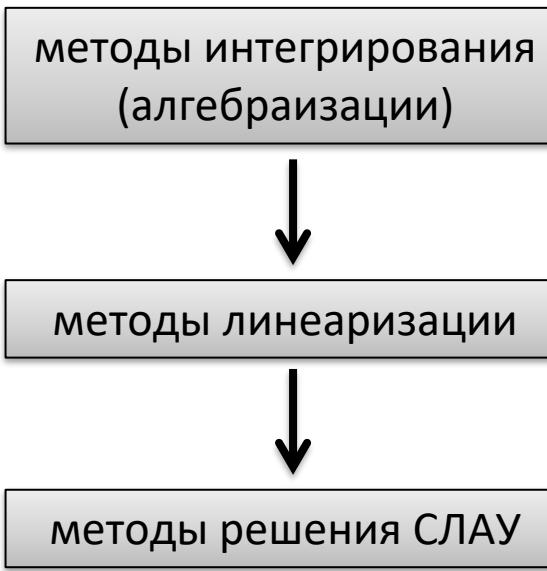
1. запись математической модели в соответствии с МУП позволяет записывать ограниченное число элементов;
2. тратится слишком много времени на формирование математической модели ИС;

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:

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

Модифицированный метод узловых потенциалов: ММУП (2)

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



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

Две матрицы проводимости

На каждой итерации метода Ньютона

Скопировать проводимости линейных элементов в общую матрицу

Пробежаться по всем **НЕЛИНЕЙНЫМ** элементам

Запросить вклад в матрицу проводимостей

Пробежаться по всем элементам

Запросить вклад в вектор независимых источников тока

Решить систему уравнений

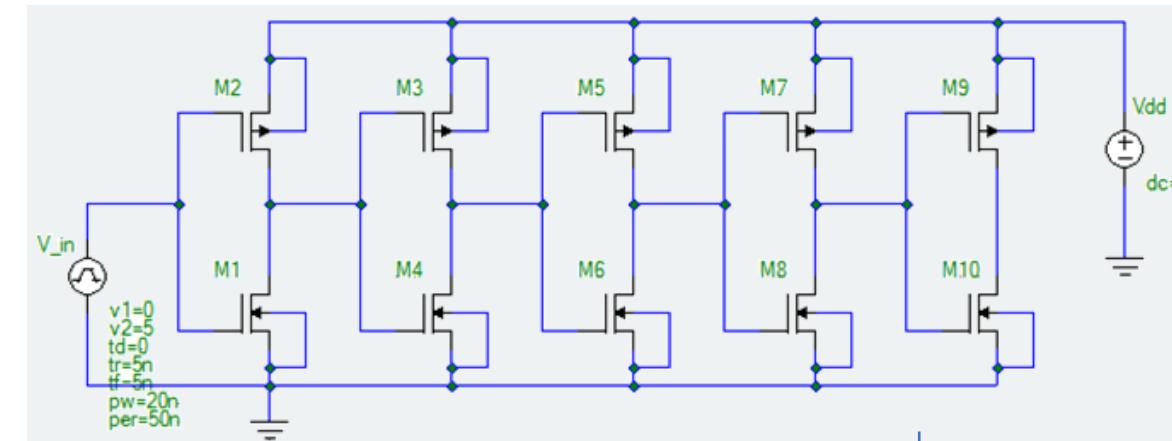
Вычисление проводимостей линейных элементов

Существенный недостаток:
требуется больше памяти

Затраты памяти на хранение мат. модели

$$N^2 + 2N = 2\text{Гб}$$

$N \approx 16\,000$ элементов



$$\text{AN} = \{\mathbf{Y}_{11}, \mathbf{Y}_{12}, \mathbf{Y}_{21}, \mathbf{Y}_{22}, \mathbf{Y}_{23}, \mathbf{Y}_{32}, \mathbf{Y}_{33}, \mathbf{Y}_{34}, \dots\}$$

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

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

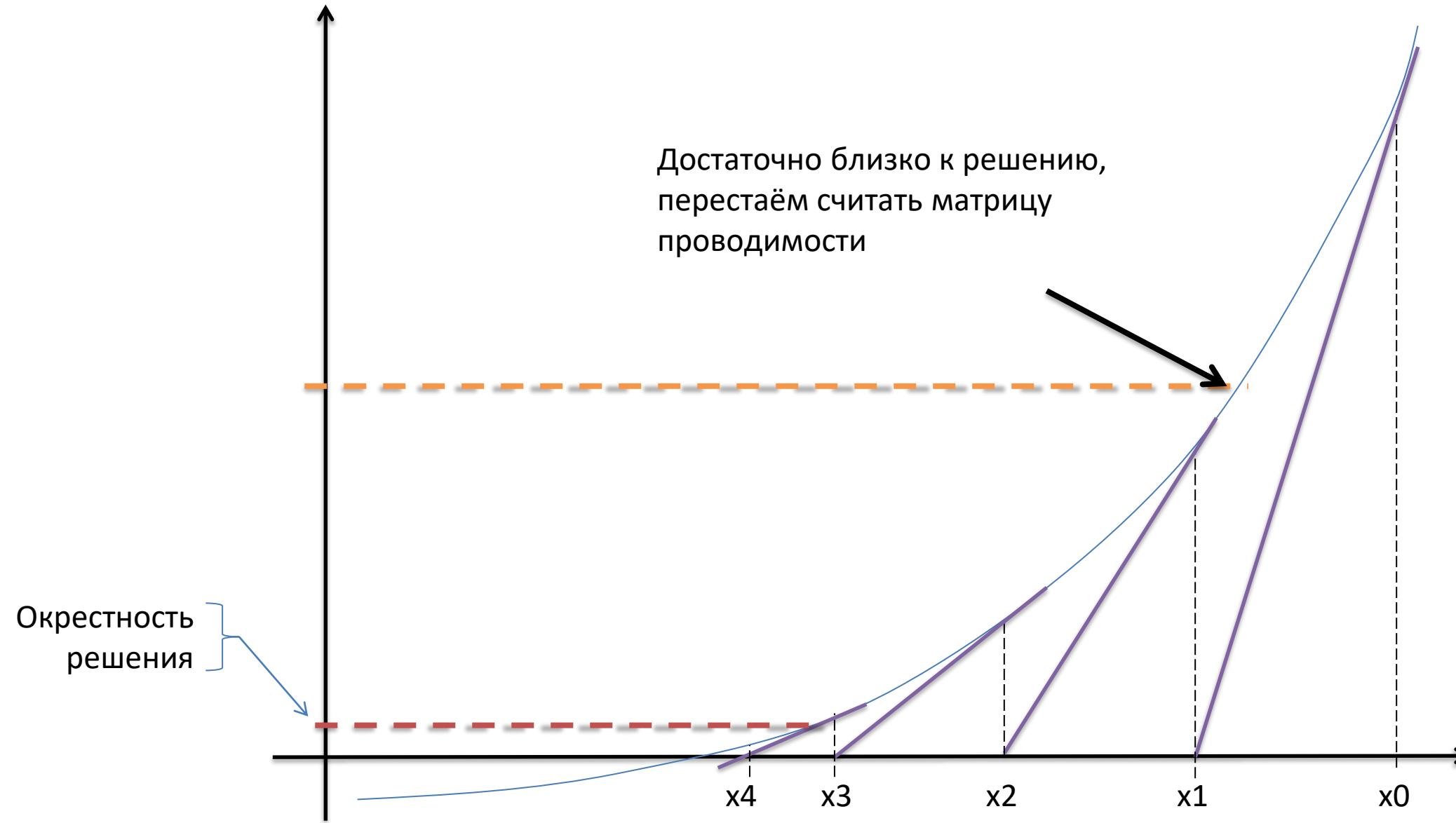
Объём памяти, требуемый
для хранения ММ схемы
из 5 элементов:

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

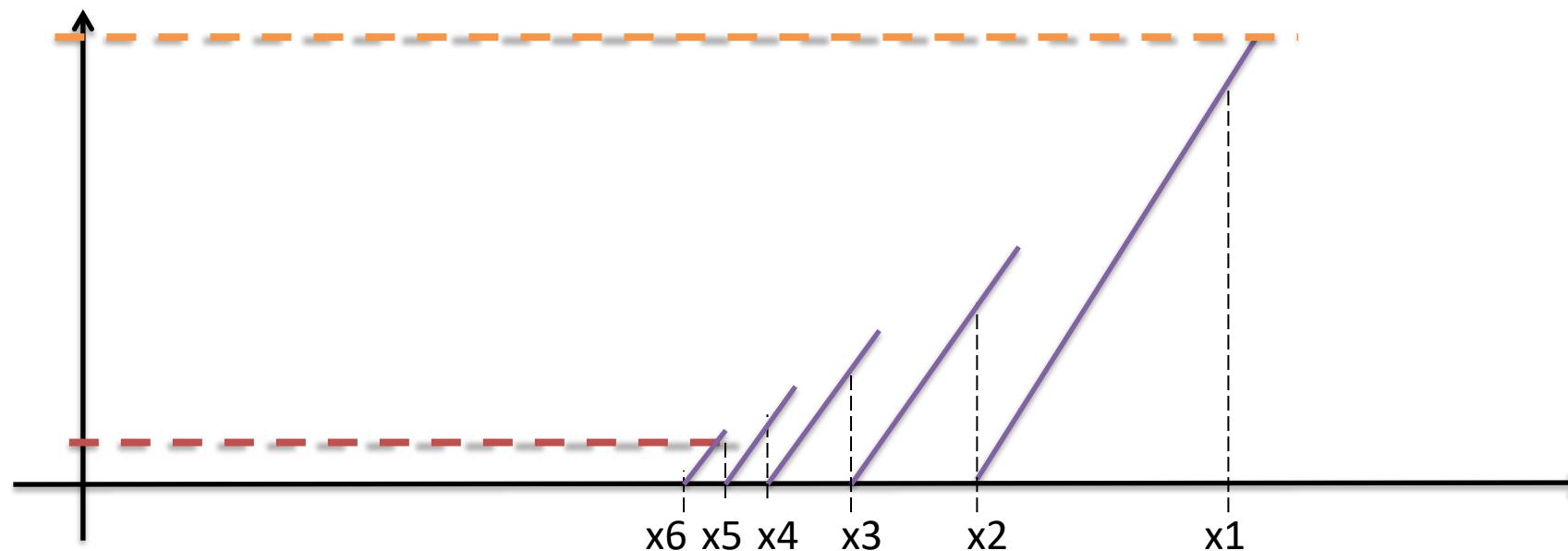
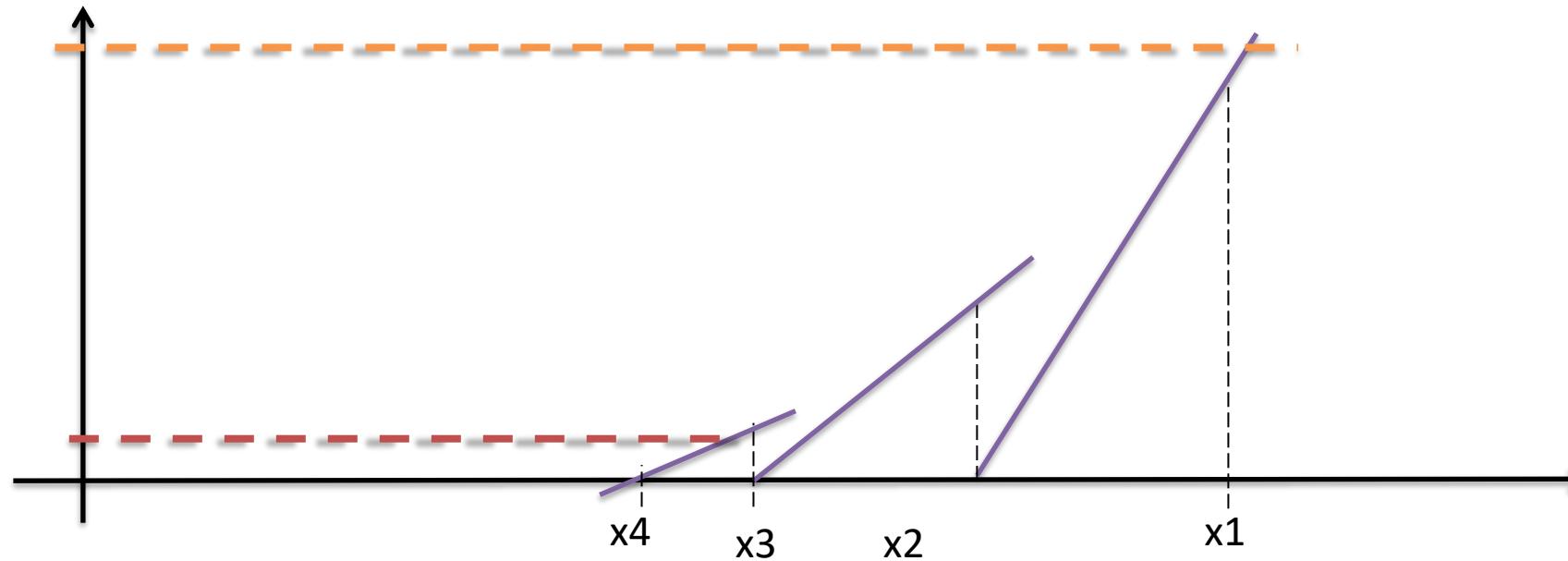
y_{11}	y_{12}			
y_{21}	y_{22}	y_{23}		
	y_{32}	y_{33}	y_{34}	
		y_{43}	y_{44}	y_{45}
			y_{54}	y_{55}

200 байт

Огрублённый метод Ньютона (1)



Огрублённый метод Ньютона (2)



Повышение сходимости: метод Ньютона-Рафсона

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

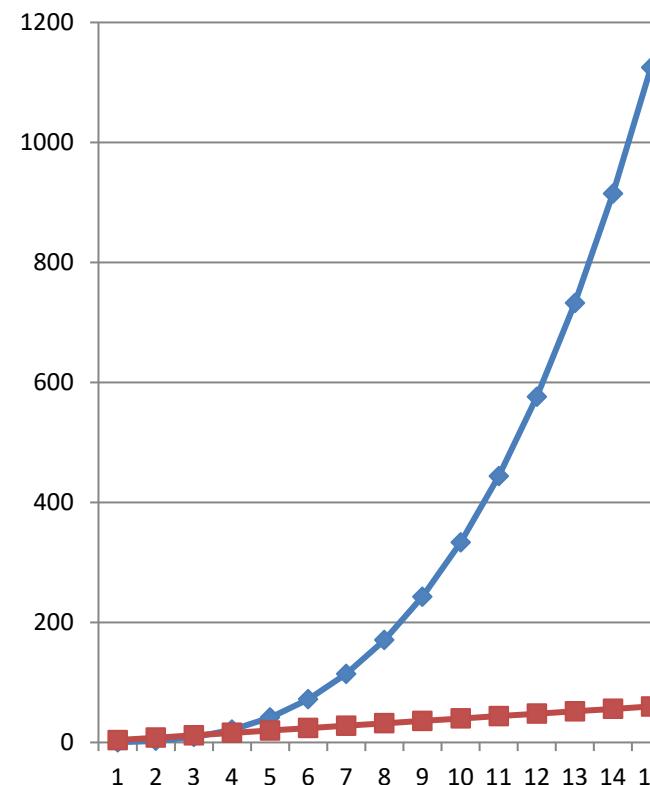


$$x_{n+1} = x_n - \alpha \cdot [\mathbf{J}^{-1} \cdot F(x_n)]$$

Методы формирования и решения СЛАУ

Сложность
формирования
СЛАУ по МУП:

$$\sim N^2$$



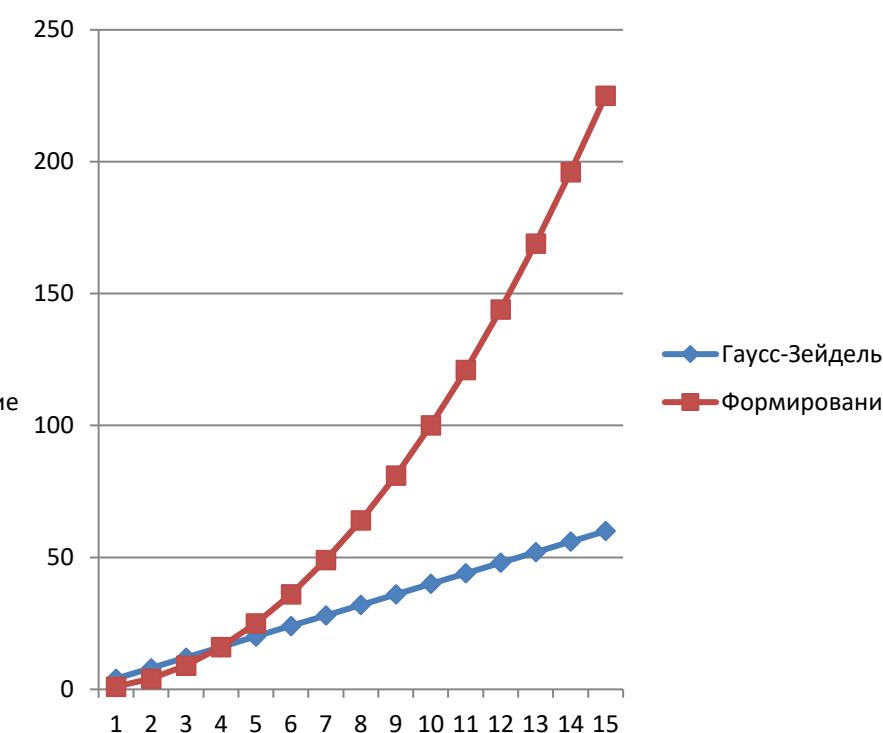
Сложность
решения СЛАУ
методом Гаусса:

$$\sim N^3$$



Сложность решения
СЛАУ методом
Гаусса-Зейделя:

$$\sim K * N$$



Обусловленность систем уравнений

Пример хорошо обусловленной системы уравнений:

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

Решение:

$$x_1 = 1$$

$$x_2 = 2$$

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

Решение:

$$x_1 = 1.001$$

$$x_2 = 2.002$$

Пример плохо обусловленной (жёсткой) системы уравнений:

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

Решение:

$$x_1 = 17$$

$$x_2 = 0$$

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

Решение:

$$x_1 = 2$$

$$x_2 = 3$$

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
```

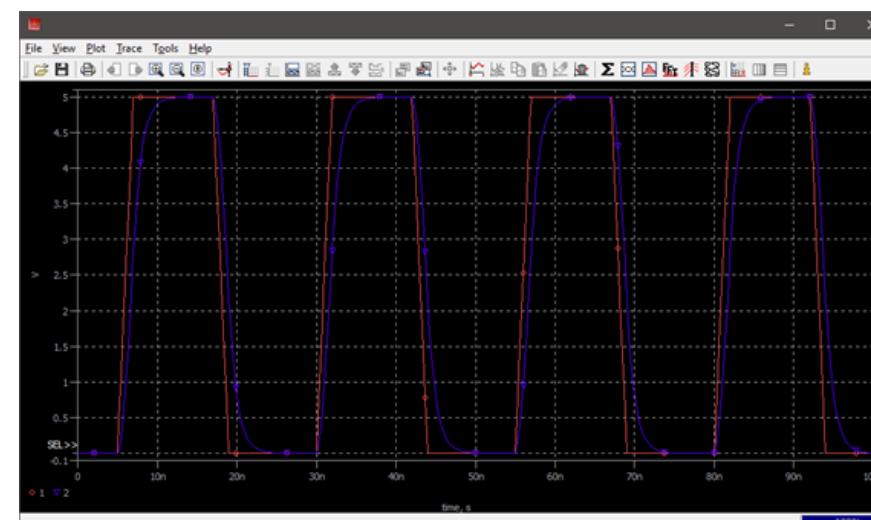
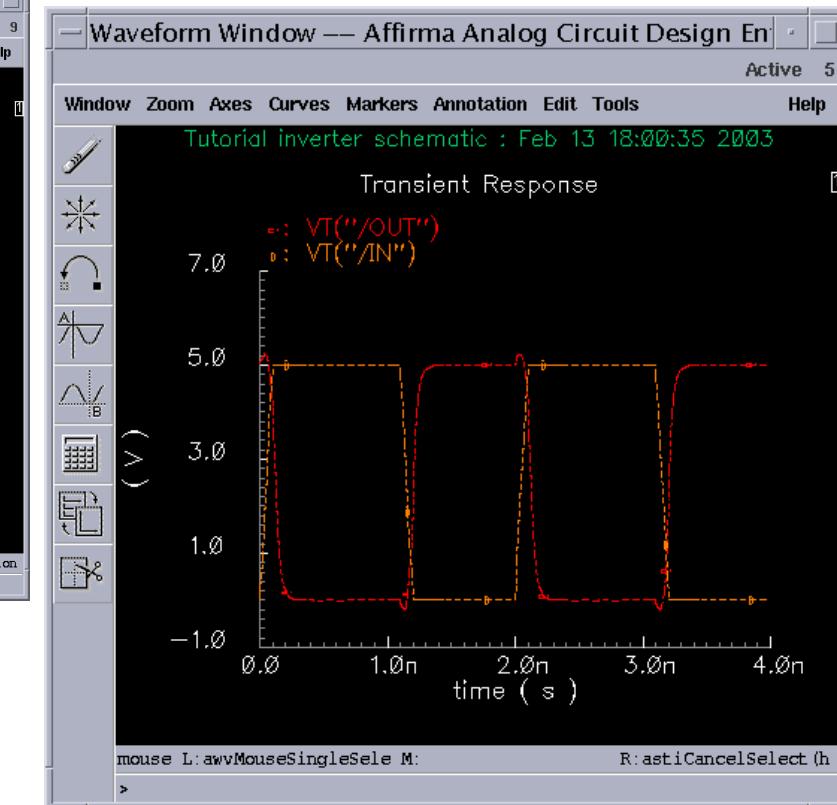
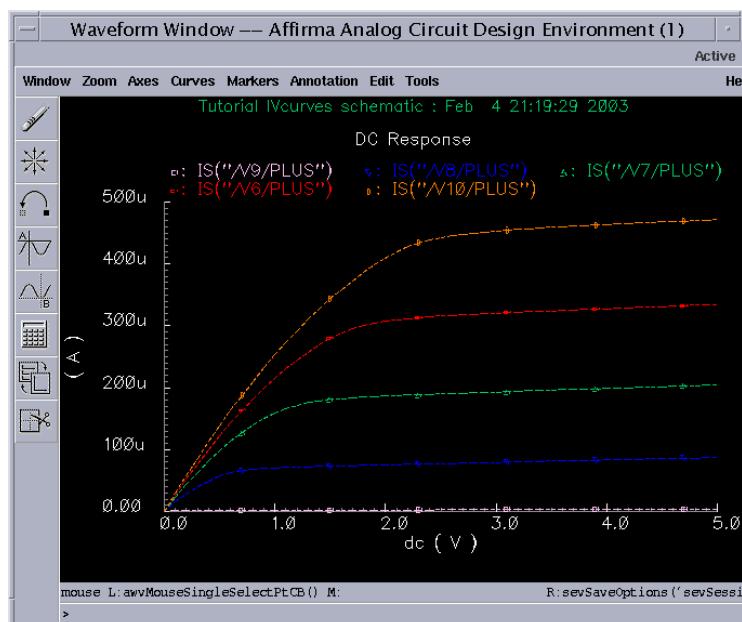
```
"time" 1.000000e-09
```

```
"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)'  
0.0000000e+000 0.0000000e+000 0.0000000e+000  
2.0000000e-009 0.0000000e+000 0.0000000e+000  
5.0000000e-009 0.0000000e+000 0.0000000e+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  
7.0000000e-009 5.0000000e+000 2.83483203e+000  
7.14454208e-009 5.0000000e+000 3.10826704e+000  
7.38134698e-009 5.0000000e+000 3.50881305e+000  
7.85495678e-009 5.0000000e+000 4.07983339e+000  
8.25644207e-009 5.0000000e+000 4.38750412e+000  
8.67525042e-009 5.0000000e+000 4.59960723e+000  
9.11298514e-009 5.0000000e+000 4.74340123e+000  
  
#H  
SOURCE='SYMSPICE'  
TITLE='* # file name: F:\rc'  
SUBTITLE=''  
TIME='08:37:36' DATE='9/11/2018'  
ANALYSIS='TR'  
TEMPERATURE=' 2.50000E+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 0.0000000e+000 2 0.0000000e+000 0.0000000e+000  
#C 2.0000000e-009 2 0.0000000e+000 0.0000000e+000  
#C 5.0000000e-009 2 0.0000000e+000 0.0000000e+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

