

Моделирование переключения р-п диода в программе SPICE

Платонов Д. Е., ИПАИТ, ОрелГУ
Турин В.О., ФМФ, ОрелГУ

Введение

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — симулятор электронных схем общего назначения. Симуляция схемы при помощи SPICE является общепринятым в полупроводниковой промышленности способом верификации работы схемы перед её реализацией. В ней можно рассчитывать режимы схем по постоянному току, частотные, переходные и шумовые характеристики, анализировать влияние температуры. Используемые элементы схем: сопротивления, ёмкости, индуктивности, диоды, транзисторы различных типов, трансформаторы, независимые и управляемые источники напряжения и тока. Различных программ типа SPICE много. Некоторые программы позволяют графический ввод схемы. Информация для программы SPICE задаётся в виде текстового файла. SPICE поддерживает основные виды диодов: стабилитроны, диффузионные диоды, диоды Шотки, туннельные диоды.

Описание диода в SPICE.

Объявление диода начинается с имени элемента диода, которое должно начинаться с "d" плюс дополнительные символы. Примеры имен элемента диода: d1, d2, dtest, da, db, d101 и так далее. Два номера узлов указывают подключение к другим компонентам анода и катода, соответственно. За номерами узлов следует название модели, ссылающееся на объявление ".model".

Строка объявления модели начинается с ".model", за которым следует название модели, соответствующее одному или более объявлений диода. Далее идет "d", указывающее, что диод моделируется. Остальная часть объявления модели является списком дополнительных параметров диода в виде [НазваниеПараметра]=[ЗначениеПараметра].

Основная форма: d[имя] [анод] [катод] [модель]

.model [название_модели] d ([параметр1=x] [параметр2=y] . . .)

Пример описания SPICE модели диода:

```
d1 1 2 D1N4148
```

```
.model D1N4148 D (IS=0.1PA, RS=16 CJO=2PF TT=12N BV=100 IBV=0.1PA)
```

Параметры диода

№	Обозначение	Описание	Единица Измерения	Значение по умолчанию	Типовое значение
1	TNOM	Температура измерения параметров	°C	27	27
2	EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1,11 (Кремний)	1,11
Прямое и обратное смещение					
3	IS	Ток насыщения	A	1,0e-14	1,0E-14
4	XTI	Температурный коэффициент параметра IS.	-	3,0	3,0 pn 2,0 Sbd
5	N	Коэффициент эмиссии	-	1,0	1,0

		(коэффициент идеальности)			
Обратное смещение. Пробой.					
6	BV	Обратное напряжение пробоя соответствующее достижению тока пробоя IBV .	B	∞	40,0
7	IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV	A	1,0e-3	1,0e-4
Последовательные сопротивления					
8	RS	Последовательное сопротивление диода	Ом	0	10
Ёмкости					
9	CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении.	Ф	0	2E-12
10	VJ	Контактная разность потенциалов p-n перехода.	B	1	0,6
11	M	Коэффициент плавности p-n перехода (1/2 – для резкого, 1/3 – для плавного)	–	0,5	0,5
12	FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости при прямом смещении	–	0,5	0,5
Переменный ток. Малый сигнал.					
13	TT	Время переноса заряда.	c	0	0,1E-9
Шум					
14	KF	Коэффициент фликкер-шума	–	0	-
15	AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума	–	1	-

Связи параметров

Д) Уравнение Шокли для идеального диода (названо в честь изобретателя транзистора Уильяма Шокли) характеризует диод, обладающий идеальной вольт-амперной характеристикой для прямого и обратного тока. Уравнение Шокли для идеального диода:

$$ID = IS \left(e^{\frac{VD}{N \cdot VT}} - 1 \right), \text{ где}$$

ID – ток, проходящий через диод;

VD – напряжение на диоде;

N – коэффициент идеальности;

IS – ток насыщения;

VT=kT/q – термическое напряжение (k – постоянная Больцмана, T – температура, q – элементарный заряд).

2)

$$RS = \frac{(VD1 - VD2)}{ID}, \text{ где}$$

VD – напряжение на диоде;

RS – последовательное сопротивление диода;

ID – ток, проходящий через диод.

3)

$$IR = IBV * e^{\left(\frac{(-VD - BV)}{VT} \right)}, \text{ где}$$

IR – сопротивление при обратном включении;

IBV - начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV;

VD – напряжение на диоде;

BV – напряжение пробоя;

VT=kT/q – термическое напряжение (k – постоянная Больцмана, T – температура, q – элементарный заряд).

4)

$$CD = CJO * \left(1 - \frac{VD}{VJ} \right)^{-M}, \text{ где}$$

CD – емкость при обратном смещении

CJO – барьерная емкость при нулевом смещении

VD – напряжение на диоде;

VJ – контактная разность потенциалов p-n перехода.

$$CD = CJO * (1 - FC)^{-(1-M)} * \left(1FC * (1 + M) + M * \frac{VD}{VJ} \right), \text{ где}$$

CD – емкость при прямом смещении

CJO – барьерная емкость при нулевом смещении

FC - коэффициент нелинейности барьерной емкости при прямом смещении

M – коэффициент плавности p-n перехода (1/2 – для резкого, 1/3 – для плавного)

VD – напряжение на диоде;

VJ – контактная разность потенциалов p-n перехода.

5)

$$QS = TT * IS \left(e^{\frac{VD}{N \cdot VT}} - 1 \right), \text{ где}$$

IS – ток насыщения

TT – время переноса заряда

Q_S - заряд запаздывания (Заряд, вытекающий из диода за время запаздывания обратного напряжения T_S . T_S - Интервал времени от момента, когда ток проходит через нулевое значение, изменяя направление с прямого на обратное и моментом, когда обратный ток достигает амплитудного значения)

N - коэффициент эмиссии (коэффициент идеальности)

$V_T = kT/q$ – термическое напряжение (k – постоянная Больцмана, T – температура, q – элементарный заряд)

V_D – напряжение на диоде;

б)

$$T T = \frac{T_s}{\ln \left[1 + \frac{I F}{I R} \right]}, \text{ где}$$

T_s - время запаздывания обратного напряжения. (Интервал времени от момента, когда ток проходит через нулевое значение, изменяя направление с прямого на обратное до момента, когда обратный ток достигает амплитудного значения).

$I F$ – прямой ток

$I R$ – обратный ток

$T T$ – время переноса заряда

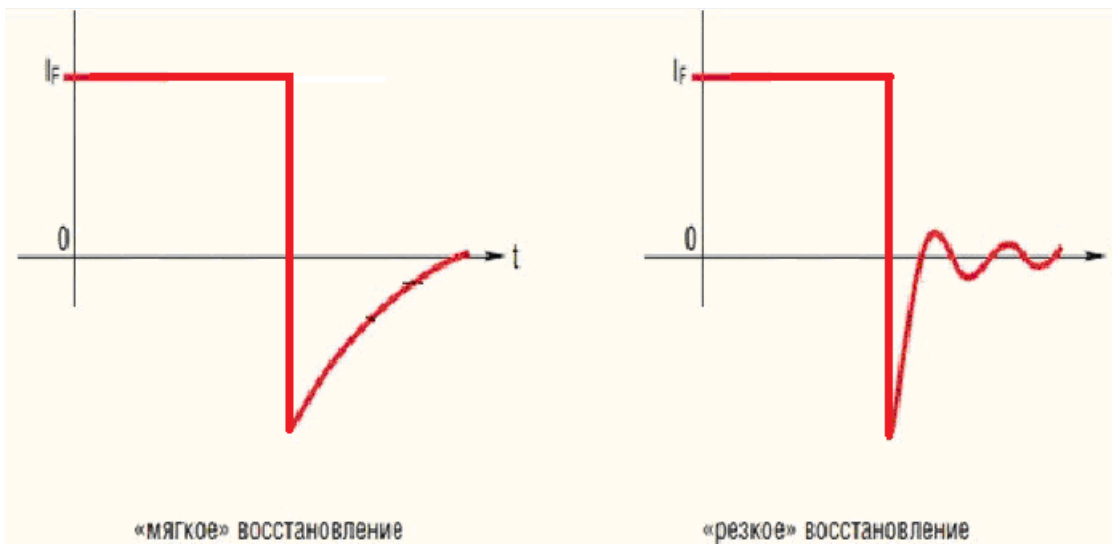
Проверка формулы для времени переноса заряда

Известно, что при изменении приложенного напряжения с прямого на обратное, он запирается не мгновенно, а с некоторой задержкой.

При прямом протекании тока через диод (плюс приложен к аноду (p-область), минус к катоду (n-область)). В базе (катоде, n-область) накапливаются дырки, в эмиттере (аноде, p-область) накапливаются электроны. После смены полярности напряжения на обратное (плюс на катоде, минус на аноде), накопленные неосновные носители в областях диода начинают двигаться навстречу, создавая короткий импульс (выброс) обратного тока. Короткий импульс тока образуется вследствие малого количества накопленных неосновных носителей (зависит от паразитной ёмкости перехода и силы протекавшего тока).

Время, необходимое для закрытия диода при смене напряжения с прямого на обратное, называется временем обратного восстановления. (TRR - time reverse recovery).

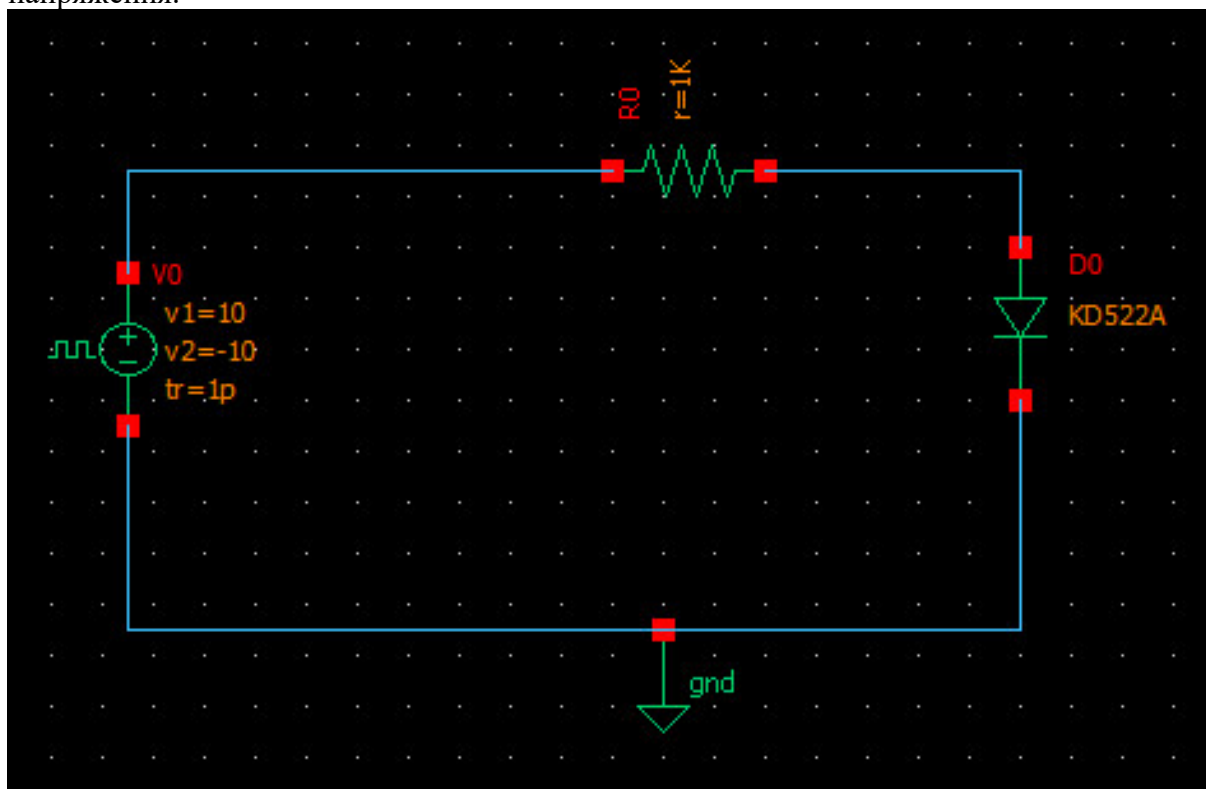
Определяется как интервал времени от момента, когда ток проходит через нулевое значение, изменяя направление с прямого на обратное, и до момента пересечения оси времени с прямой, проходящей через две точки на кривой уменьшения обратного тока с ординатами 90 и 25% его амплитуды (для мягкого восстановления).



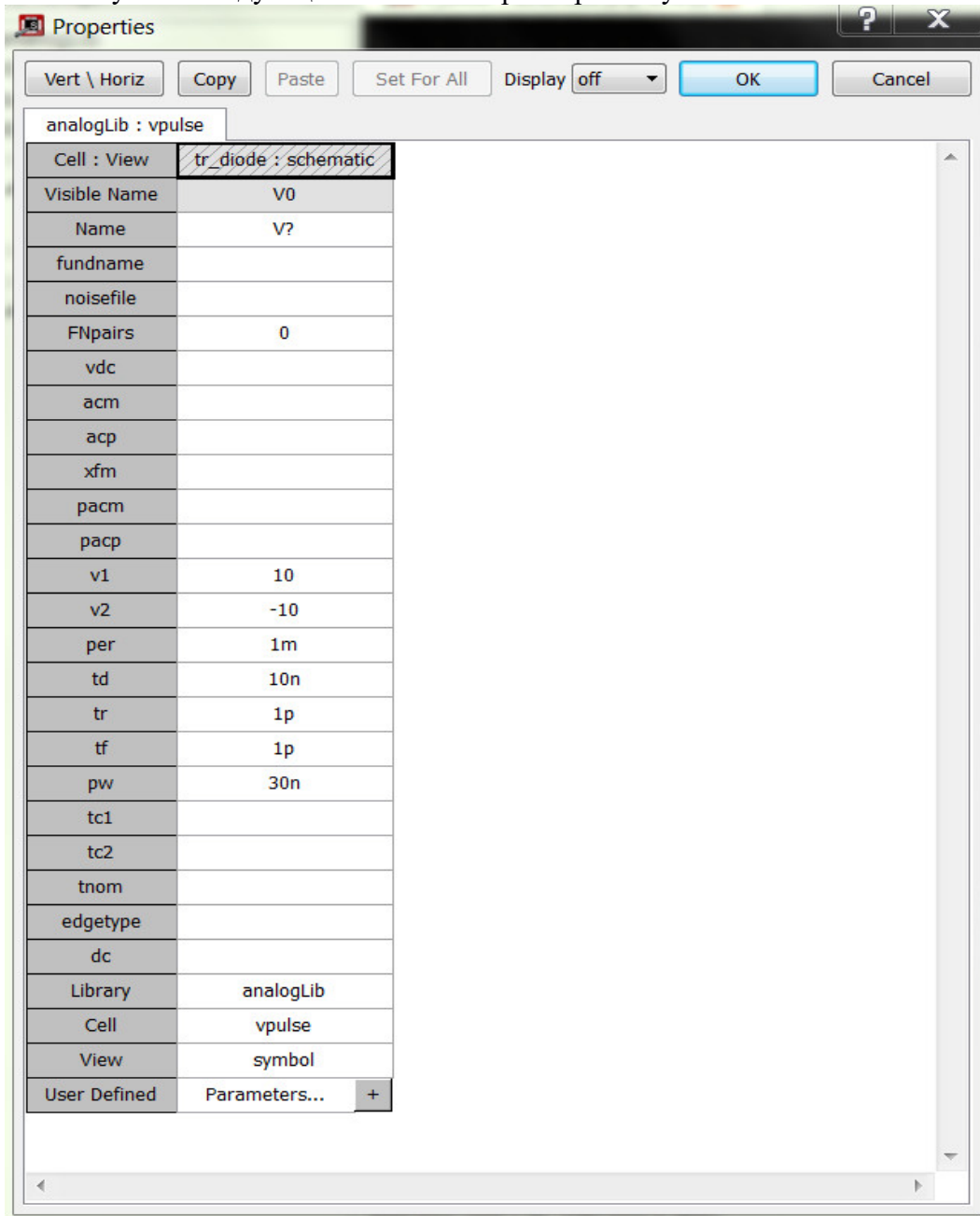
Возьмём SPICE-модель диода

```
.Model KD522A D(Is=227f N=1 Rs=1.17 Cjo=2.42p
Tt=1.38n M=0.25 Vj=0.68 Fc=0.5 Bv=50 IBv=1e-11
Eg=1.11 Xti=3)
```

Составим в программе Synica схему для испытания с импульсным источником напряжения.

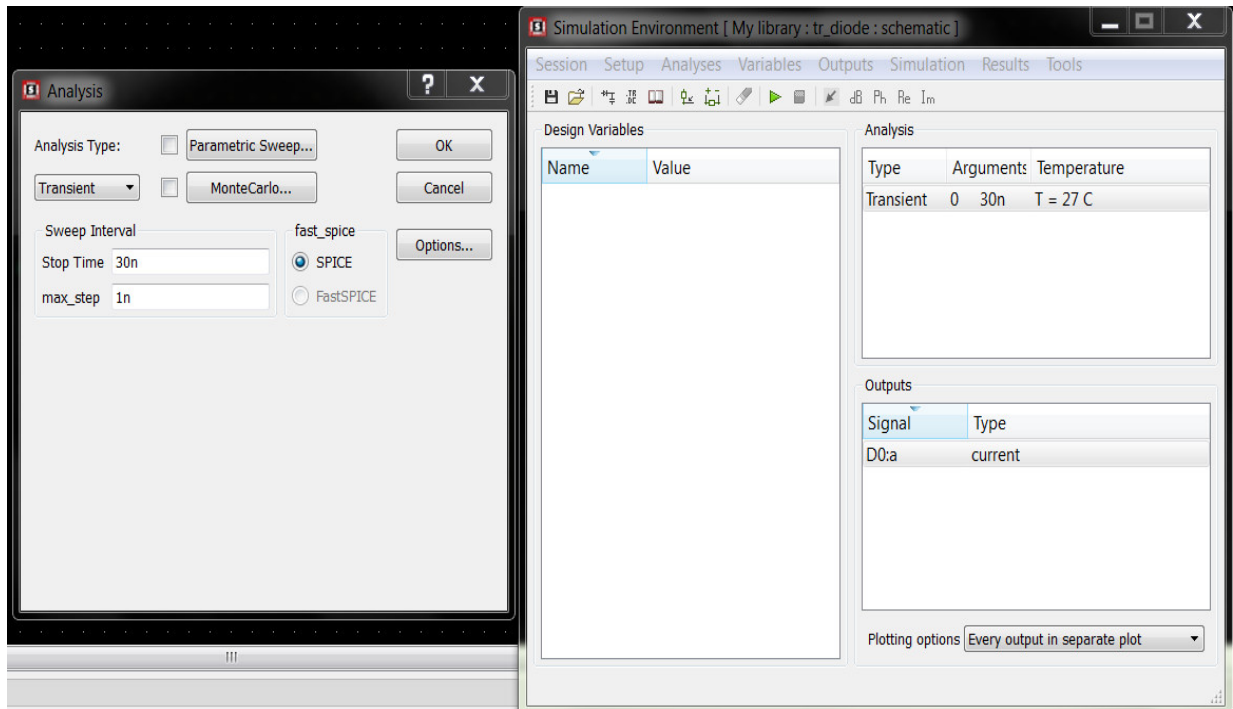


Используются следующие значения параметра импульсного источника и метода анализа

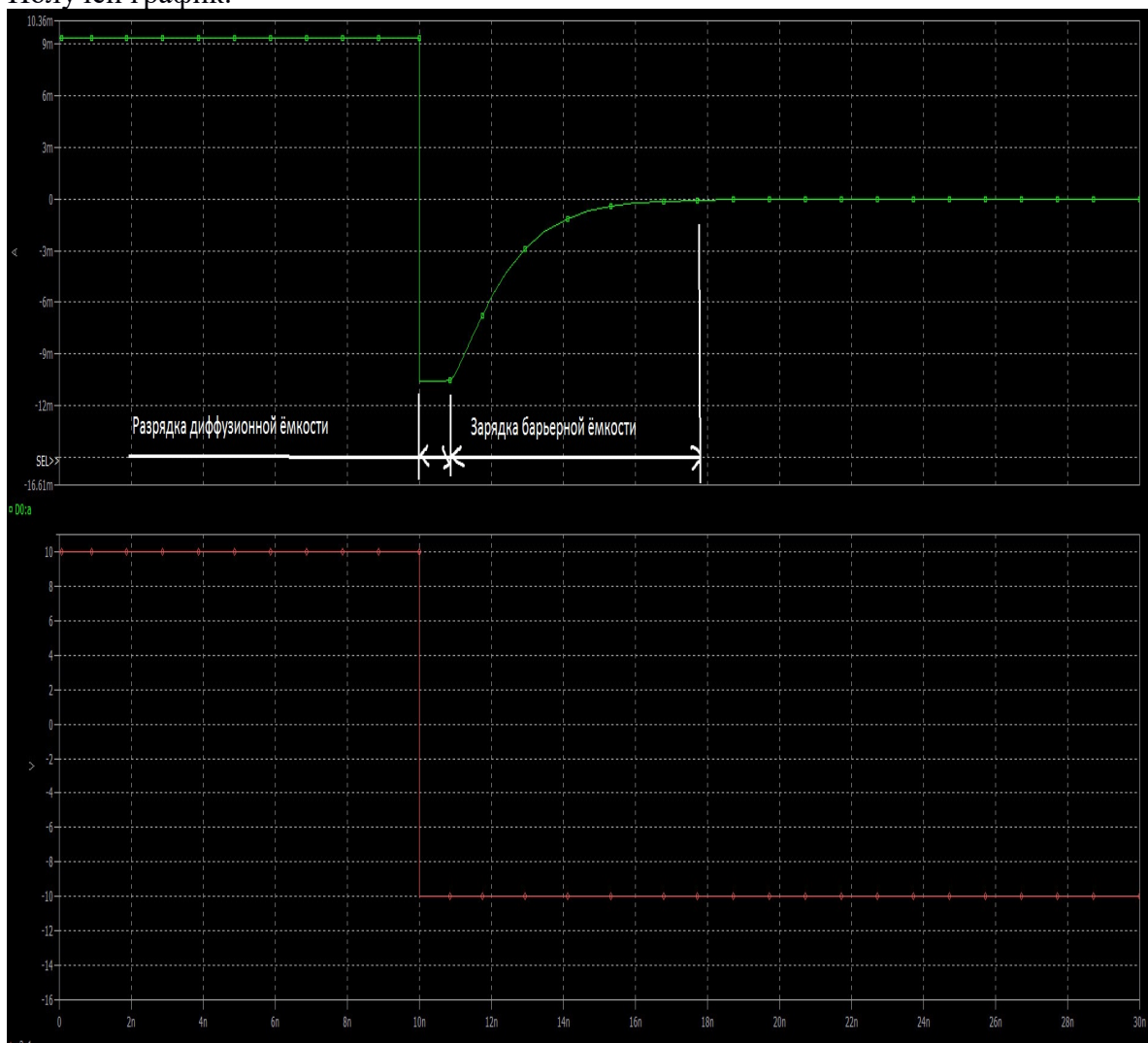


V1, V2 – размах импульсного источника напряжения, TD – начальная задержка, длительность заднего фронта, TF – длительность переднего фронта, TR – длительность заднего фронта, PW – длительность плоской вершины, PER – период импульсного сигнала.

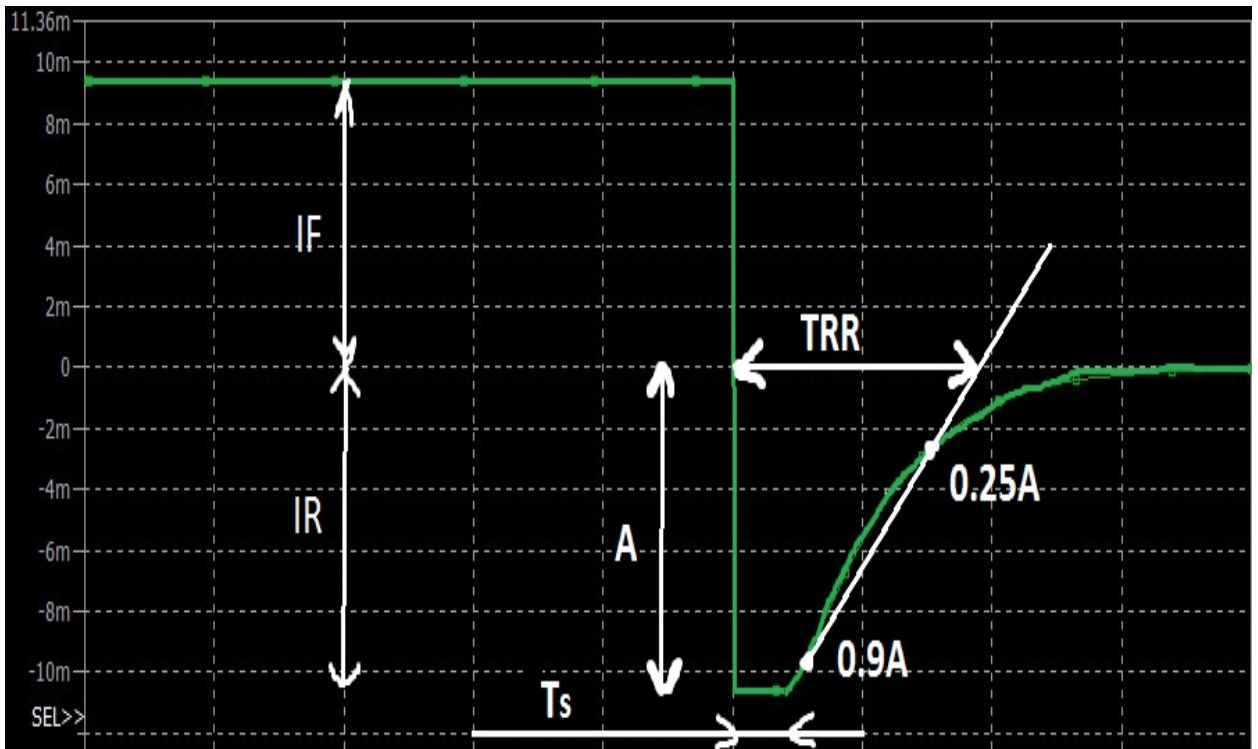
Выбирается метод анализа transient (временной, кратковременный) в интервале 30 нс и шагом 1 нс.



Получен график.



Нижний график – подаваемое напряжение, верхний – ток в диоде.



$$T_s = 0.88 \text{ ns}$$

$$IR = A = 10.6 \text{ mA}$$

$$IF = 9.35 \text{ mA}$$

Формула для времени переноса заряда:

$$TT = \frac{T_s}{\ln \left[1 + \frac{IF}{IR} \right]}, \text{ где}$$

T_s - время запаздывания обратного напряжения. (Интервал времени от момента, когда ток проходит через нулевое значение, изменяя направление с прямого на обратное до момента, когда обратный ток достигает амплитудного значения).

IF – прямой ток

IR – обратный ток

TT – время переноса заряда

$$\frac{0.88}{\ln \left(1 + \frac{9.35}{10.6} \right)} \approx 1.38 \text{ ns}$$

что совпадает со значением TT из SPICE параметров.