

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ И ВФХ ИНЕРЦИОННОЙ И
БЕЗЫНЕРЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДИОДА**

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Томск 2018

1 Введение

В основе компьютерного проектирования лежит замещение элементов их моделями, позволяющими рассчитать отклик элемента при известном воздействии на него. Самый простой для моделирования случай – это когда объект является линейным. Для построения линейной модели достаточно каким-либо образом описать импульсную характеристику или передаточную функцию объекта. Моделирование нелинейных объектов значительно сложнее, чем линейных, так как для нелинейных неизвестно соотношение воздействия на объект и отклика на него. Модели нелинейных объектов создаются для конкретных элементов с учетом физики их работы. Универсальные модели, т.е. в виде черного ящика, без учета физики работы существуют, но они «работают» только на ограниченном множестве входных сигналов. Различают два типа моделей нелинейных элементов: безынерционные и «энергоемкие» (инерционные). Самым простым нелинейным элементом является полупроводниковый диод. Его безынерционная модель, построенная с учетом физики его работы, выглядит следующим образом:

$$i(u) = IS \left[\exp\left(\frac{q}{NkT} u\right) - 1 \right],$$

где IS – ток насыщения [А];

N – коэффициент неидеальности;

q – заряд электрона [Кл];

k – постоянная Больцмана [Дж/К];

T – абсолютная температура [К].

Таким образом, если не учитывать емкость диода, то его простейшая модель полностью определяется всего **двумя параметрами: IS и N** . Эти параметры диода входят в качестве главных в систему SPICE-параметров. Чтобы называть такую характеристику $i(u)$, существует специальный термин вольт-

амперная характеристика (ВАХ). Реально ВАХ определяется более сложным образом, чтобы учитывать процессы пробоя при отрицательном смещении диода.

К нелинейным чисто реактивным элементам относятся, прежде всего, емкости *p-n*-переходов и структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). В настоящее время реально используются только модели нелинейных емкостей, у которых емкость зависит только от **мгновенного напряжения** на них. Это позволяет свести моделирование к дифференциальному уравнению первого порядка, которое относительно легко решается:

$$i(t) = C(u) \frac{du(t)}{dt}.$$

Зависимость $C(u)$ называется вольт-фарадной характеристикой (ВФХ).

Модель нелинейной емкости *p-n*-перехода в основном определяется так называемой барьерной емкостью. Величина барьерной емкости тем больше, чем больше компенсируется контактная разность потенциалов внешним напряжением:

$$C(u) = CJ_0 \left(1 - \frac{u}{VJ} \right)^{-M},$$

где CJ_0 – емкость перехода при нулевом смещении [Ф];

VJ – контактная разность потенциалов [В];

M – коэффициент нелинейности ВФХ (зависит от распределения примесей в переходе). Обычно $M = 0.33 \dots 0.5$.

Когда *p-n*-переход находится в прямом смещении и через него начинает течь прямой ток, в области пространственного заряда накапливается некоторое количество носителей заряда (неосновных). Они создают дополнительный заряд (а, следовательно, емкость) перехода. Эта емкость называется диффузионной.

Количество дополнительного заряда q определяется величиной прямого тока через переход i и подвижностью носителей заряда:

$$q(u) = TT i(u),$$

где TT (transition time) – время переноса заряда.

Подставим в эту формулу ВАХ и получим:

$$q_d(u) = TT IS \left[\exp\left(\frac{q}{NkT} u\right) - 1 \right]$$

Диффузионная емкость определяется как производная по напряжению от этого дополнительного заряда:

$$C_d(u) = TT IS \frac{q}{NkT} \exp\left(\frac{q}{NkT} u\right)$$

Полная емкость p - n -перехода (барьерная и диффузионная):

$$C(u) = CJO \left(1 - \frac{u}{VJ}\right)^{-M} + TT IS \frac{q}{NkT} \exp\left(\frac{q}{NkT} u\right),$$

Полная модель нелинейной емкости p - n -перехода описывается набором следующих параметров:

CJO – емкость при нулевом смещении, [Ф];

VJ – контактная разность потенциалов, [В];

M – коэффициент нелинейности ВФХ;

N – коэффициент неидеальности;

TT – время переноса заряда (время жизни неосновных носителей).

Цель лабораторной работы: получить навыки построения ВАХ и ВФХ диода. Изучить влияние регулируемых параметров на характеристики диода. Сравнить характеристики модели диода с характеристиками его эквивалентной схемы.

2 Порядок выполнения работы

2.1 Безынерционная модель диода

Запустите AWR DE. Создайте новый проект и сохраните его. Создайте рабочее поле. На панели Elements нажмите на вкладку Nonlinear => Diode. В появившемся списке выберите безынерционную модель диода (рисунок 2.1).

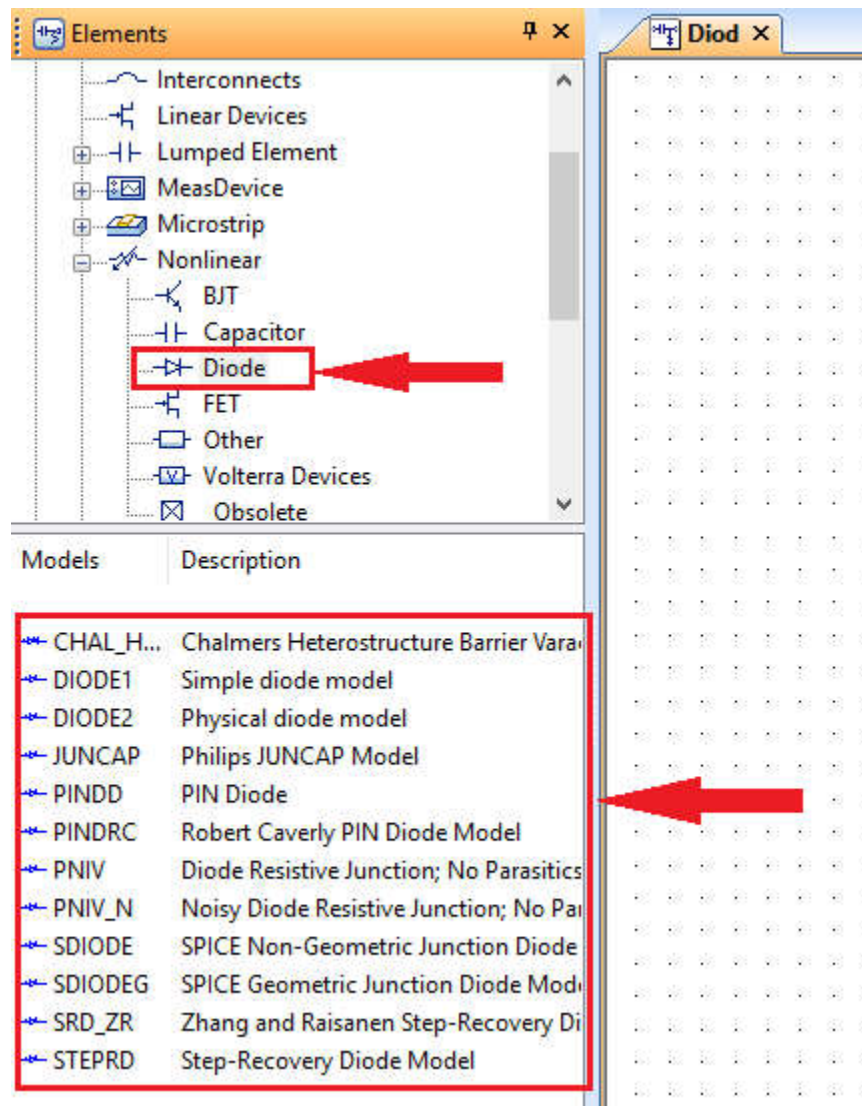


Рисунок 2.1 – Панель элементов

Далее на панели элементов нажимаем на вкладку MeasDevice => IV. Источник постоянного напряжения обозначен как IVCURVE (рисунок 2.2).

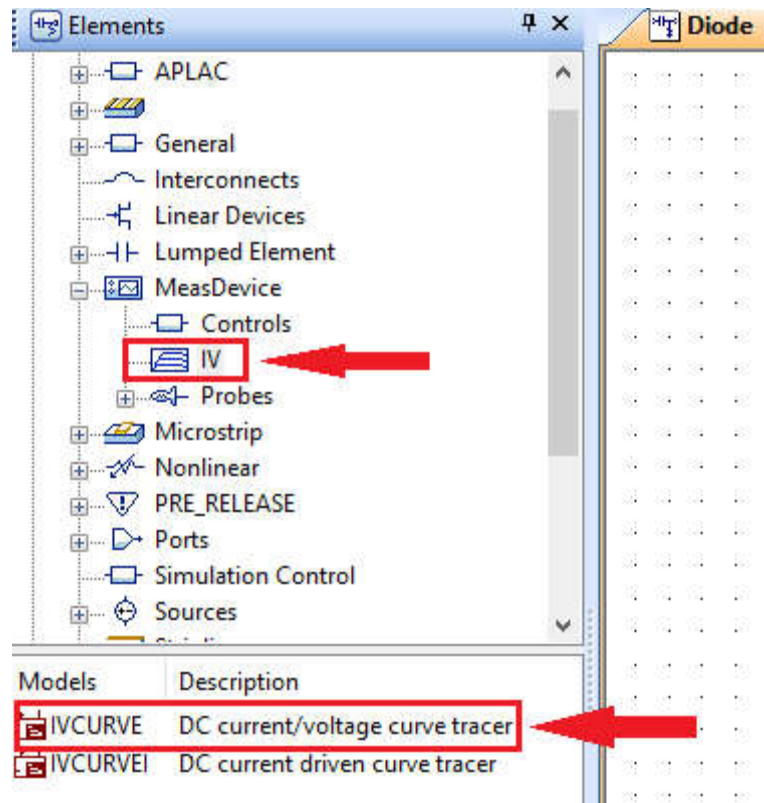


Рисунок 2.2 – Панель элементов

Соедините выход источника Swp с диодом. Выход диода заземлите. Выставьте параметры источника в соответствии с рисунком 2.3.

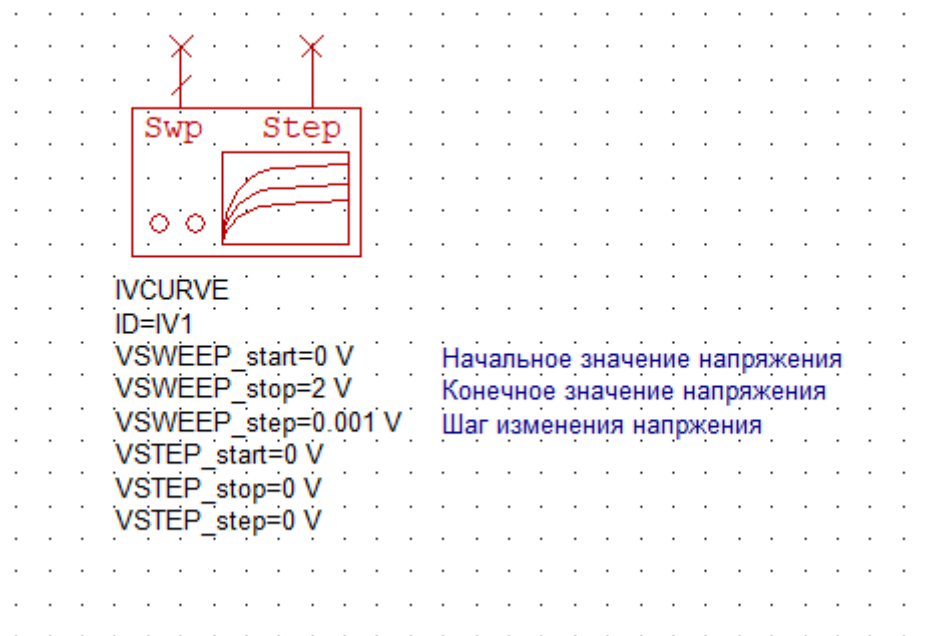


Рисунок 2.3 – Настройки модели источника постоянного напряжения

Далее необходимо построить ВАХ в **прямом** смещении. Создайте новый график, нажав Add New Graph на панели инструментов. Добавьте характеристику, нажав на Add New Measurement. Настройка характеристики представлена на рисунке 2.4.

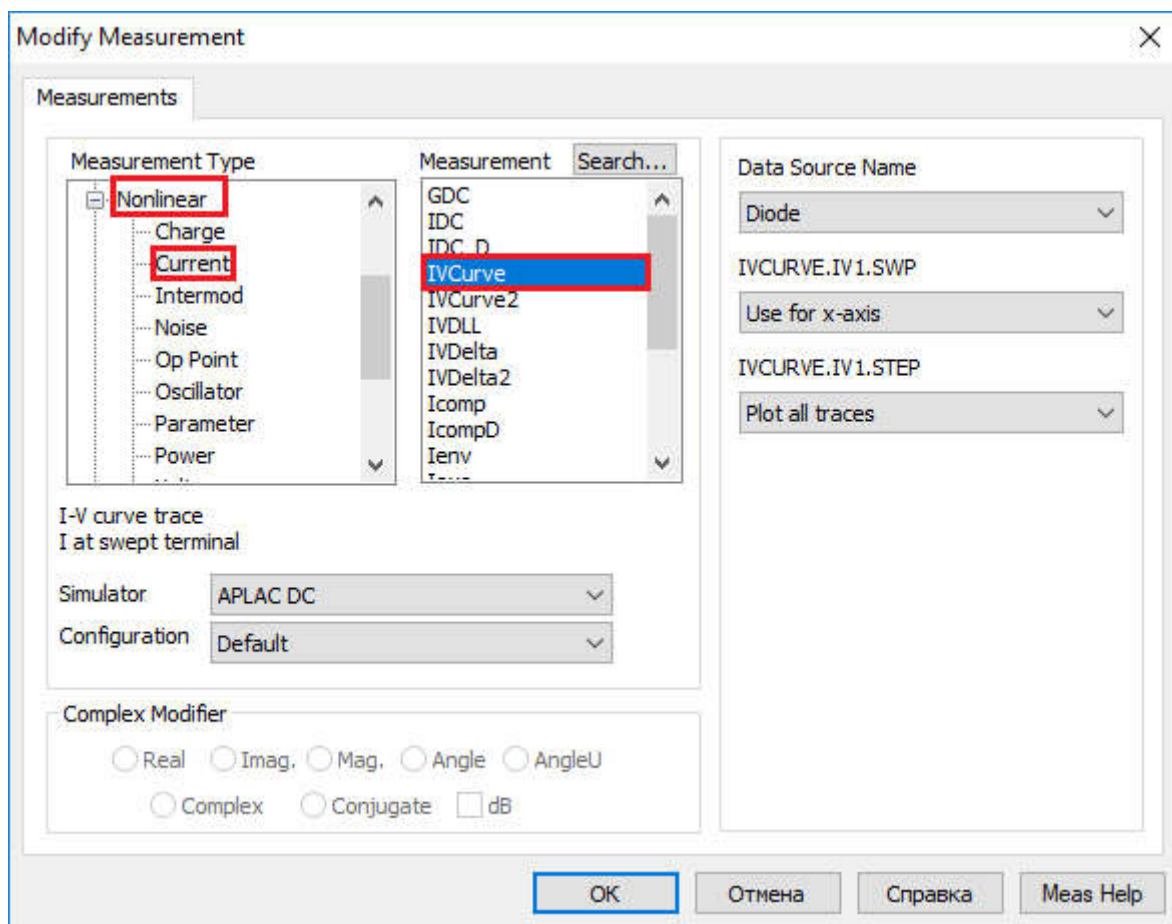


Рисунок 2.4 – Окно настройки ВАХ

Запустите симуляцию. Вольтамперная характеристика будет выглядеть следующим образом:

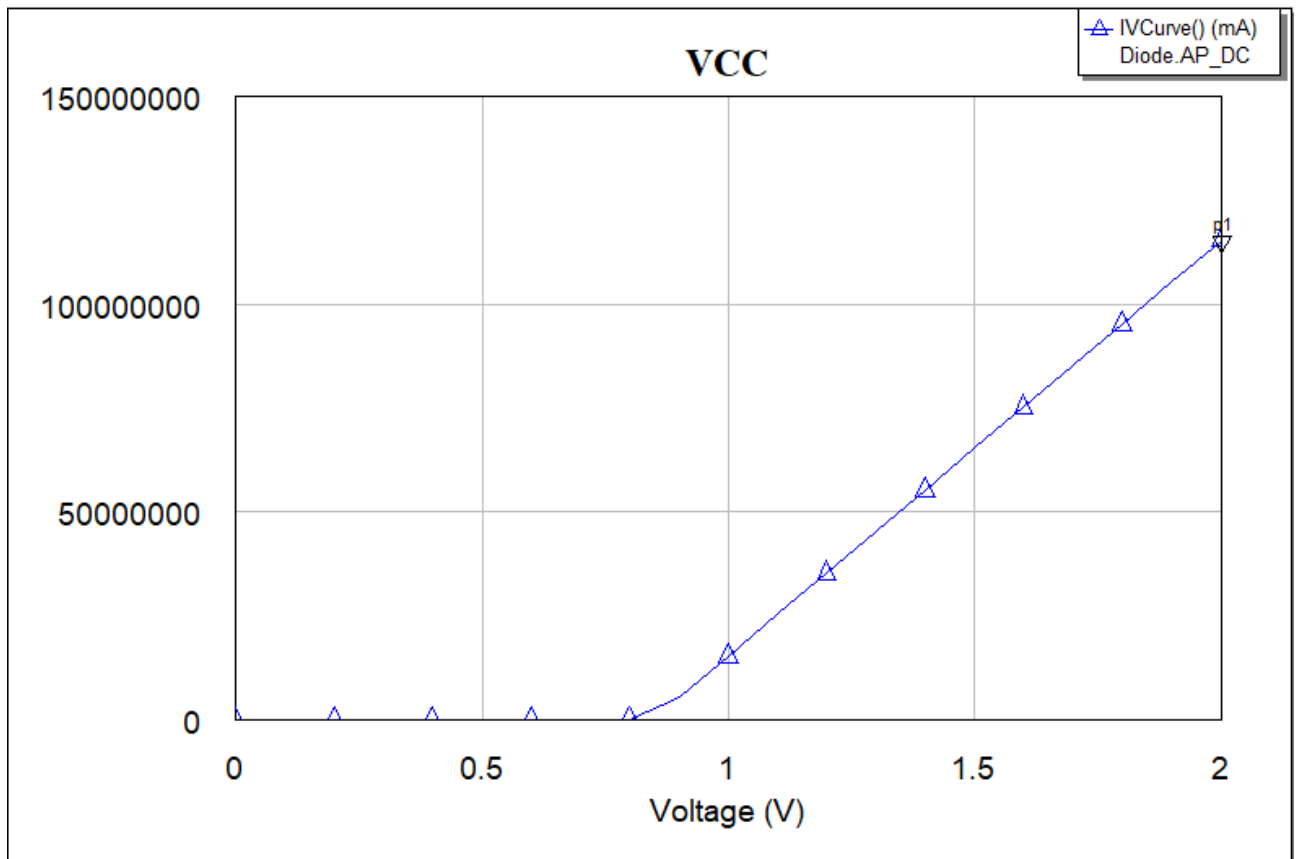


Рисунок 2.5 – ВАХ безынерционного диода в прямом смещении

Исследуйте влияние параметров модели на ВАХ диода. Для этого вызовите свойства диода и поставьте галочки в графе Tune напротив таких параметров как ток насыщения и коэффициент неидеальности (рисунок 2.6).

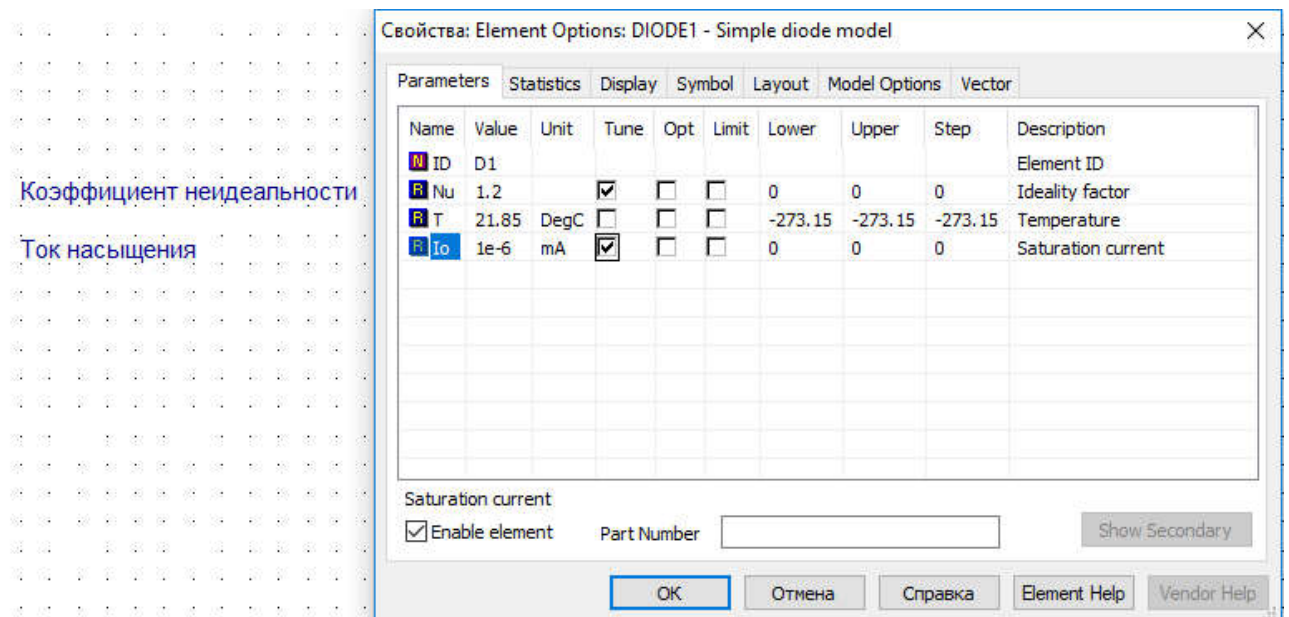


Рисунок 2.6 – Окно свойств диода

Затем воспользуйтесь инструментом Tune для наблюдения влияния изменения параметров на ВАХ безынерционного диода.

Постройте ВАХ безынерционного диода в **обратном** смещении. Для этого параметры источника настройте следующим образом:

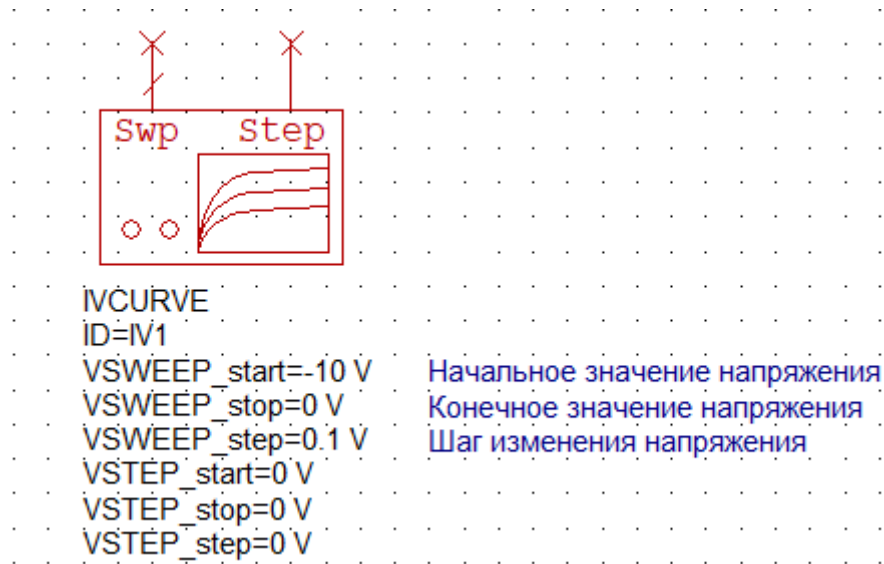


Рисунок 2.7 – Модель источника постоянного напряжения

Запустите симуляцию. ВАХ безынерционного диода будет выглядеть:

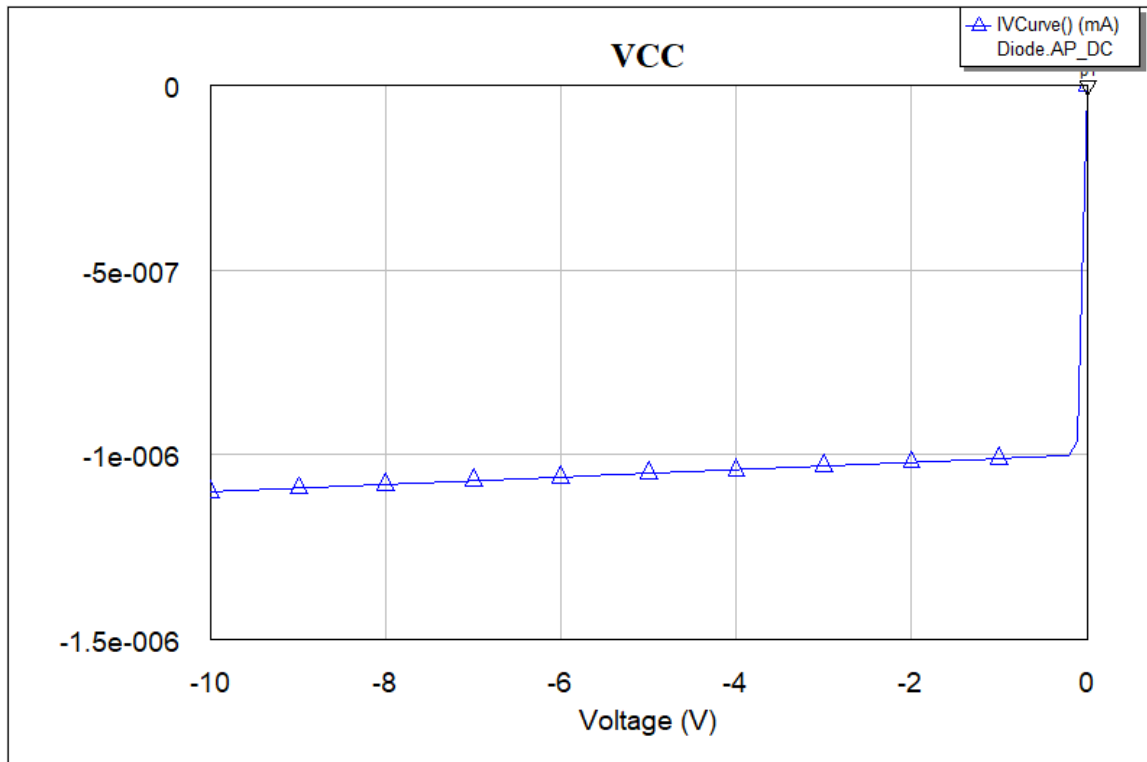


Рисунок 2.8 – ВАХ безынерционного диода в обратном смещении

Исследуйте влияние параметров модели на ВАХ диода. Для этого вызовите свойства диода и поставьте галочки в графе Tune напротив таких параметров как ток насыщения и коэффициент неидеальности. Затем воспользуйтесь инструментом Tune для наблюдения влияния изменения параметров на ВАХ безынерционного диода.

2.2 Инерционная модель диода

Добавьте еще одно рабочее поле, нажав на панели инструментов Add New Schematic. На панели Elements нажмите на вкладку Nonlinear => Diode. В появившемся списке выберите инерционную модель диода (рисунок 2.1). На панели главного меню нажмите на вкладку Options => Project Options (рисунок 2.9).

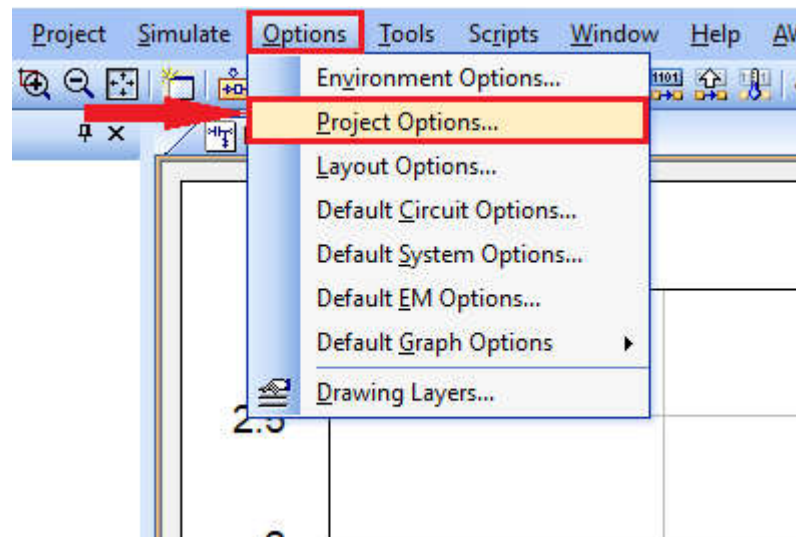


Рисунок 2.9 – Панель главного окна

В появившемся окне зайдите на вкладку Global Units и выставьте настройки, согласно рисунку 2.10. Нажмите кнопку ОК.

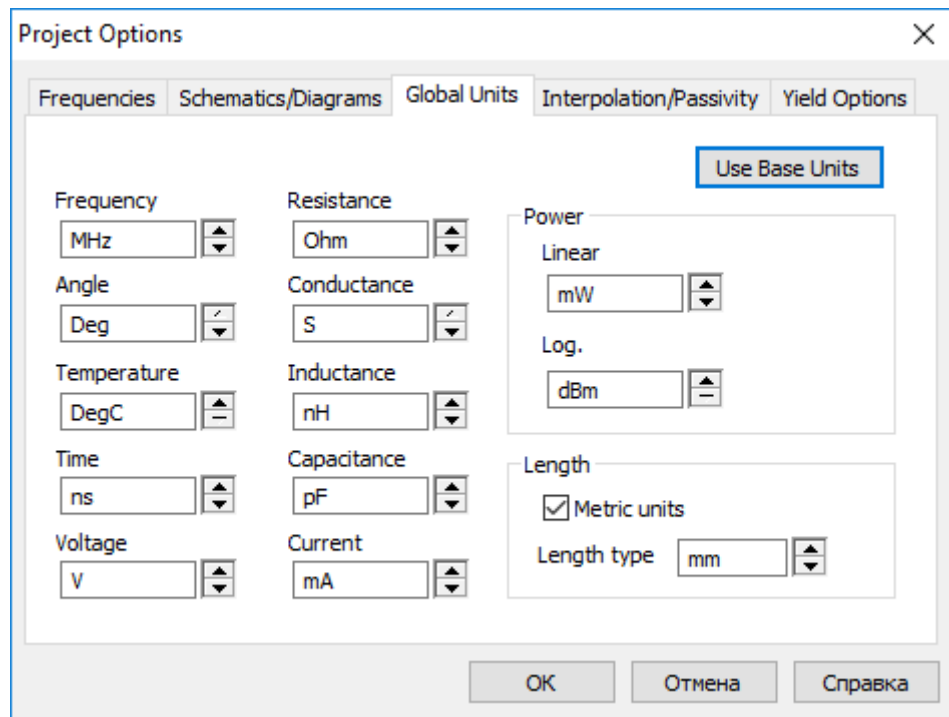


Рисунок 2.10 – Окно настроек проекта

Вызовите свойства диода. Нажмите на кнопку Show Secondary. Эта кнопка раскроет скрытые параметры. Измените параметр CJO на отличный от нуля (рисунок 2.11). Во вкладке Statistics в графе Use напротив CJO поставьте галочку (рисунок 2.12).

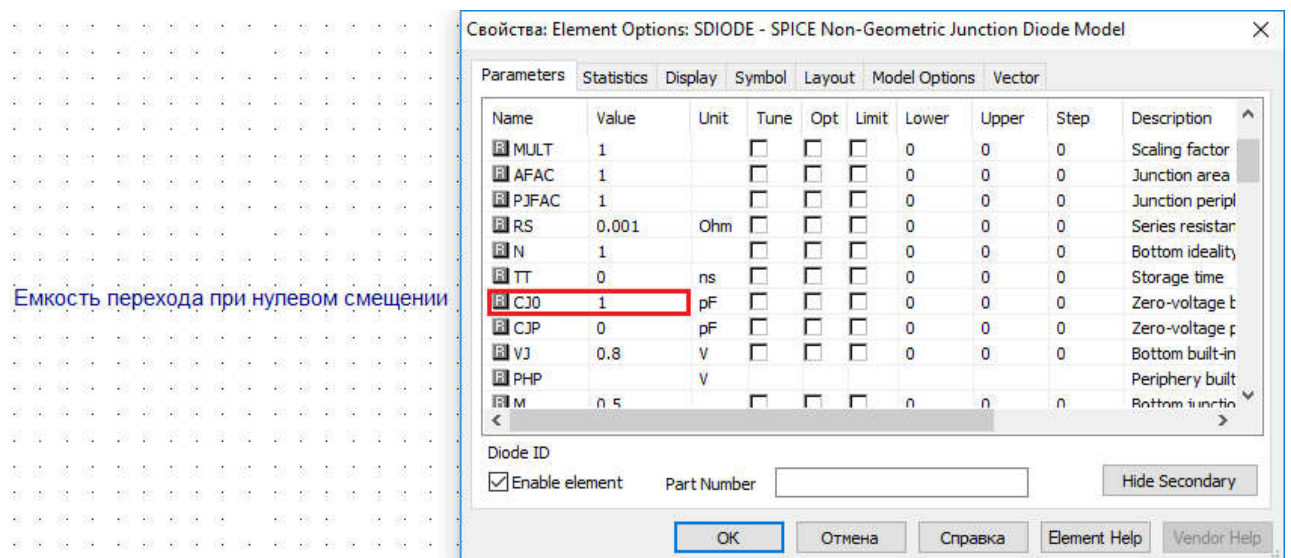


Рисунок 2.11 – Окно свойств инерционного диода

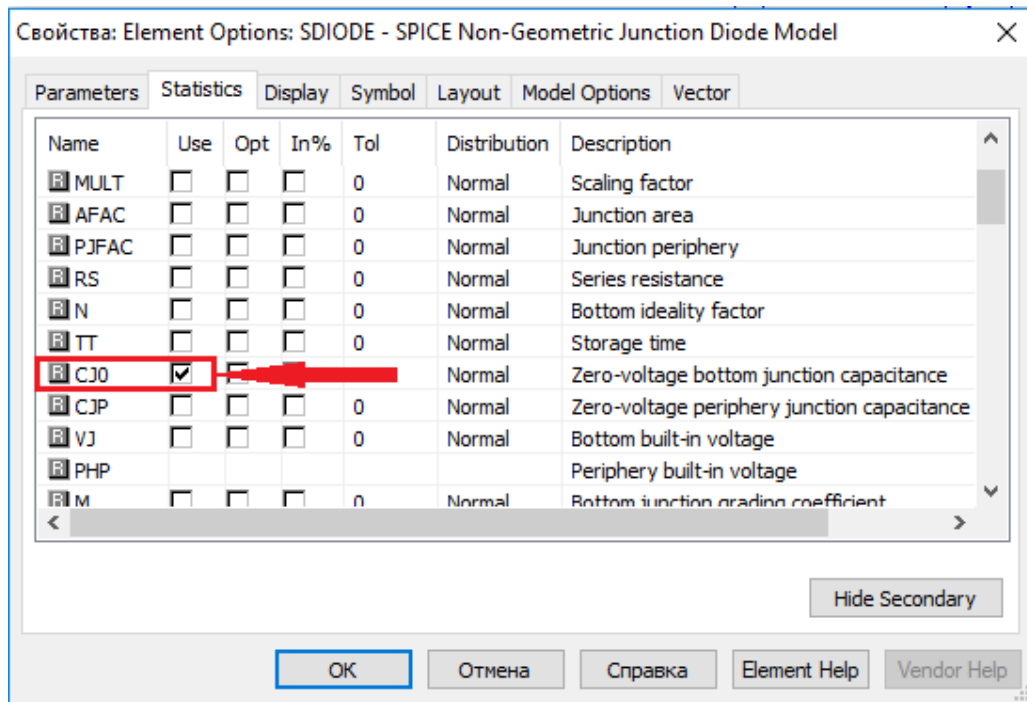


Рисунок 2.12 – Окно свойств инерционного диода

Добавьте источник постоянного напряжения. Настройте его параметры в соответствии с рисунком 2.13. Соедините выход Swp источника с диодом, второй вывод диода заземлите. Также на выходе источника поставьте порт.



Рисунок 2.13 – Настройки модели источника постоянного напряжения

Постройте вольтфарадную характеристику. Для этого создайте новый график и добавьте на него характеристику, свойства которой представлены на рисунке 2.14.

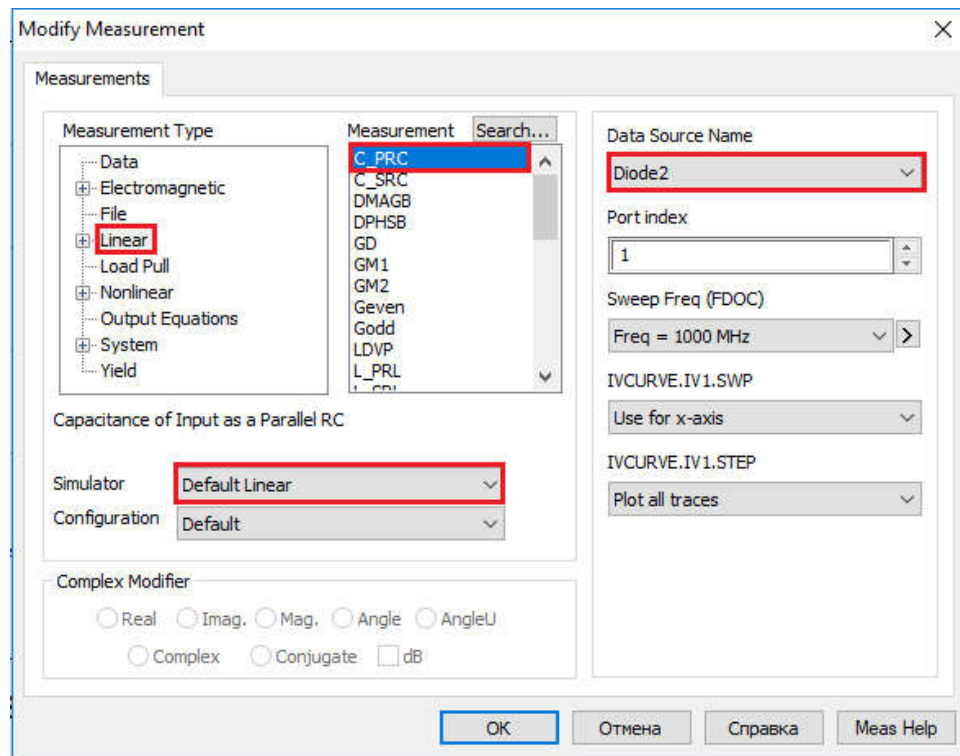


Рисунок 2.14 – Окно настройки ВФХ

Запустите симуляцию. Характеристика примет следующий вид:

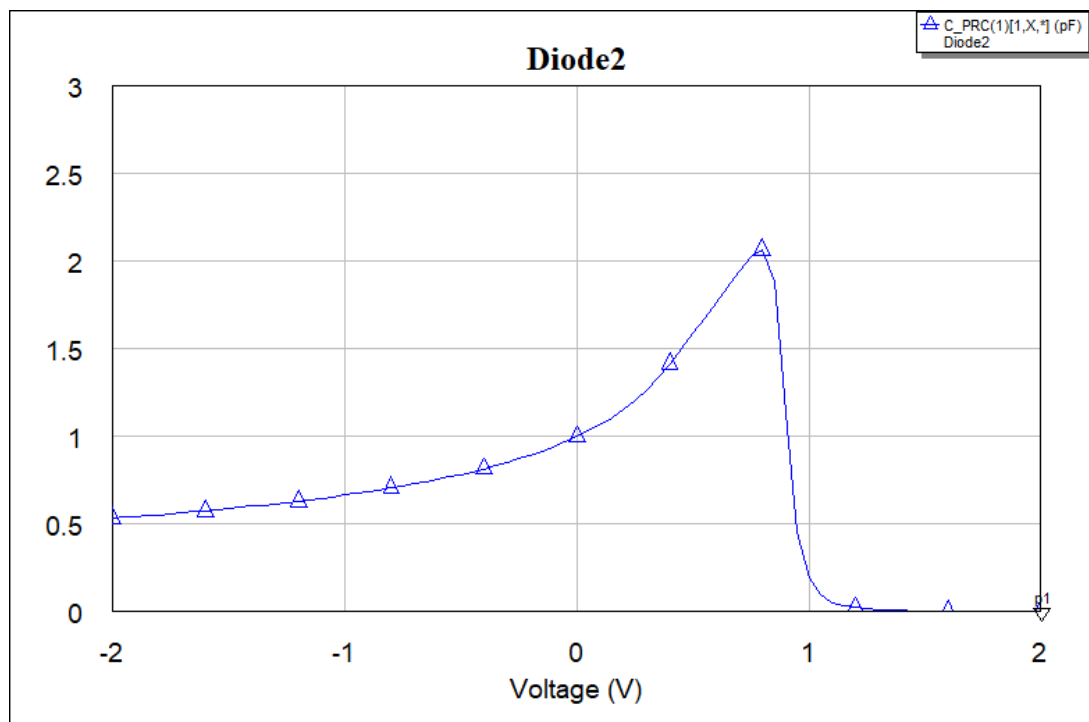


Рисунок 2.15 – ВФХ инерционного диода

Вызовите свойства диода, раскройте скрытые параметры и поставьте галочки в графе Tune, напротив таких элементов, как M, CJ0, Vj (рисунок 2.16).

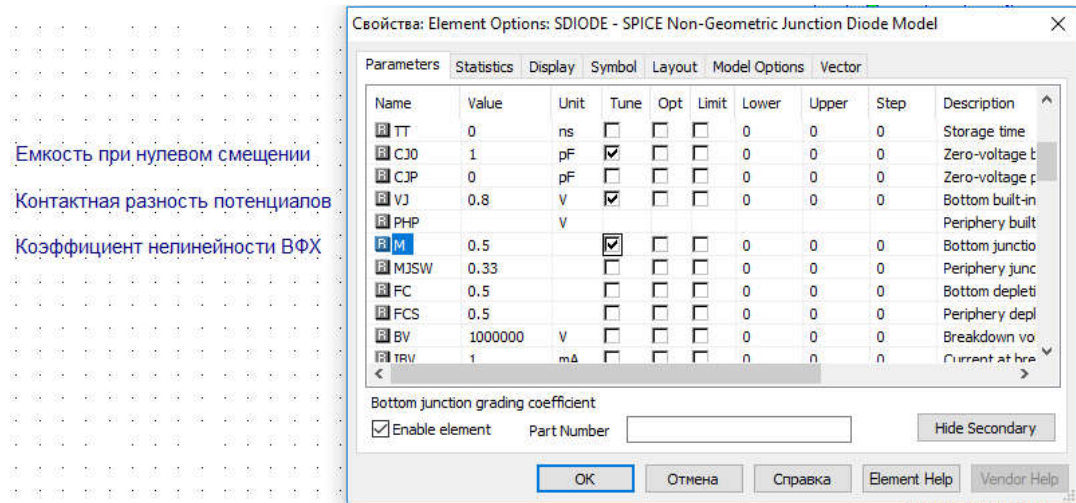


Рисунок 2.16 – Окно свойств инерционного диода

С помощью тюнера исследуйте влияние изменения номиналов выбранных параметров на вид ВФХ инерционного диода.

2.3 Эквивалентной схема диода

Добавьте рабочее поле. На панели Elements раскройте ветвь Nonlinear. В появившемся списке выберите Capacitor => PNCAP (рисунок 2.17).

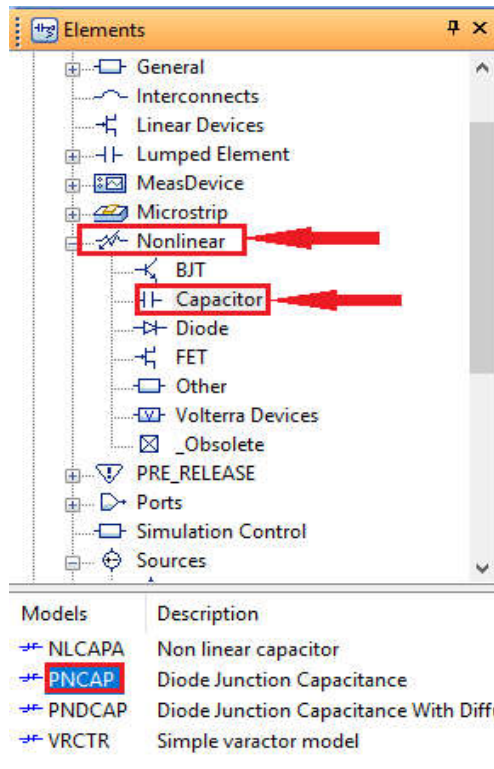


Рисунок 2.17 – Панель Elements

Далее раскройте ветвь Sources и выберете источники постоянного тока DC. Из появившегося списка выберете модель DCCSS (рисунок 2.18).

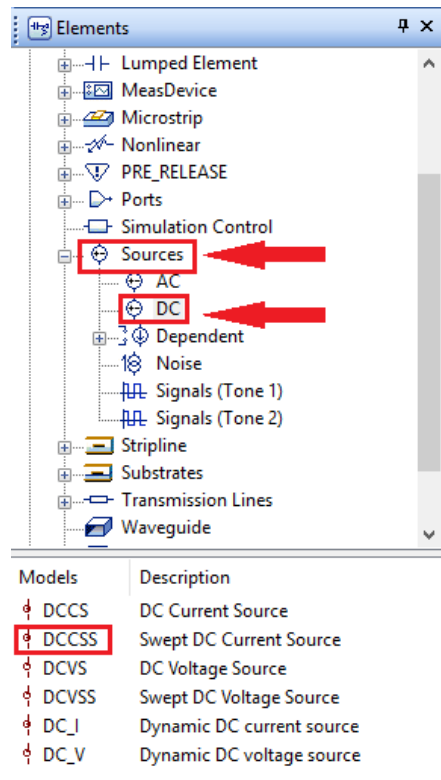


Рисунок 2.18 – Панель Elements

Соберите эквивалентную схему диода, как показано на рисунке 2.19.

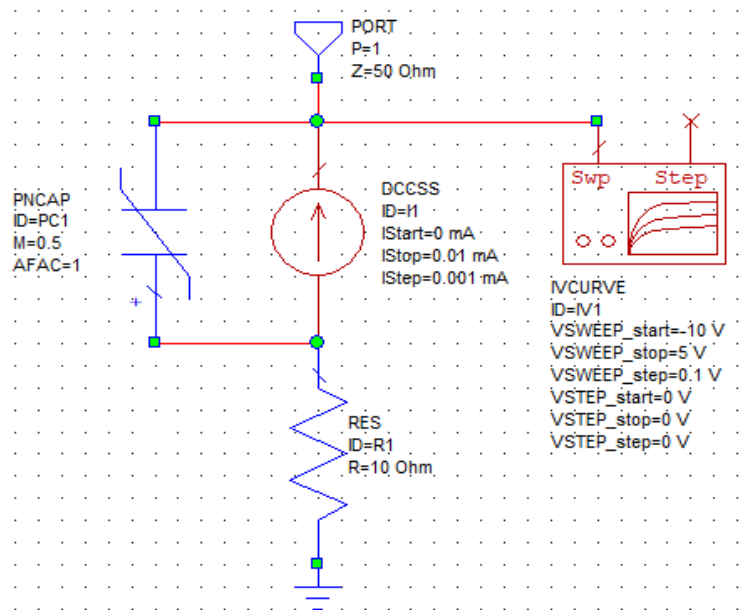


Рисунок 2.19 – Эквивалентная схема диода

Вызовите свойства конденсатора. По аналогии с инерционным диодом, измените параметр $CJ0$. Постройте ВФХ эквивалентной схемы диода. Для этого настройте график характеристики в соответствии с рисунком 2.20.

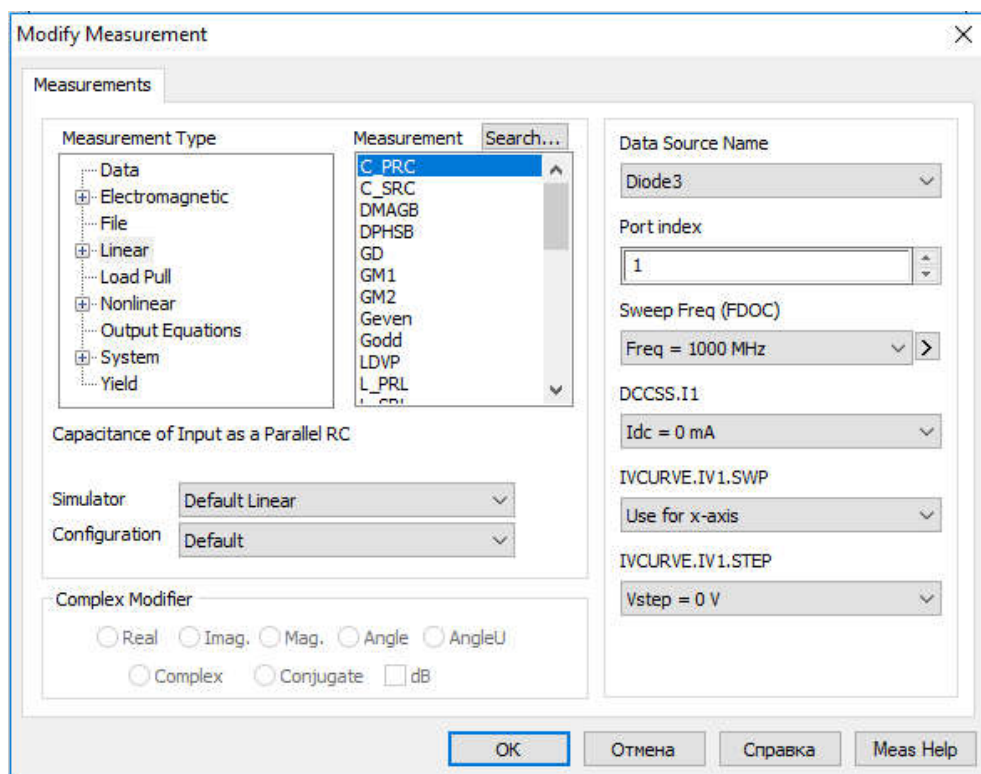


Рисунок 2.20 – Окно настройки ВФХ эквивалентной схемы диода

Запустите симуляцию. График ВФХ примет вид:

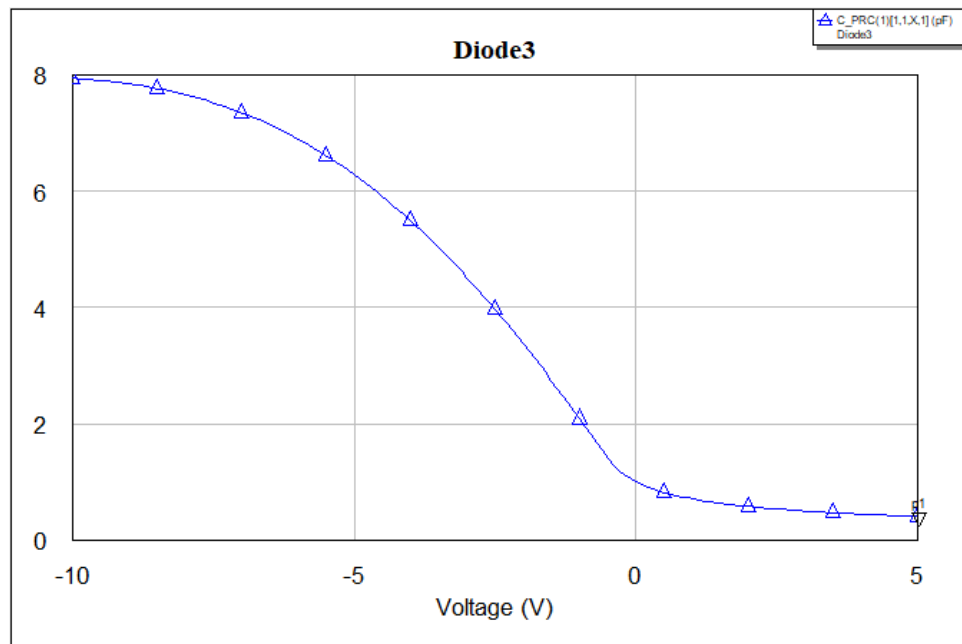


Рисунок 2.21 – ВФХ эквивалентной схемы диода

Настройте параметры модели нелинейной емкости так, чтобы ВФХ эквивалентной схемы диода совпадала с ВФХ инерционного диода. Сделайте выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие между инерционной моделью диода и безынерционной?
2. Что такое диффузионная и барьерная емкость? Как определить на ВФХ работает диффузионная, а где барьерная емкости?
3. Как и почему влияет на вид ВАХ изменение коэффициента неидеальности? Тока насыщения?
4. Как и почему влияет на вид ВФХ изменение емкости нулевого смещения? Контактной разности потенциалов? Коэффициента неидеальности?
5. Как построить ВАХ в прямом и обратном смещении?