

Методические указания к семинарам по дисциплине
«Электроника»
(для студентов 4 семестра кафедры ИУ6)

Семинар №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

ст. преподаватель
Трубачёв Е.А.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ на семинаре заключается в исследовании статических вольт-фарадных характеристик модели полупроводникового диода в программе аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей Micro-Cap 12.

ЛЕЙТМОТИВ семинара состоит в знакомстве с углубленными функциями программы аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей Micro-Cap 12.

Перед началом выполнения работы необходимо скачать и установить программу MC12. Она распространяется без лицензии и может быть загружена по адресу yadi.sk/d/hT1wjDiVAvdXtA.

Часть 1. Построение схемы

Для получения вольт-фарадной характеристики (ВФХ) диода на рабочем поле Micro-Cap 12 (MC12) составляется принципиальная схема, представленная на рис.1.

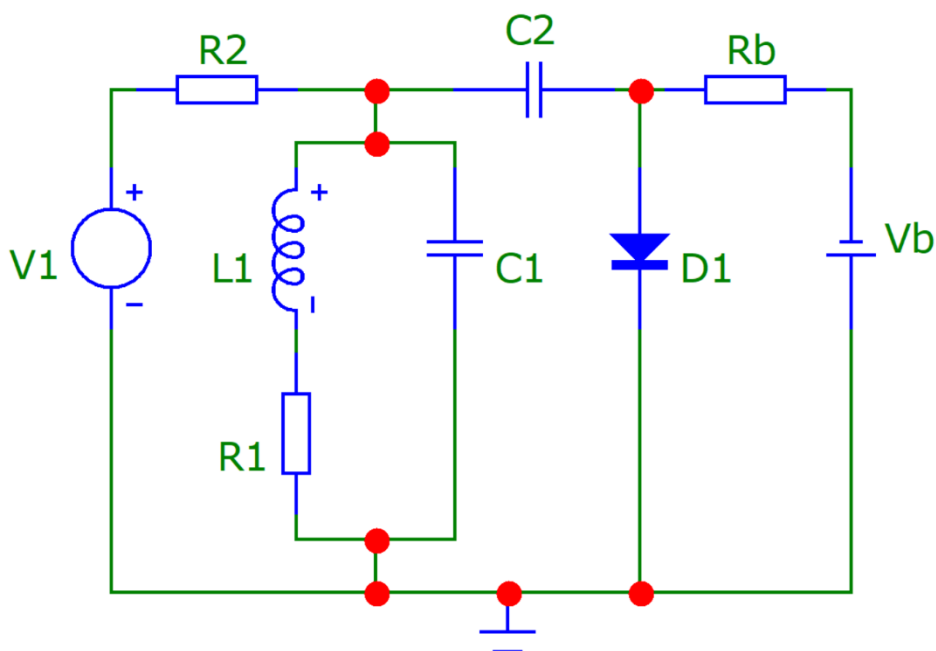


Рис. 1. Принципиальная схема для исследования ВФХ диода.

Для исследования зависимости собственной емкости полупроводникового диода от приложенного обратного напряжения (между катодом и анодом диода) необходимо поместить на схему диод D1 и источник постоянного напряжения Vb положительной обкладкой к катоду диода.

Для определения номинала реактивного элемента (в данном случае емкости диода) воспользуемся резонансными свойствами параллельного колебательного контура. Такой контур обладает наибольшим сопротивлением на частоте резонанса, при этом значение частоты резонанса связано с номиналами реактивных элементов контура. Параллельный колебательный контур состоит из катушки индуктивности L1, конденсатора C1 и активного сопротивления контура R1.

Для поиска резонансной частоты необходимо добавить в схему источник гармонических колебаний (или тонального сигнала) V1. При постоянстве амплитуды входного сигнала можно построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) параллельного колебательного контура, изменяя частоту входного сигнала и измеряя амплитуду сигнала на контуре. АЧХ будет обладать ярко выраженным пиком на частоте резонанса. По пику может быть определена резонансная частота, а по частоте резонанса могут быть рассчитаны номиналы реактивных элементов контура.

Обратите внимание, что просто поместить диод D1 в контур вместо конденсатора C1 нельзя. При таком построении схемы обратное напряжение источника Vb будет создавать короткое замыкание на катушке индуктивности L1 и малом сопротивлении R1. Поэтому диод D1 помещается параллельно C1, образуя сложную емкость, состоящую из двух элементов.

В таком случае появляется возможность «развязать» схему по постоянному и переменному току. Для этого необходимо, чтобы переменная составляющая напряжения от источника V1 падала как на контуре, так и на диоде D1, а постоянная составляющая напряжения от источника Vb должна падать только на диоде, и не должна попадать на контур (иначе произойдет короткое замыкание через катушку индуктивности). Для этого в цепи между контуром и диодом можно установить элемент с большим сопротивлением для постоянных напряжений и малым для переменных. В схеме на рис. 1 в качестве такого элемента используется разделительный конденсатор C2.

Последними элементами схемы будут резисторы R2 и Rb, имитирующие внутренние сопротивления источников V1 и Vb. Резистор R2 необходим для корректного отображения АЧХ, а резистор Rb не позволяет произойти короткому замыканию по переменному напряжению через обладающий нулевым сопротивлением источник постоянного напряжения Vb.

Шаг 1. Установите диод на схему.

Запустите программу MC12. Поместите диод (горячая клавиша **[D]**) на рабочем поле. (Выберите индивидуальную модель диода в соответствии с вашим вариантом в электронном университете (или в журнале группы) согласно таблице 1.)

Таблица 1. Варианты моделей диода.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6
Модель диода	KD202P	KD208A	KD203A	KD202J	KD213A	KD212B

Номер варианта	7	8	9	10	11	12
Модель диода	KD521A	KD202M	KD212A	KD906A	KD204B	KD102B

Номер варианта	13	14	15	16	17	18
Модель диода	KD510A	KD203V	KD203D	KD106A	KD105B	KD104A

Номер варианта	19	20	21	22	23	24
Модель диода	KD103A	KD213V	KD202V	KD203G	KD213B	KD209A

Номер варианта	25	26	27	28	29	30
Модель диода	KD202K	KD102A	KD203B	KD220A	KD202D	KD213G

Шаг 2. Определите собственную емкость диода.

В нижней половине окна **[Diode]** (рис. 2) приведена математическая модель (или SPICE-модель) диода, которая используется при анализе работы элемента и схемы. Параметр, приведенный в поле **[CJO]**, расшифровывается как «Zero-bias depletion capacitance» (при наведении на параметр в нижней части окна указывается его расшифровка в английской терминологии) или «Собственная емкость при нулевом напряжении смещения» в отечественной терминологии.

Этот параметр необходим для дальнейших расчетов и для удобства будет обозначен как CJO.

Шаг 3. Установите источник постоянного напряжения.

Поместите источник постоянного напряжения или батарейку (горячая клавиша **[B]**) на рабочем поле. Задайте значение напряжения 0 и переименуйте батарейку из «V1» (имя первого установленного на схему источника напряжения по умолчанию) в «Vb», для этого выберите строку **[PART]** окна **[Battery]** (рис. 2) и в поле **[Value]** введите новое имя для обозначения элемента.

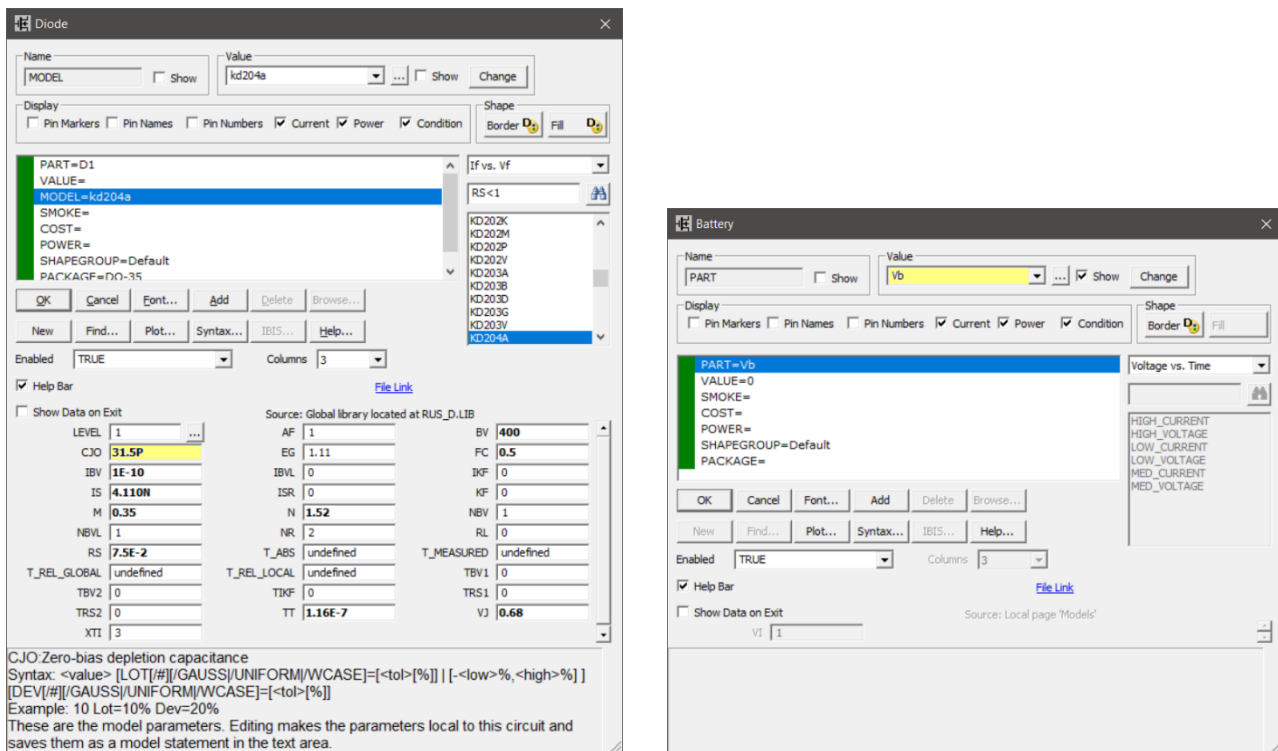


Рис. 2. Окно Diode для диода КД204А и окно Battery.

Шаг 4. Установите элементы контура, разделительный конденсатор и резисторы.

В параллельном колебательном контуре присутствуют три элемента: катушка индуктивности L1, конденсатор C1 и резистор R1. Необходимо определить номиналы этих элементов.

Для начала установите конденсатор (горячая клавиша **C**) в контуре C1, выбрав его номинал в диапазоне от 1 до 5 значений параметра CJO. Затем установите разделительный конденсатор C2 (рис. 1), выбрав его номинал в диапазоне от 100 до 1000 значений параметра CJO. Таким образом сложная емкость, состоящая из конденсаторов C1, C2 и собственной емкости диода D1 может быть приближенно рассчитана без учета влияния разделительного конденсатора C2 как

$$C_k = C1 + \frac{C2 \cdot CJO}{C2 + CJO} \approx C1 + CJO.$$

Затем установите катушку индуктивности (горячая клавиша **L**). (На изображении катушки индуктивности присутствуют обозначения полярности, но на них можно не обращать внимания.) Номинал катушки индуктивности необходимо выбрать, руководствуясь формулой Томпсона. То есть связать значение частоты резонанса f_0 и общей емкости контура C_k через номинал катушки:

$$L1 = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot (C1 + CJO)}. \quad (1)$$

В качестве последнего элемента контура установите резистор (горячая клавиша **R**). Его номинал определяется параметрами контура и соотношением реактивных потерь в контуре к активным – то есть параметром добротности Q по следующей формуле:

$$R1 = \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{\frac{L1}{C1}}. \quad (2)$$

Помимо элементов контура в схеме присутствуют два резистора R2 и Rb, отвечающие за сопротивление источников переменного и постоянного напряжения. Номиналы этих резисторов выбираются в диапазоне от 1 до 5 значений сопротивления контура на резонансной частоте, а это сопротивление может быть определено из значений элементов контура как

$$R_{рез} = \frac{1}{R1} \cdot \frac{L1}{C1}. \quad (3)$$

По умолчанию резисторы на схеме обозначаются в соответствии с американскими стандартами (как зигзаги). Для корректного обозначения резисторов согласно отечественному ГОСТ необходимо перейти в меню **Windows** → **Component Editor...**. В правой части появившегося окна **Component Editor** выберите **Analog Primitives** → **Passive Components** → **Resistor**. Затем в поле **Shape Name** измените значение с **Resistor** на **Resistor_Euro** (рис. 3). Закройте окно и сохраните результаты. В дальнейшем все резисторы будут обозначаться на схемах корректно.

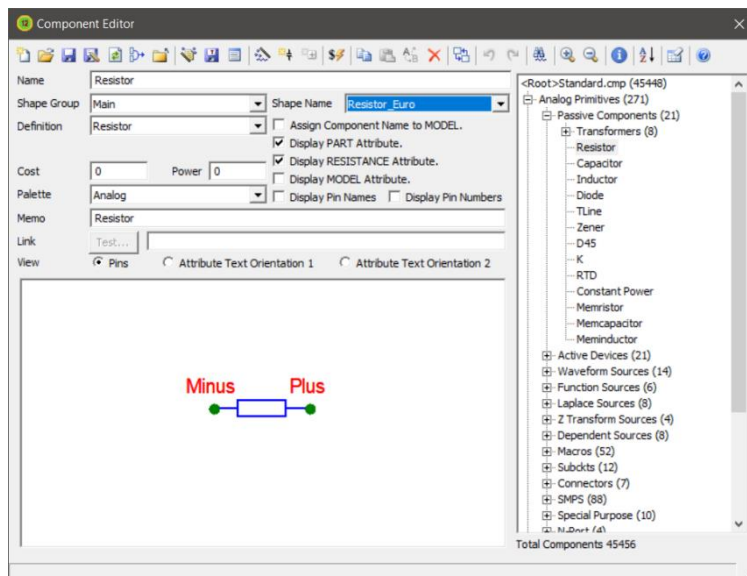


Рис. 3. Окно Component Editor.

Шаг 5. Установите источник гармонических колебаний.

Установите источник напряжения (горячая клавиша **V**).

По умолчанию источник напряжения работает в импульсном режиме. Для изменения режима работы на гармонический выберите вкладку **Sin** в нижней части окна **Voltage Source** (рис. 4). Значения амплитуды (параметр VA) и частоты (параметр F0) сигнала можно оставить установленными по умолчанию. При построении АЧХ частота будет изменяться средствами MC12.

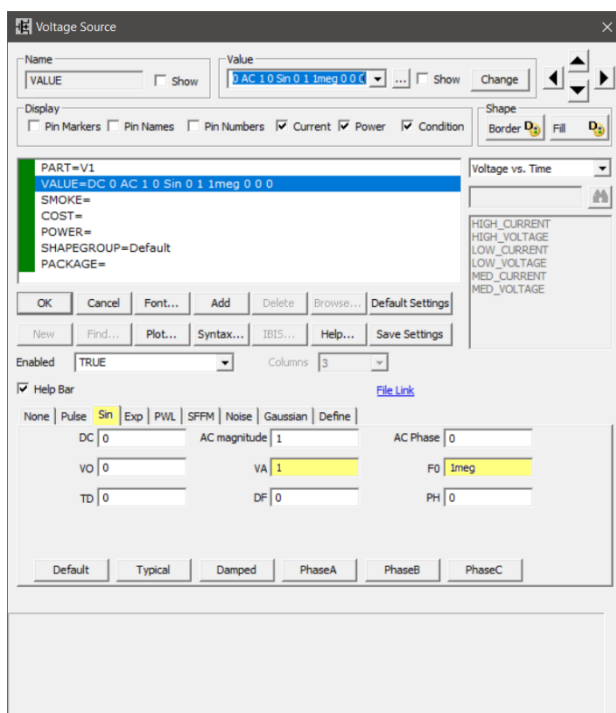


Рис. 4. Окно Voltage Source.

Шаг 6. Закончите построение схемы.

Соедините установленные на рабочем поле элементы (рис. 1) с помощью проводника (горячее сочетание клавиш **Ctrl + W**). Добавьте на схему землю (горячая клавиша **G**).

Часть 2. Анализ АЧХ

Шаг 7. Постройте график АЧХ.

Перейдите в меню **Analysis** → **AC...** для запуска частотного анализа.

В появившемся окне **AC Analysis Limits** (рис. 5) необходимо внести три изменения.

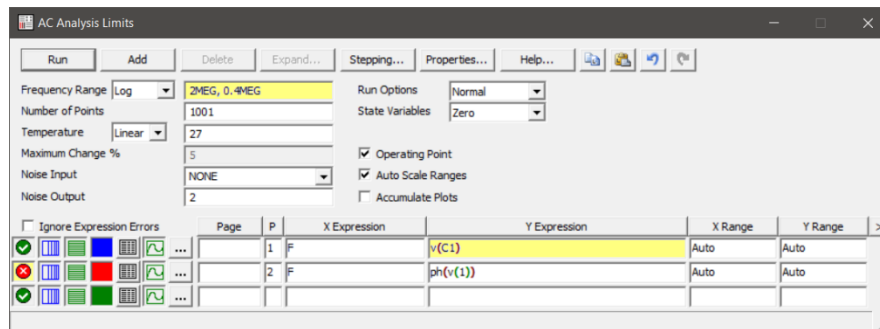


Рис. 5. Окно AC Analysis Limits.

Во-первых, необходимо задать диапазон рассматриваемых частот для удобного анализа АЧХ. Для этого в поле **Frequency Range** укажите сначала максимальную частоту, затем минимальную (строго в таком порядке). Можно взять верхнюю частоту в 2 раза больше частоты резонанса, а нижнюю – в 2 раза меньше. При дальнейшем анализе графиков этот диапазон можно менять так, чтобы на графиках отображались все важные фрагменты исследуемых графиков.

Во-вторых, необходимо построить АЧХ, где в качестве амплитудного параметра выбирается амплитуда напряжения на контуре. Поскольку при построении схемы в соответствии с рис. 1 напряжение на контуре – это то же самое, что напряжение на конденсаторе C1, среди нижних трех строк в первой строке в поле **Y Expression** необходимо внести запись **v(C1)**.

В-третьих, для удобства отображения графиков можно убрать построение фазо-частотной характеристики (ФЧХ), которая строится по умолчанию во второй строке. Для этого в самом левом положении второй строки двойным нажатием левой кнопки мыши на галочке в зеленом кружочке превратите ее в крестик в красном кружочке.

После трех внесенных изменений можно запустить анализ с помощью кнопки **Run**.

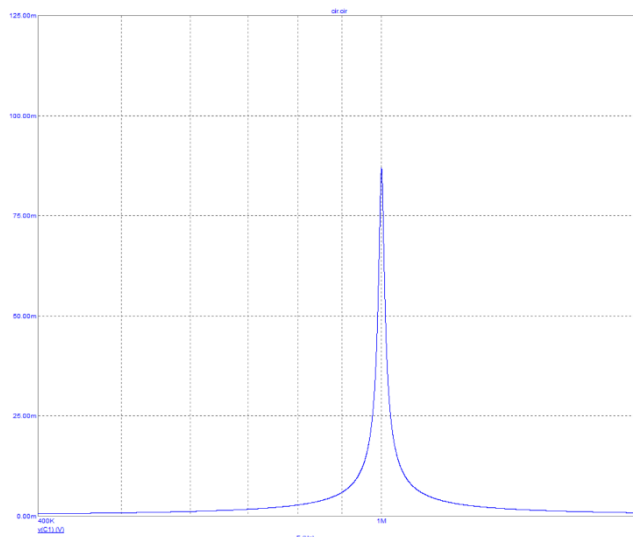


Рис. 6. АЧХ напряжения на контуре.

Шаг 8. Настройте график АЧХ.

Полученный график АЧХ (рис. 6) обладает четко выраженным резонансом параллельного колебательного контура. В случае, если ваш график не имеет глобального максимума, проверьте рассчитанные номиналы элементов. Переключаться между схемой и графиком можно с помощью вкладок в нижнем левом углу рабочего окна программы MC12. При необходимости снова вызвать окно **AC Analysis Limits** можно с помощью меню **AC** → **Limits...** (горячая клавиша **F9**).

Адекватные значения емкости конденсатора $C1$ лежат в диапазоне от 1 пФ до 1 нФ, емкости конденсатора $C2$ – в диапазоне от 100 пФ до 100 нФ. Индуктивность катушки индуктивности $L1$ принимает значения в диапазоне от 10 мкГн до 10 мГн. Сопротивление активных потерь контура $R1$ обычно выбирается в диапазоне от 1 Ом до 1 кОм. Сопротивления источников напряжения $R2$ и Rb должны лежать в диапазонах от 100 кОм до 100 МОм. При серьезном отличии (на несколько порядков) расчетных значений от приведенных вероятных диапазонов проверьте расчеты.

Для получения более информативного графика необходимо внести несколько изменений в отображение. Для этого двойным нажатием левой кнопки мыши в любом месте графика вызовите окно **Properties for AC Analysis** (рис. 7). Это окно отвечает за отображение графика. Перейдите во вкладку **Colors, Fonts, and Lines**. Здесь содержатся свойства всех визуальных элементов графика.

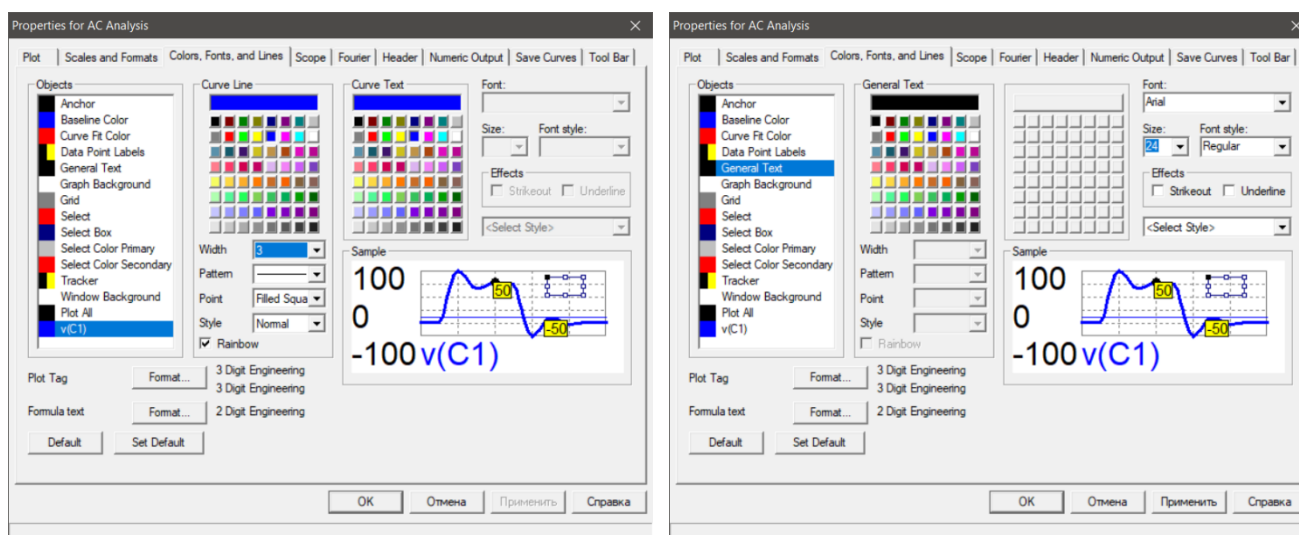


Рис. 7. Окно Properties for AC Analysis.




Выберите объект **v(C1)** (отвечающий за построение кривой) в области **Objects** левой части окна **Properties for AC Analysis**. В поле **Width** области **Curve Line** выберите значение **2** или **3**, чтобы увеличить толщину линий графика. В таком случае при добавлении графика в отчет о проделанной работе линии графика будут различимыми. По желанию можете поставить галочку в чекбокс **Rainbow**, эта опция пригодится при последующих построениях.

Выберите объект **General Text** (отвечающий за все основные числовые и текстовые подписи на графике). В поле **Size** выберите размер шрифта в диапазоне от **20** до **28** на свое усмотрение. Здесь также можно изменить шрифт (поле **Font**) и стиль начертания символов (Поле **Font style**). По желанию в области **General Text** выберите черный цвет текста.

При выборе цвета на графиках исходите из расчета, что в распечатанном виде результаты работы вероятнее всего будут черно-белыми, при этом они должны быть читаемы. По этой же причине при построении множества графиков имеет смысл сделать их отличающимися не только по цвету, но и по стилю начертания линий, за это отвечает поле **Pattern** области **Curve Line**.

В качестве последнего обязательного действия выберите объект **Tracker** (отвечающий за маркеры) и увеличьте размер шрифта в поле **Size** также до значения в диапазоне от **20** до **28** на свое усмотрение. Все остальные изменения остаются на усмотрение выполняющего работу и могут быть изменены по желанию для более комфортной работы в программе MC12.

Шаг 9. Определите частоту резонанса.

Выберите один из инструментов, позволяющий установить маркеры (зеленые пиктограммы) на локальные или глобальные максимумы. Можно воспользоваться инструментом Peak , High , или Global High . В данном случае (глобальный максимум совпадает с единственным локальным максимумом) все эти инструменты равнозначны.

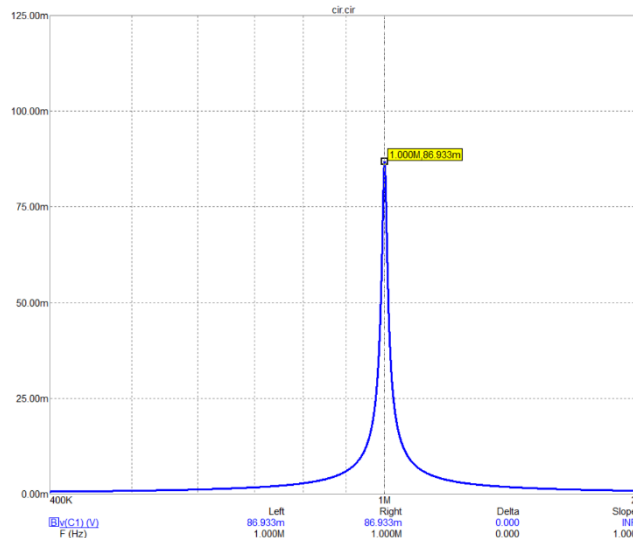


Рис. 8. АЧХ напряжения на контуре с отметками.

На графике могут быть установлены два независимых маркера: левый и правый, управляемые соответствующими кнопками мыши. Инструменты, применяемые для определения экстремумов на графике, работают с последним передвинутым левой или правой кнопкой мыши маркером.

Координата по оси абсцисс маркера, установленного на глобальном максимуме АЧХ напряжения на контуре, соответствует резонансной частоте параллельного колебательного контура. Значение частоты может быть записано для определенного значения напряжения смещения (значение напряжения источника постоянного напряжения V_b), а затем пересчитано в собственную емкость диода по следующей формуле:

$$CJO = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot L1} - C1. \quad (4)$$

Часть 3. Построение ВФХ

Для самого простого построения ВФХ можно определить 8-12 значений напряжения смещения в диапазоне от 0 В до напряжения пробоя полупроводникового диода, по очереди установить соответствующие значения напряжения на источнике постоянного напряжения V_b (рис. 1), для каждого значения напряжения смещения определить резонансную частоту, пересчитать резонансную частоту в собственную емкость диода и построить зависимость собственной емкости диода от напряжения смещения в любой программе математического моделирования. Этот путь построения графиков самый простой, но при этом требует многократного монотонного повторения.

Шаг 10. Алгоритмизируйте построение графиков.

Поскольку описанный выше процесс может быть описан в виде повторяющегося алгоритма «изменить значение напряжения источника → построить график АЧХ», программа MC12 может взять на себя алгоритмизируемую часть работы.

Для этого при запущенном анализе АС перейдите в меню **AC** → **Stepping...** (горячая клавиша **F11**). Эта функция позволяет изменять любой параметр и строить отдельные графики для каждого значения параметра. В появившемся окне **Stepping** (рис. 9) необходимо ввести следующее:

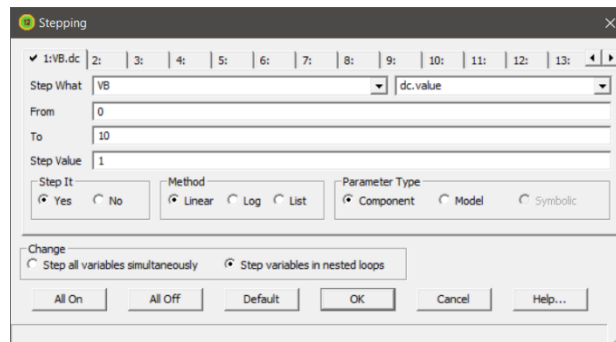


Рис. 9. Окно Stepping.

В поле **Step What** выберите источник постоянного напряжения **Vb**. Поскольку у источника постоянного напряжения нет иных параметров кроме значения напряжения, справа от этого поля будет выбран единственный пункт **dc.value**, отвечающий за значение (value) постоянного напряжения (dc).

В поле **From** введите минимальное значение варьируемого параметра (в данном случае **0**). В поле **To** – максимальное значение (меньше напряжения пробоя диода). В поле **Step Value** – шаг (выберите его исходя из разбиения указанного диапазона на 8-12 точек).

В области **Step It** выберите пункт **Yes**. Нажмите кнопку **OK** окна **Stepping**.

Повторно запустите анализ AC в меню **AC** → **Run** (горячая клавиша **F2**).

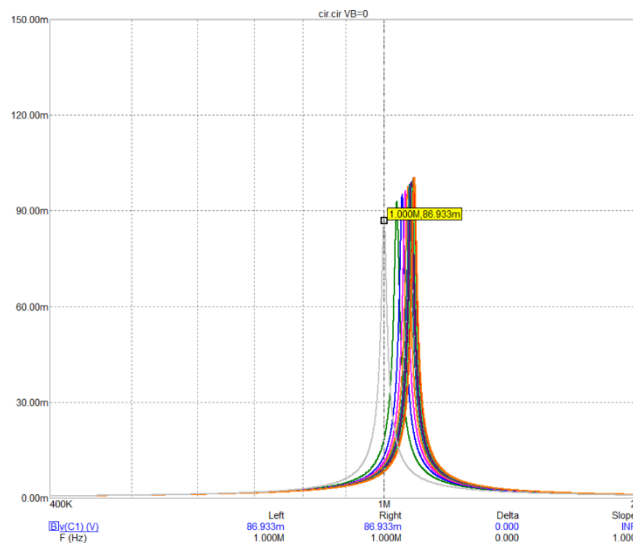


Рис. 10. АЧХ напряжения на контуре для нескольких значений напряжения смещения с отметками.

Маркеры с указанием координат могут быть выставлены также с помощью инструментов для определения локального или глобального экстремума. Для переключения между графиками можно использовать стрелки **вверх** и **вниз** на клавиатуре. Над системой координат указано, график для какого значения напряжения источника постоянного напряжения выделен в данный момент.

С помощью одновременного построения множества графиков и быстрого переключения между ними значения частоты резонанса для каждого значения напряжения смещения могут быть определены, пересчитаны по формуле (4) в собственную емкость диода и отмечены как ВФХ. Однако для этого также потребуется переход в другую программу для построения подобной зависимости.

Шаг 11. Алгоритмизируйте определение частоты резонанса.

Для каждого графика выполняется повторяющаяся последовательность действий: выставить маркер на локальный или глобальный максимум, записать значение по оси абсцисс, подставить его в формулу (4). Этот процесс также можно алгоритмизировать.

Для этого перейдите в меню **AC** → **Performance Windows** → **Add Performance Window**. Появившееся окно **Properties for Performance** позволяет строить сложные графики с помощью средств программы MC12. В области **X Axis** в единственном присутствующем поле можно выбрать параметр, изменяемый с помощью инструмента Stepping. В данном случае это напряжение на источнике постоянного напряжения Vb или напряжение смещения. Именно он будет откладываться по оси абсцисс.

По оси ординат (единственное поле в области **What Function to Plot**) по умолчанию находится следующая запись: **Peak_Y(v(C1),1,1)**. Удалите эту запись и нажмите кнопку **Get** в этой области. В помощь появившегося окна **Get Function** можно выбрать для построения практически любой параметр, который можно извлечь из построенных графиков. Для каждой функции, которую можно выбрать в списке **Function** приведено подробное описание этой функции вместе с иллюстрацией и набором сопутствующих параметров. Освоение инструмента **Get Function** позволит в дальнейшем использовать программу MC12 для максимально широкого анализа схем.

Выберите в списке **Function** окна **Get Function** значение **Peak_X** и нажмите **OK** (рис. 11).

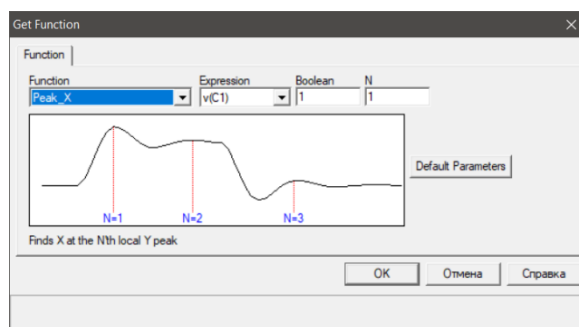


Рис. 11. Окно Get Function.

Теперь в окне **Properties for Performance**, в поле в области **What Function to Plot** нарастите вокруг записи **Peak_X(v(C1),1,1)** формулу (4). Для этого введите в этом поле запись следующего характера: $1/((2*3.14*Peak_X(v(C1),1,1))^2*L(L1))-C(C1)$ (рис. 12).

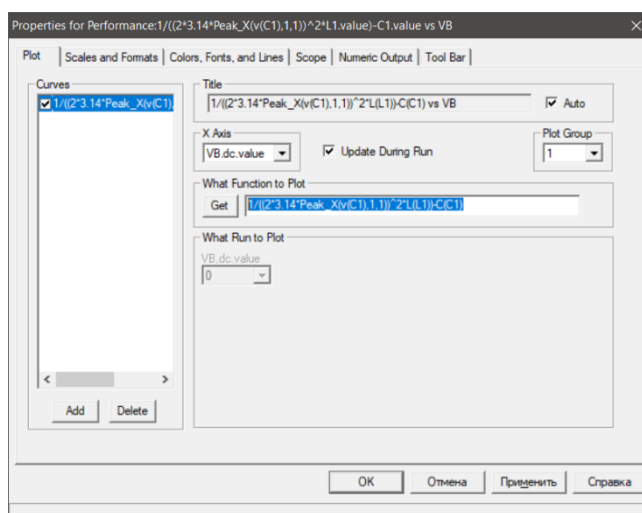


Рис. 12. Окно Properties for Performance.

Обратите внимание, что в окне **Properties for Performance**, также присутствует позволяющая настраивать внешний вид графиков вкладка **Colors, Fonts, and Lines**. После применения настроек, необходимых для информативного отображения графиков ВФХ, нажмите кнопку **OK**.

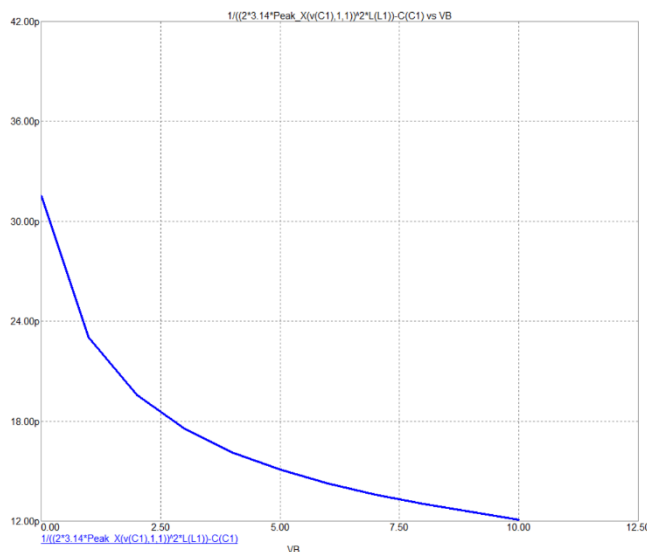


Рис. 13. ВФХ диода.

Полученная графическая зависимость (рис. 13) отображает как изменяется собственная емкость диода (параметр, полученный из изменяющейся частоты резонанса) при изменении приложенного между катодом и анодом обратного для диода напряжения (значения напряжения источника постоянного напряжения). Эта зависимость и есть вольт-фарадная характеристика диода.

Обратите внимание, что значение по оси ординат при значении 0 по оси абсцисс должно точно совпадать с параметром CJO, определенным в самом начале работы из математической модели диода. В случае, если это значение не совпадает с указанным на графике, проверьте правильность записи формулы в поле в области **What Function to Plot** окне **Properties for Performance**. Вернуться к окну **Properties for Performance** можно с помощью двойного нажатия левой кнопкой мыши в любом месте графика.