

## Лабораторная работа № 4

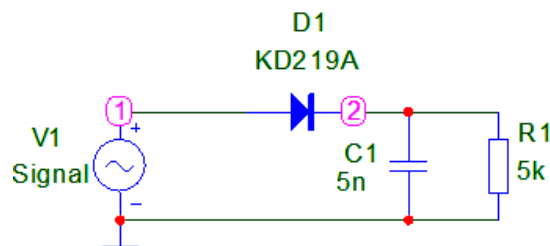
# Демодуляторы сигналов

## 1. Амплитудный демодулятор

Выполнить моделирование диодного АД сначала при действии немодулированного сигнала, а затем – сигнала с гармонической АМ.

### 1.1. Последовательный диодный АД

Схема модели и исходные данные для моделирования



Параметры сигнала:

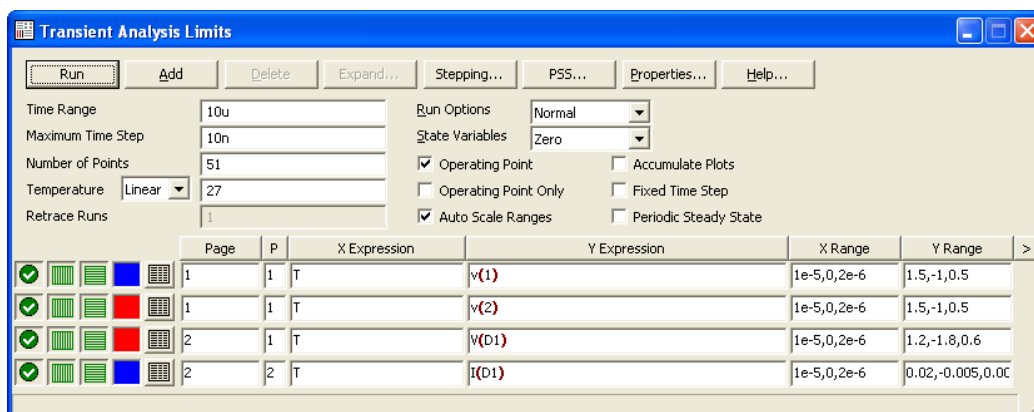
- частота  $f_0 = 465$  кГц (стандартная промежуточная частота вещательного радиоприёмника АМ сигнала);
- амплитуда 1 В.

#### 1.1.1. Процессы в АД

Получить эюры процессов в последовательном АД при действии немодулированного сигнала: напряжения на диоде  $U_d(t)$ , тока через диод  $I_d(t)$  (входного тока АД), напряжения на конденсаторе  $U_C(t)$  (выходного напряжения АД).

Время моделирования (Time Range) должно составлять 5...10 периодов сигнала. Максимальную величину шага по времени (Maximum Time Step) нужно задавать таким образом, чтобы она была много меньше (в 10 раз и более), чем период сигнала. Чем меньше эта величина, тем выше точность моделирования.

Задание на моделирование в режиме **Transient Analysis**:



Здесь время моделирования равно 10 мкс, максимальный шаг по времени 10 нс.

На 1-й странице графиков (номер указывается в поле под заголовком **Page**) строятся эпюры сигнала  $u(t)$  и напряжения на конденсаторе (на выходе АД)  $U_C(t)$  (на одном графике). На 2-й странице строятся эпюры напряжения на диоде и тока через диод.

По эпюрам тока измерить длительность импульса тока, протекающего через диод. Определить, какую часть длительности импульса тока составляет от длительности положительного полупериода сигнала (которая рассчитывается по известной частоте сигнала как  $\frac{T_0}{2} = \frac{1}{2f_0}$ ). Сделать выводы из полученных результатов.

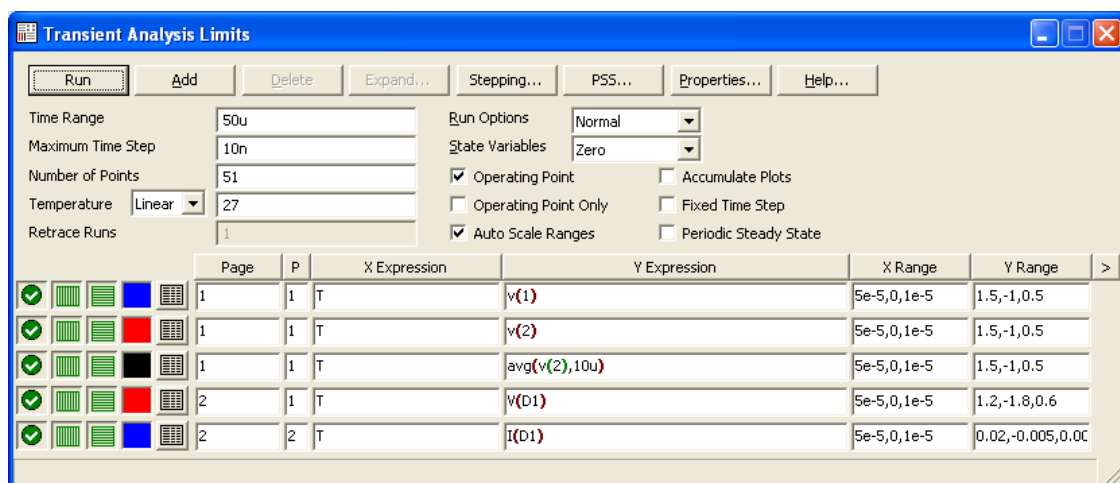
### 1.1.2. Характеристики АД

Характеристики АД (детекторная характеристика  $U_=(U)$  и коэффициент передачи АД  $K_d(U) = \frac{U_}{U}$ ) зависят как от параметров элементов, так и от амплитуды сигнала.

### Задание на моделирование

Получить зависимости постоянной составляющей напряжения на выходе АД и коэффициента передачи АД от амплитуды сигнала при изменении амплитуды от 0,05 В до 1 В.

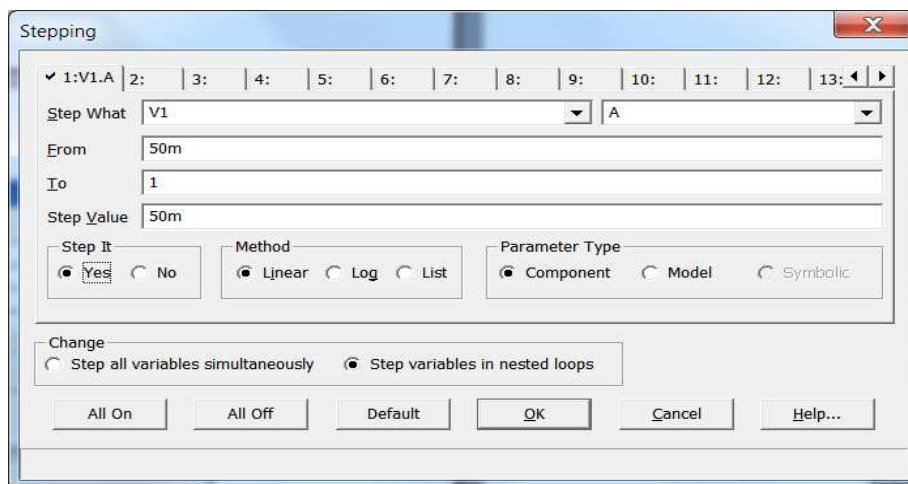
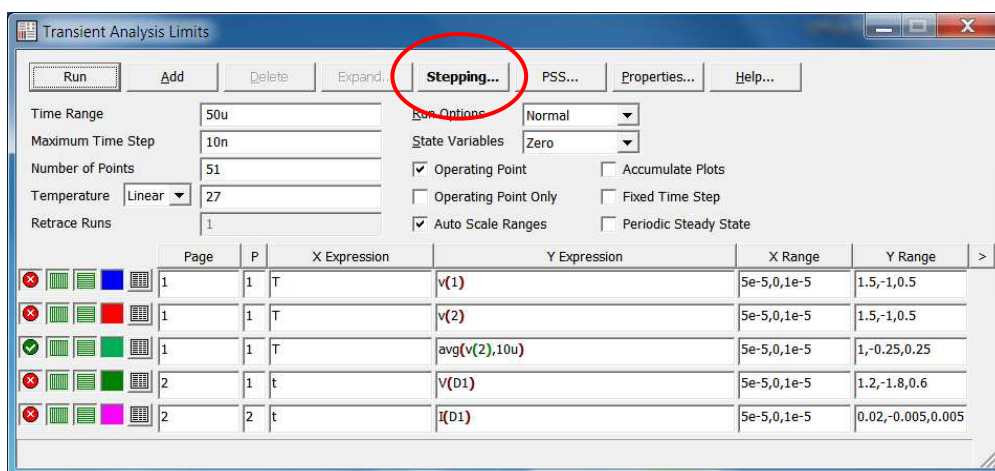
Постоянная составляющая  $U_$  напряжения на выходе АД определяется с использованием функция  $\text{avg}(V(2), 10u)^1$ . Второй аргумент этой функции определяет момент времени, с которого начинается усреднение. Для ослабления влияния переходных процессов в АД на результат измерения это время следует задать больше длительности переходных процессов. Время моделирования 50 мкс.



<sup>1</sup> От англ. average – среднее.

Для удобства измерения постоянной составляющей нужно увеличить правую часть графика (Scale Mode) и включить маркеры (Cursor Mode). Постоянная составляющая напряжения определяется в поле правого маркера. Для перемещения маркеров с одного графика на другой используется клавиша Tab.

Для построения детекторной характеристики и получения зависимости  $K_d(U)$  нужно проводить на модели измерение постоянной составляющей выходного напряжения при различной амплитуде сигнала. Для этого при задании параметров моделирования удобно использовать режим пошагового изменения параметров модели (Stepping), выбрав в качестве изменяемого параметра амплитуду сигнала источника V(1) (начальное значение 0.05, конечное значение 1, шаг 0.05). В окне задания параметров **Transient Analysis Limits** оставить активным только график процесса avg(V(2),10u).

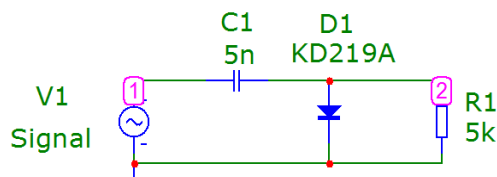


В результате строится семейство графиков при различной амплитуде сигнала. Устанавливая маркер и перемещая его по графикам клавишами ↑ и ↓ (при этом в заголовке графика указывается соответствующее значение амплитуды), определяем постоянную составляющую напряжения на выходе АД.

Далее, в соответствии с определением, нужно вручную (т.е. не средствами Micro-Cap) построить графики детекторной характеристики и зависимости  $K_d(U)$ , добавив точку  $U = 0$ .

## 1.2. Параллельный диодный АД

### Схема модели АД



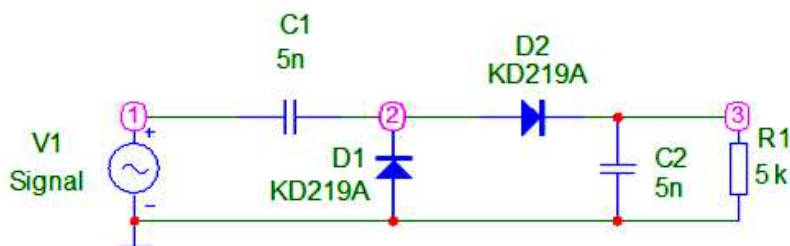
Параметры сигнала:

- частота  $f_0 = 465$  кГц;
- амплитуда 1 В.

Получить эпюры напряжения на входе и выходе АД, а также усреднённого напряжения на выходе (полезного эффекта детектирования). Определить уровень постоянной составляющей напряжения на выходе АД, сравнить его со значением в случае последовательного АД.

## 1.3. АД с удвоением напряжения

### Схема модели АД



Обратите внимание, что, по сравнению с предыдущей схемой, диод D1, входящий в состав параллельного АД, включён в обратной полярности для того, чтобы постоянная составляющая напряжения на его выходе была положительной.

Получить эпюры напряжения на входе схемы и на выходе всего детектора (на цепи R1C2). Обратит внимание на длительность переходного процесса и среднее значение напряжения на выходе АД. Сделать выводы.

Построить детекторную характеристику АД с удвоением напряжения, сравнить с аналогичной характеристикой последовательного АД, сделать выводы.

## 1.4. Демодуляция АМ сигнала в последовательном АД

Сигнал с гармонической амплитудной модуляцией определяется выражением

$$u(t) = U(t) \cos 2\pi f_0 t,$$

где  $U(t) = U_0 (1 + m \cos 2\pi F_m t)$  – огибающая сигнала,

$U_0$  – амплитуда несущей,

$f_0$  – частота несущей,

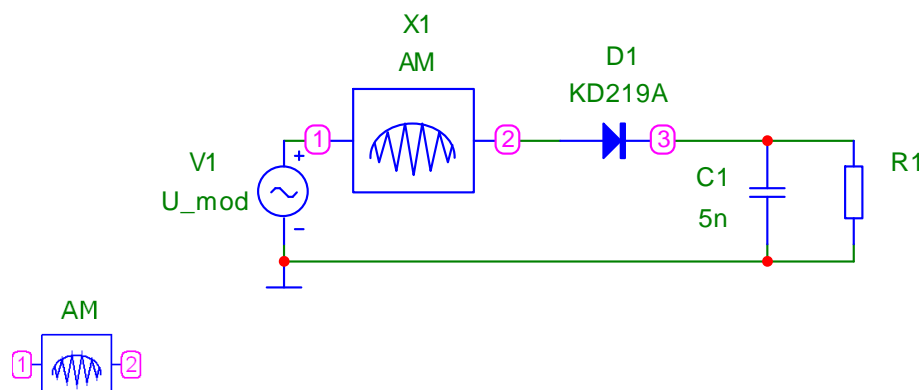
$F_m$  – частота модуляции,

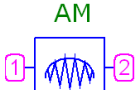
$m$  – коэффициент модуляции.

Составить модель источника АМ сигнала и последовательного АД при следующих значениях параметров:

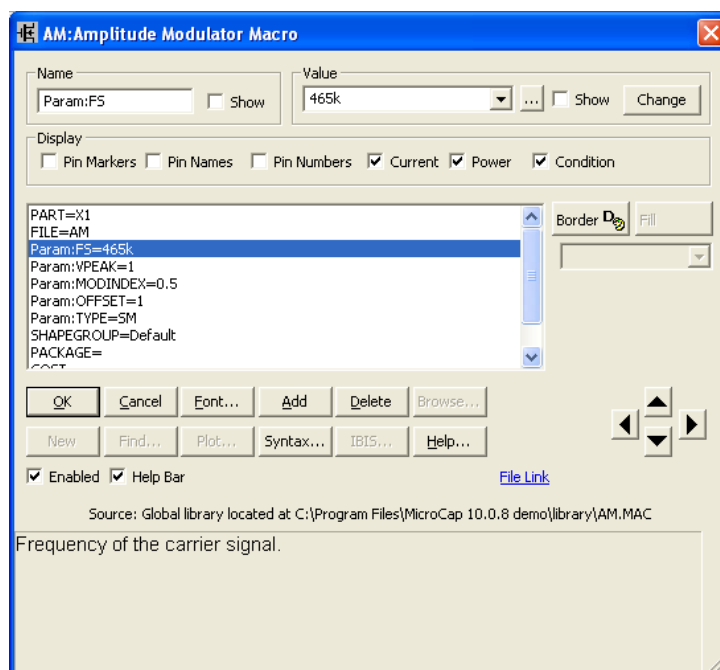
- амплитуда несущей  $U_0 = 1$  В;
- частота несущей  $f_0 = 465$  кГц;
- коэффициент модуляции  $m = 0,5$ ;
- частота модуляции  $F_M = 1$  кГц.

### Схема модели



Элемент , моделирующий генератор с управляемой амплитудой колебаний, выбирается в группе макросов (**Component** → **Analog Primitives** → **Macros**)<sup>2</sup>. Его параметры задаются следующим образом:

FS (частота сигнала) 465k  
 VPEAK (амплитуда сигнала) 1  
 MODINDEX (коэффициент модуляции) 0.5  
 OFFSET (смещение) 1  
 TYPE (синусоидальный сигнал) SM



<sup>2</sup> В версии Micro-Cap 10.0.8 этот элемент, так же как и модели источников других модулированных колебаний, помещён в отдельную группу: **Component** → **Analog Primitives** → **Modulators**.

Сопротивление резистора R1 выбрать в интервале 10...30 кОм. Амплитуду модулирующего колебания в модели источника напряжения U\_mod задать 1 В, частоту 2 кГц. Установив время моделирования 2...5 мс и максимальный шаг по времени 0,1 мкс, получить на одном графике эюры АМ сигнала и напряжения на выходе АД.

### Оценка влияния инерционности АД

Используя формулу для критического коэффициента модуляции

$$m_{кр} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F_m \tau)^2}}, \quad \tau = R1C1$$

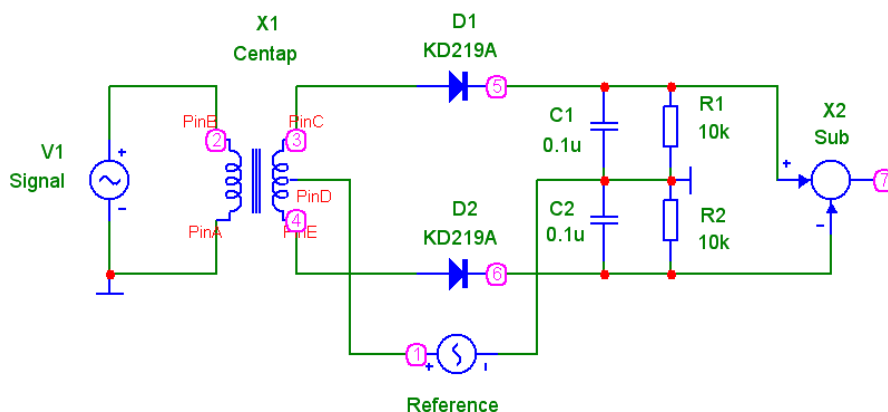
для заданных значений  $m_{кр} = 0,5$ ,  $C1 = 5$  нФ и выбранного сопротивления R1, рассчитать максимальную частоту модуляции  $F_{м\max}$ , при которой ещё отсутствуют заметные нелинейные искажения, обусловленные инерционностью АД.

Провести моделирование для трёх значений частоты модуляции:  $F_{м\max}/2$ ,  $F_{м\max}$ ,  $2F_{м\max}$ . (Для удобства наблюдения время моделирования можно уменьшить). Сделать выводы.

## 2. Балансный фазовый демодулятор (ФД) векторомерного типа

### Схема модели и исходные данные для моделирования

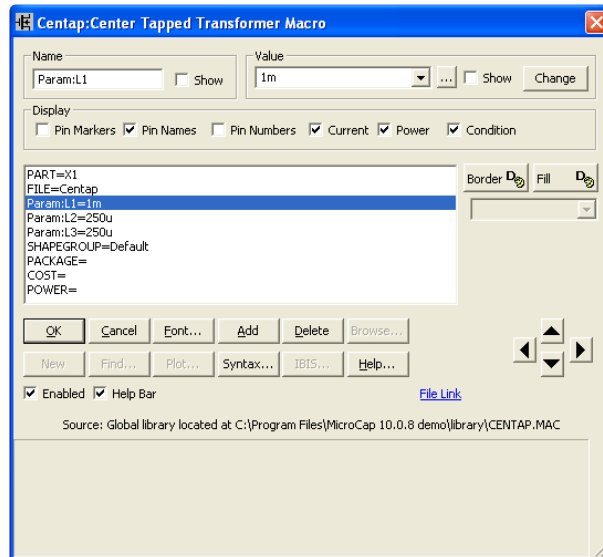
Для уменьшения влияния паразитной ёмкости диодов моделирование проводится на сравнительно низкой частоте 100 кГц.



Для моделирования трансформатора с отводом от средней точки вторичной обмотки используется элемент Centap, который выбирается в следующей последовательности:

**Component → Analog Primitives → Passive Components → Centap**

Коэффициент передачи трансформатора с первичной обмотки на каждую из половин вторичной обмотки определяется выражением  $k_{тр} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$ , где  $L_1$  – индуктивность первичной обмотки,  $L_2$  – индуктивность половины вторичной обмотки. Следовательно, для получения коэффициента трансформации  $\frac{1}{2}$  нужно в модели трансформатора задать  $L_2 = k_{тр}^2 L_1 = L_1/4$ . Зададим  $L_1 = 1$  мГн,  $L_2 = 250$  мкГн.



Формирование разности выходных напряжений амплитудных детекторов  $U_{ФД} = U_{АД1} - U_{АД2}$  производится с помощью элемента **Sub** (от слова **subtract** – вычитать), который находится в группе макросов.

Амплитуда опорного колебания (источник **Reference**) 1 В, амплитуда сигнала (источник **Signal**) 0,1 В; фаза опорного колебания 0, фаза сигнала – сначала 0, затем будет варьироваться.

## 2.1. Процессы в ФД

В режиме **Transient Analysis** получить на модели эпюры следующих напряжений:

*на 1-й странице графиков*

- опорного колебания **v(1)** и сигнала **v(2)** (на одном графике);

*на 2-й странице графиков*

- напряжения на входе 1-го (верхнего) АД **v(3)** и 2-го (нижнего) АД **v(4)** (на одном графике);

- напряжения на выходе 1-го АД **v(5)** и 2-го АД **v(6)** (на одном графике);

- напряжения на выходе ФД **v(7)**;

*на 3-й странице графиков*

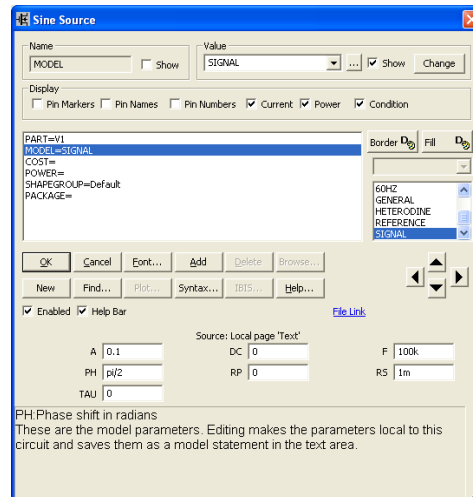
- усреднённого (начиная с момента времени 100 мкс, когда заканчиваются переходные процессы в АД) напряжения на выходе ФД **avg(v(7),100u)**.

Время моделирования 300 мкс, максимальный шаг по времени 10 нс.

**Внимание:** для правильного моделирования сигналов необходимо, чтобы **не был активизирован** режим расчёта в рабочей точке **Operating Point**. Для этого должна быть снята «галочка» в соответствующем поле окна задания параметров.

Объяснить различие амплитуд колебаний на входах амплитудных детекторов. Определить постоянную составляющую напряжения на выходе ФД.

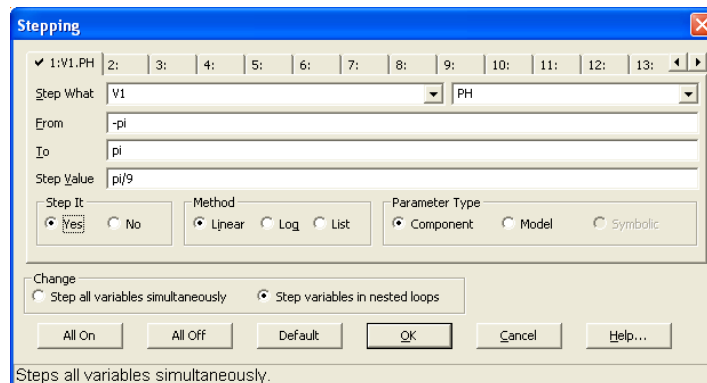
Повторить моделирование, задав фазу сигнала  $\pi/2$ :



Сравнить амплитуду напряжений на входах амплитудных детекторов. Сделать выводы из полученных результатов.

## 2.2. Характеристика ФД

Провести измерение постоянной составляющей напряжения на выходе ФД при изменении фазы сигнала. Для этого в режиме пошагового изменения параметров модели (Stepping) выбрать в качестве изменяемого параметра фазу сигнала V(1) (параметр PH в списке в правой верхней строке). Фаза задаётся в радианах: начальное значение  $-\pi$  (т.е.  $-180^\circ$ ), конечное значение  $\pi$  (т.е.  $180^\circ$ ), шаг  $\pi/9$  (т.е.  $20^\circ$ ).



Для измерений использовать только 3-ю страницу графиков (усреднённое напряжение на выходе ФД).



В результате получается семейство графиков при различной фазе сигнала. Устанавливая маркер и перемещая его по графикам клавишами  $\uparrow$  и  $\downarrow$  (при этом в заголовке графика указывается соответствующее значение фазы в радианах), определить постоянную составляющую напряжения на выходе ФД.

Вручную построить график детекторной характеристики, откладывая по горизонтальной оси фазу сигнала в градусах. Сделать выводы из полученных результатов.