

Анализ каскада с помощью схемотехнического моделирования. Расчет амплитудной, амплитудно-частотной и нагрузочной характеристик усилительного каскада.

Расчет основных параметров показан на примере каскада с биполярным транзистором (каскад ОЭ). Однако последовательность действий справедлива для любых каскадов, включая и каскад с ОК и каскады на полевых транзисторах.

Перед расчетом основных параметров каскада и исследования его характеристик с помощью программы моделирования дополним схему элементами: разделительными конденсаторами C_1 и C_2 , блокирующим конденсатором C_3 , конденсатором C_4 (имитация емкости нагрузки), внутренним сопротивлением генератора входного сигнала R_6 , сопротивлением нагрузки R_7 , генератором синусоидального сигнала V_2 (VSIN) и элементом глобальных параметров PARAMETERS. Схема преобразуется к виду, показанному на рис.1.

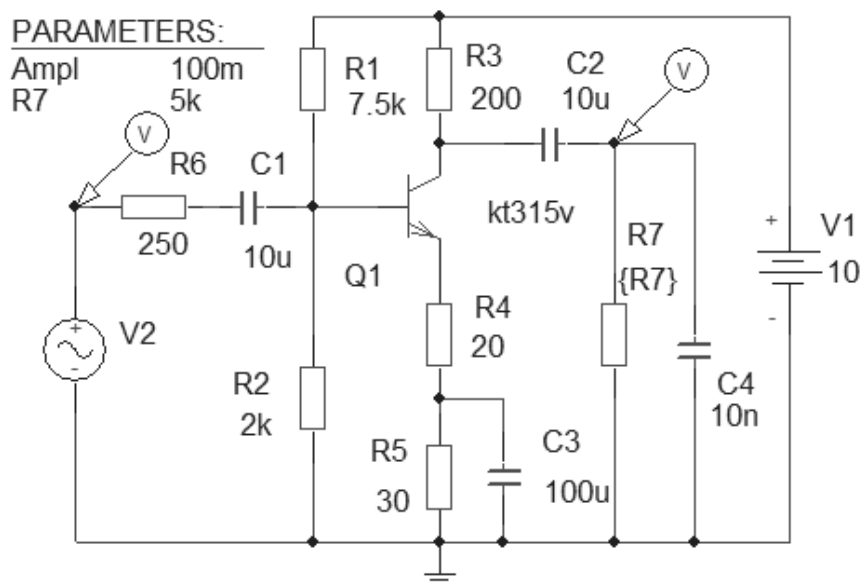


Рис.1. Схема для моделирования каскада ОЭ

Прежде, чем проводить моделирование, необходимо задать параметры вновь введенных элементов. Обратите внимание, что сопротивление резистора R_7 нужно ввести как глобальный параметр – $\{R_7\}$ (**Фигурные скобки обязательны**).

Пронумеровать входной (номер 1) и выходной (номер 2) узлы схемы, для этого выделить узел щелчком ЛКМ и, щелкнув на нем дважды, ввести в появившемся окне номер узла (например, 1).

Для источника входного сигнала V_2 устанавливаем параметры, как показано на рис. 2. Обратите внимание, что амплитуда входного сигнала также введена как глобальный параметр – $\{ampl\}$.

В окне элемента глобальных параметров PARAM задаем имена параметров и их величины (рис.3).

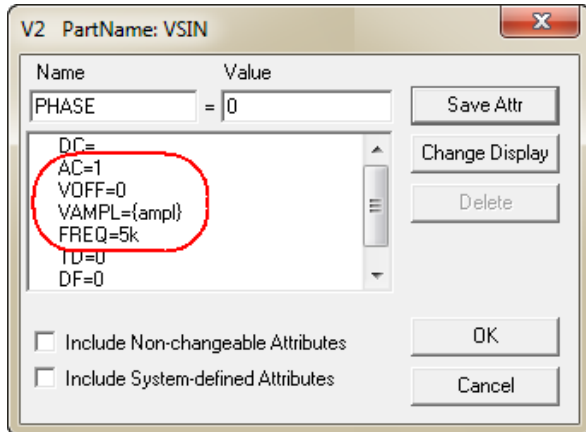


Рис.2. Установки для источника входного сигнала

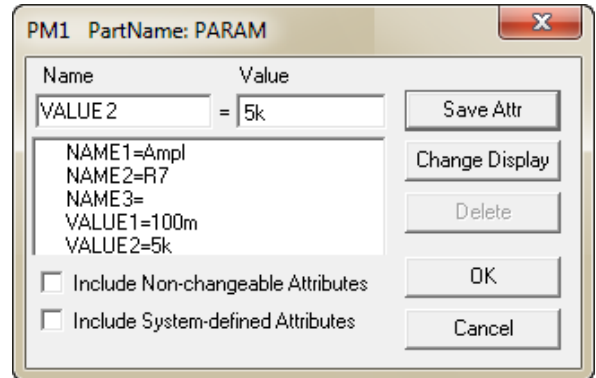



Рис.3. Установки глобальных параметров

1. Расчет рабочего режима.

Для определения рабочего режима усилителя на биполярном транзисторе с общим эмиттером собираем рабочую схему (рис.4) и устанавливаем режим **Bias Point Detail**. Можно схему по постоянному току отдельно не собирать, а воспользоваться схемой каскада рис. 1. В этом случае рекомендуется после расчета удалить все нулевые значения токов и напряжений. После запуска программы расчета (клавиша **F11**, или пиктограмма ) и нажатия на пиктограммы **V** и **I**, экран приобретает вид, показанный на рис.4.

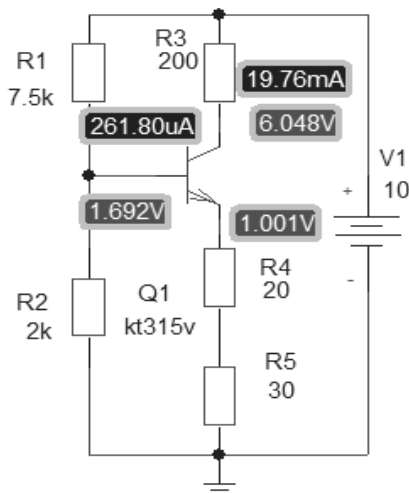


Рис.4. Схема усилителя для расчета рабочего режима



Результаты расчета каскада по постоянному току можно посмотреть также в выходном файле программы **Pspice**, воспользовавшись, например, командой **Analysis/Examine Output** программы **Schematics**:

**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME	Q_Q1
MODEL	kt315v
IB	2.62E-04 - ток базы
IC	1.98E-02 - ток коллектора
VBE	6.91E-01 - напряжение база-эмиттер
VBC	-4.36E+00 - напряжение база- коллектор
VCE	5.05E+00 - напряжение коллектор-эмиттер
RPI	1.04E+02 - входное сопротивление транзистора
RO	3.12E+03 - выходное сопротивление транзистора
BETAAC	6.83E+01 - коэффициент h_{21s}

2. Расчет амплитудно-частотной характеристики усилителя.

Для получения частотной характеристики усилителя и определения коэффициента усиления усилителя $K_e = U_n/E_r$ и граничных частот f_n и f_v , необходимо сделать следующее.

- Установить (*Analysis – Setup* или пиктограмма ) режим анализа по переменному току (*AC Sweep*) с параметрами: *Decade*, *Pts/Decade* = 101, *Start Freq* = 10, *End Freq* = 1Meg.
- К выходу схемы подключить специальный маркер для измерения коэффициента передачи в децибелах (*Markers – Mark Advanced – Vdb*). В этом случае выходной сигнал равен коэффициенту усиления (т.к. $E_r=1V$), а коэффициент усиления измеряется в децибелах: $LK_e(дБ) = 20lg(U_n/E_r)$.
- Запустить схему на расчет (клавиша **F11** или пиктограмма ) и получить амплитудно-частотную характеристику усилителя (рис. 5).

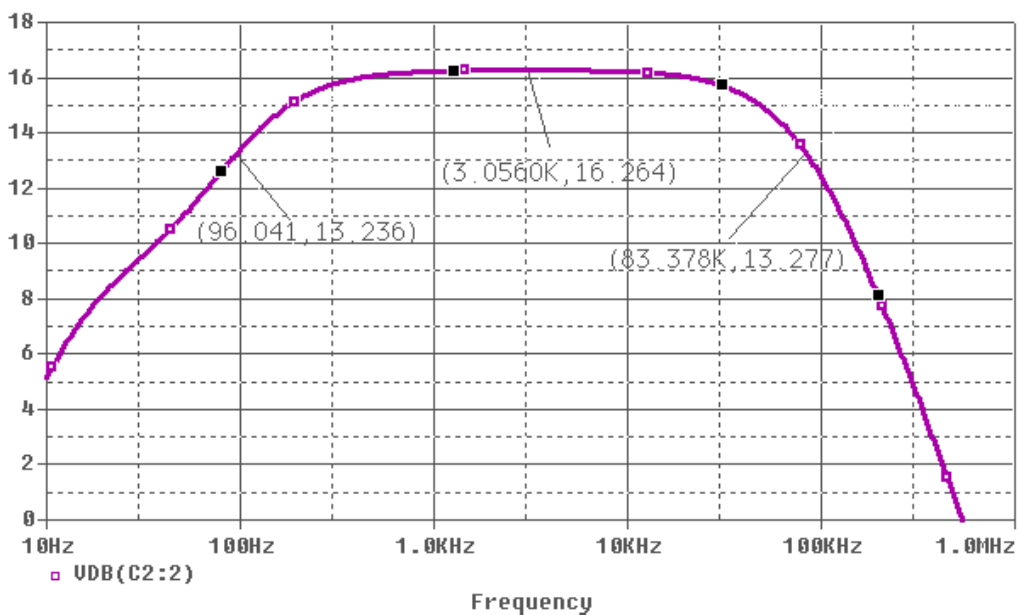






Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика усилителя.



- С помощью электронных курсоров определить коэффициент усиления LK_e в децибелах в области средних частот (надо определить также значение K_e в **линейном масштабе**). На уровне -3дБ от значения LK_e на средней частоте определить граничные частоты (f_H и f_B). Для получения всех необходимых значений на одном графике следует воспользоваться пиктограммой **Mark Label** , позволяющей ввести на экран координаты точки, помеченной курсором (рис. 5).



3. Определение входного сопротивления каскада $R_{вх.}$.

Для определения входного сопротивления каскада необходимо построить (**Trace** – **Add** или пиктограмма ) график зависимости входного сопротивления от частоты (остальные графики следует удалить). Это можно сделать, записав в командной строке окна **Trace Expression** выражение: $V(1)/I(V2)$, где $V(1)$ – напряжение в точке 1 (рис.1), $I(V2)$ – ток источника $V2$. Определить входное сопротивление можно в области средних частот с помощью электронного курсора  и пиктограммы **Mark Label** .



4. Расчет нагрузочной характеристики усилителя.

Нагрузочная характеристика определяет зависимость коэффициента усиления усилителя от сопротивления нагрузки $K_u(R_H)$. По этой характеристике можно определить выходное сопротивление усилителя. Для выполнения этого пункта удобно воспользоваться глобальным параметром RH и автоматизировать процесс расчета. Для этого сделать следующее.

- Установить (**Analysis – Setup** или пиктограмма ) режим анализа по переменному току **AC Sweep** с параметрами: *Decade*, *Pts/Decade* = 101, *Start Freq* = 10, *End Freq* = 1Meg. Установить режим **PARAMETRIC** со следующими параметрами: *Global Parameter*; *Decade*, *Pts/Decade* = 10; *Name* = RH , задать *Start Value*=1; для каскада ОЭ: *End Value*=10k, для каскада ОК: *End Value*=3k (эта величина должна быть больше заданного в ТЗ сопротивления R_H).
- Запустить схему на расчет (клавиша **F11** или пиктограмма ) и получить семейство амплитудно-частотных характеристик усилителя.

Для вывода графика нагрузочной характеристики в меню **Plot** выбрать **X axis setting**, в открывшемся окне установить режим **Performance Analysis** (пиктограмма ) , после этого возникнет заготовка для второго графика. Затем в меню **Trace** выбрать **Add** (или пиктограмма ) , в открывшемся окне убрать

галочки рядом с **Current** и **Alias Names**, выбрать в правом столбце функцию **YatX()**, а в левом – переменную **V(2)**. При этом в нижней части окна в строке **Trace Expression** появится выражение для построения графика: **YatX(V(2),)**. После запятой надо добавить численное значение частоты f_{cp} , найденное при снятии семейства АЧХ (рис.6,а). Когда окно будет закрыто, появится график нагрузочной характеристики (рис.6,б). После этого рекомендуется убрать нижний (исходный) график, щелкнув на нем ЛКМ и затем выбрав в меню **Plot – Delete Plot**.

Сопротивление $R_{вых}$ можно определить по уровню $K_{u\text{xx}}/2$. Для этого с помощью курсоров надо определить и с помощью пиктограммы **Mark Label**  отметить уровень $K_{u\text{xx}}$, затем, передвигая курсор вдоль характеристики, надо установить его на значениях $K_{u\text{xx}}/2$, сопротивление $R_{вых}$ будет получено в левом столбце окошка **Probe Cursor**. Эту точку также надо отметить с помощью пиктограммы **Mark Label** . Для более точного определения выходного сопротивления каскада ОК рекомендуется передвигать курсор, оперируя курсорными клавишами клавиатуры. Выходное сопротивление можно также найти из

соотношения
$$R_{вых} = \frac{R_{n1}R_{n2}(K_{u2} - K_{u1})}{K_{u1}R_{n2} - K_{u2}R_{n1}}.$$

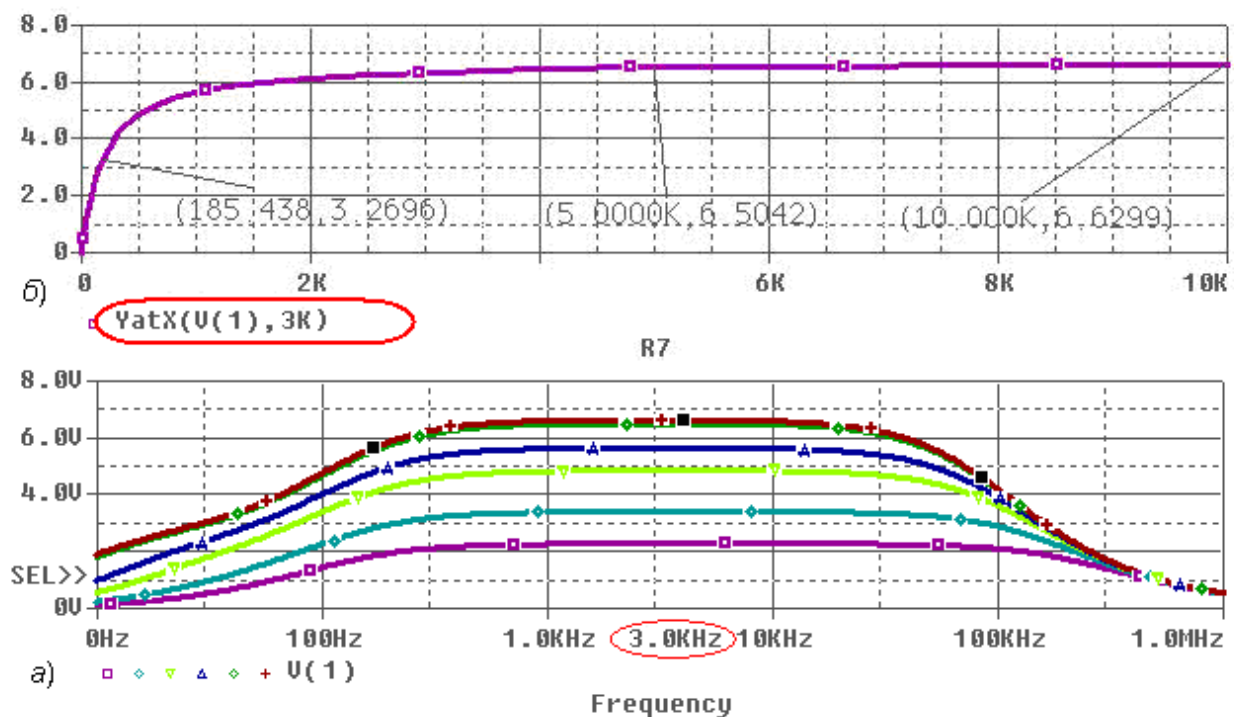




Рис. 6. Семейство АЧХ (а) и нагрузочная характеристика усилителя (б).

5. Расчет амплитудной характеристики усилителя.

Амплитудная характеристика (АХ) определяет зависимость амплитуды выходного сигнала усилителя от амплитуды входного: $U_{\text{вых}}(E_{\text{г}})$. Для построения амплитудной характеристики необходимо снять семейство выходных сигналов, наблюдая за изменением амплитуды и формы выходного сигнала. При этом важно, чтобы были достигнуты участки нелинейных искажений формы выходного сигнала (она должна отличаться от синусоидальной). Для этого надо увеличивать амплитуду входного сигнала до 1...2 В (для каскада ОЭ) или до 5...10 В (для каскада ОК).

Для выполнения этого пункта удобно воспользоваться глобальным параметром *AMPL* и автоматизировать процесс расчета. Для этого:

- отключить (*Analysis – Setup* или пиктограмма ) режим *AC Sweep*;
- установить режим расчета схемы во временной области (*Analysis – Setup* или пиктограмма ) *Transient...* с параметрами: *Print Step=1ns*; *Final Time=1ms*, *Step Ceiling=1us*. Установить также режим *PARAMETRIC* со следующими параметрами: *Global Parameter*; *Linear*; *Name = Ampl*; для каскада ОЭ – *Start Value = -2V*; *End Value = 2V*; *Increment = 10mV* (рис. 7); для каскада ОК – *Start Value = -5V*; *End Value = 5V*; *Increment = 50mV*;

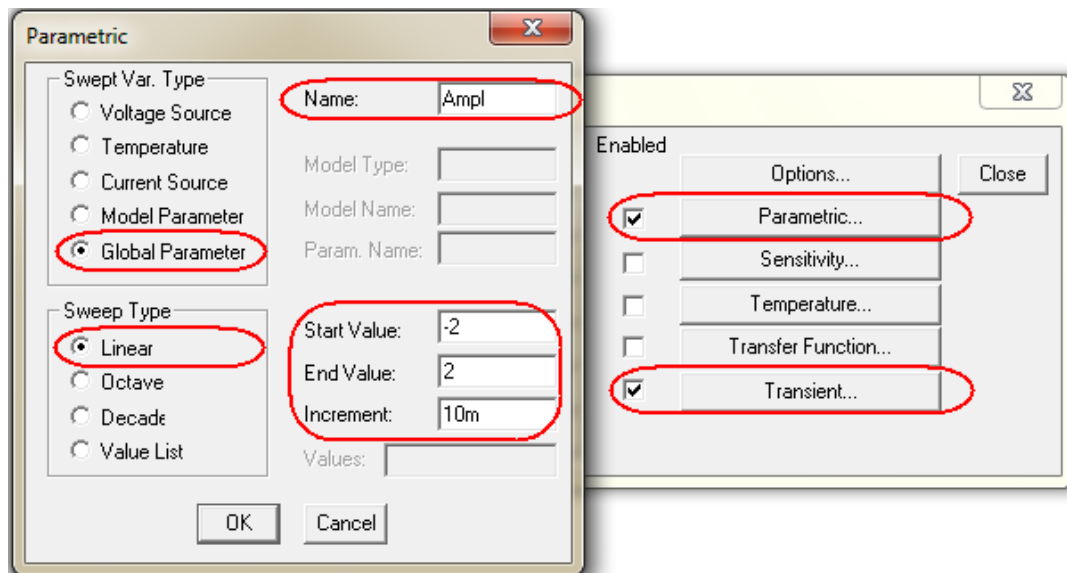






Рис. 7. Установки для параметрического анализа.

- установить на выход схемы (R_n) маркер напряжения ()
- произвести расчет схемы (клавиша **F11** или пиктограмма ) и получить набор графиков напряжения выходного сигнала. Если участок с нелинейными искажениями выходного сигнала не достигнут, необходимо увеличивать значения *Start Value*, *End Value* и *Increment* до тех пор, пока

искажения не появятся. При запросе системы о выборе графика для вывода на экран нажать *OK*.

Затем, находясь в интерфейсном окне программы *Probe*, по команде *Plot - X Axis Settings... - Performance Analysis* (или пиктограмма ) на экране *Probe* получаем заготовку графика, у которого по оси *X* откладывается глобальный параметр *Ampl* (см. рис. 8,б) с предельными значениями, указанными в режиме *PARAMETRIC* (рис. 7). В том же интерфейсном окне программы *Probe*, по команде *Trace - Add...* (или с помощью пиктограммы ) входим в окно целевых функций. В открывшемся окне следует убрать галочки рядом с *Current* и *Alias Names*, затем выбрать в правом столбце функцию *YatX(1,X_value)*, которая определяет значение переменной в заданной точке, а в левом – переменную *V(1)*. В момент, когда выходное напряжение достигает предельных значений (рис. 8,а), определяем заданную точку – 50 мкс (50u), вводим это значение вместо *X_value*. При этом в нижней части окна в строке *Trace Expression* появится выражение для построения графика: *YatX(V(1),50u)*.

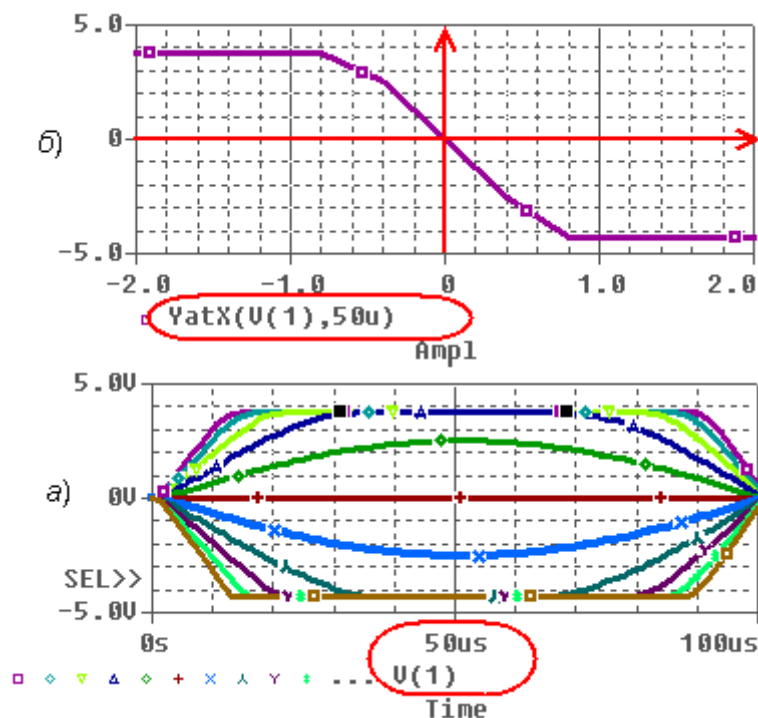






Рис. 8. Осциллограммы выходных напряжений (а) и амплитудная характеристика (б).

Когда окно будет закрыто, появится график амплитудной характеристики (рис.8,б). Если график получится слишком мелким, можно изменить диапазон изменения напряжения, для чего щелкнуть дважды ЛКМ слева от оси графика и, поставив галочку в графе *User Defined*, установить нужные пределы изменения выходного напряжения. После этого рекомендуется убрать нижний (исходный) график, щелкнув на нем ЛКМ и затем выбрав в меню *Plot - Delete Plot*. Далее с

помощью курсоров надо определить и с помощью пиктограммы **Mark Label**  отметить на каждом из графиков максимальную амплитуду неискаженного выходного напряжения ($U_{\text{вых макс}}$) и динамический диапазон входного сигнала ($U_{\text{вх макс}}$). **Определить динамический диапазон входного сигнала $U_{\text{вх макс}}$,** нужно, выбрав минимальное из полученных справа и слева значений. По наклону линейного участка характеристики с помощью курсоров находим коэффициент усиления $K_e = U_n/E_{\Gamma}$. Затем следует сравнить коэффициент усиления K_e с техническим заданием и расчетом.

6. Определение коэффициента нелинейных искажений.

Для определения коэффициента нелинейных искажений надо подать на его вход синусоидальный сигнал с частотой $f = 1\text{кГц}$ и амплитудой сигнала генератора ($E_{\Gamma \text{ макс}}$), соответствующей максимальной амплитудой неискаженного выходного сигнала $U_{\text{н макс}}$. Для этого необходимо сделать следующее.

- Проверить, заданы ли нужная частота у источника VSIN и амплитуда в глобальном параметре PARAM: {Ampl} = $E_{\Gamma \text{ макс}}$.
- Установить режим расчета схемы во временной области (**Analysis – Setup – Transient...**) с параметрами: *Print Step=10ns; Final Time=5ms, Step Ceiling=1us*, а также параметры Фурье-анализа: поставить галочку в графе *Enable Fourier, Central Frequency=1кГц, Number of Harmonics=5, Output Vars=V(2)*. Установить режим анализа во временной области можно также с помощью пиктограммы .
- Установить маркеры () для вывода осциллограмм напряжения на входе и выходе схемы (см. рис. 1);
- Запустить программу расчета (клавиша **F11**, или пиктограмма ).

В выплывшем окне программы **Probe** появятся осциллограммы входного и выходного синусоидальных сигналов.

В окне программы **Schematics** найти результаты гармонического анализа: **Analysis – Examine Output** (в конце распечатки).

Рассчитать коэффициент нелинейных искажений как отношение действующего значения высших гармоник (до 5 гармоник) к амплитуде основной (первой) гармоники.