

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 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.

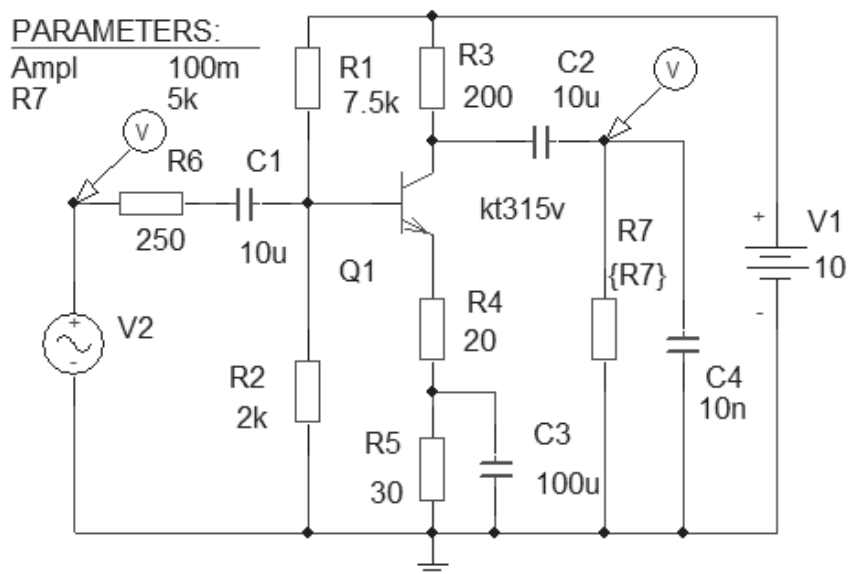


Рис.1. Схема для моделирования каскада ОЭ

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).

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).

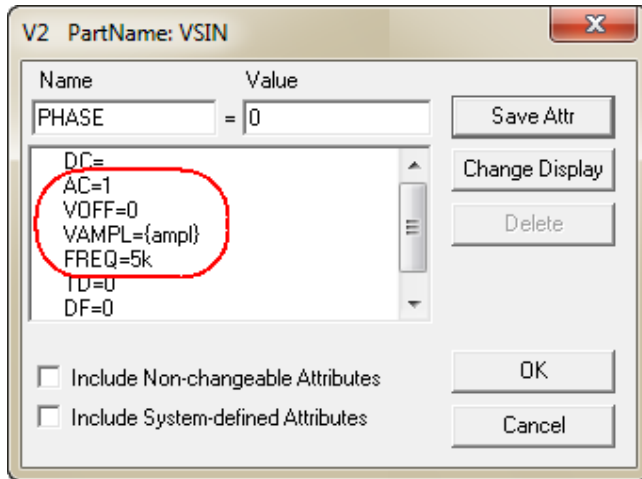


Рис.2. Установки для источника входного сигнала

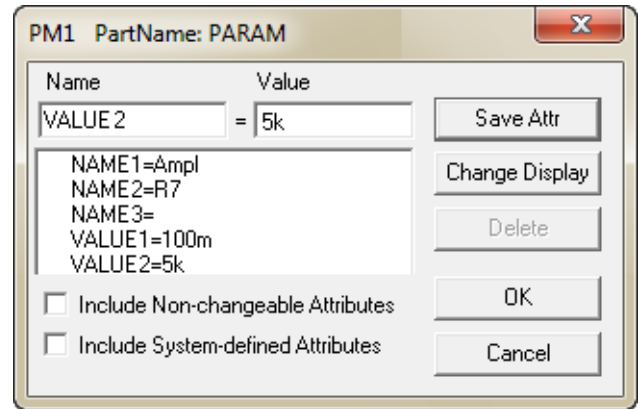


Рис.3. Установки глобальных параметров

1. Проверка работоспособности каскада.

Прежде, чем исследовать основные характеристики и определять параметры каскада, надо проверить работоспособность усилителя, для чего подать на его вход синусоидальный сигнал с частотой $f = 1\text{кГц}$ и амплитудой $U_m = 100\text{мВ}$. Для этого необходимо сделать следующее.

- Проверить, заданы ли нужная частота у источника VSIN и амплитуда в глобальном параметре PARAM: {Ampl} = 100мВ.
- Установить режим расчета схемы во временной области (*Analysis – Setup – Transient...*) с параметрами: *Print Step=10ns*; *Final Time=5ms*, *Step Ceiling=1us*. 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 (рис. 4). Обратите внимание на то, что форма выходного сигнала не должна быть искажена. Далее с помощью электронных курсоров надо определить размах выходного сигнала. Именно размах выходного сигнала рекомендуется определять из-за наличия переходного процесса в начале графика. Курсоры доступны после нажатия на пиктограмму , один из курсоров обычно зафиксирован на осях графика, и им можно управлять правой кнопкой мыши (ПКМ), второй обычно размещается в произвольном месте графика, и он управляется левой кнопкой мыши (ЛКМ). Размах можно найти с помощью пиктограмм определения максимального (*Cursor Max*) и минимального (*Cursor Min*) значения. Учитывая, что

размах входного сигнала равен 200 мВ, можно рассчитать коэффициент усиления усилителя как отношение размаха амплитуды выходного сигнала к размаху входного.

Для более точных измерений любой элемент графика можно увеличить с помощью окна, доступного после команд **View – Area**. Размеры окна регулируются при нажатой левой кнопки мыши. Для возвращения в программу **Schematics** нужно закрыть окна программ **Probe** и **PSPice**.

Далее следует сравнить заданный коэффициент усиления K_e с расчетом. Существенное отличие говорит о том, что либо расчет элементов схемы проведен неправильно, либо закралась ошибка при моделировании схемы.

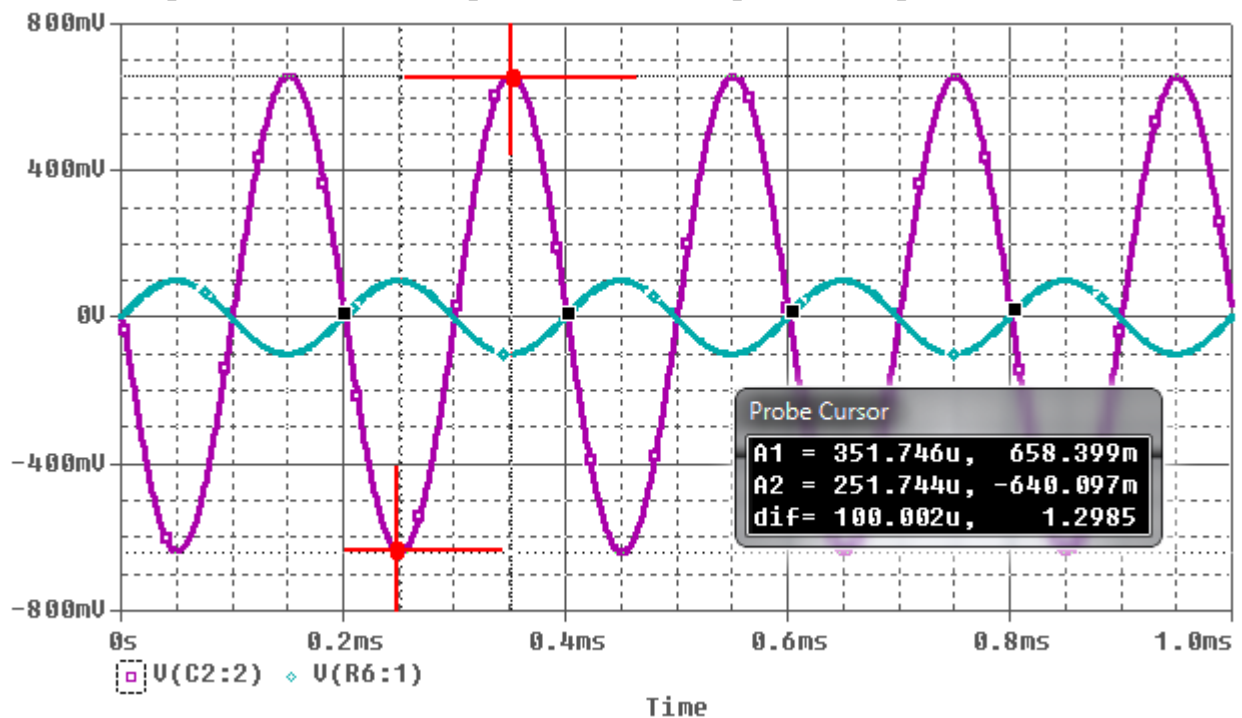






Рис. 4. Осциллограммы входного и выходного напряжения.

2. Расчет амплитудно-частотной характеристики усилителя.

Для получения частотной характеристики усилителя и определения коэффициента усиления усилителя $K_e = U_H/E_T$ и граничных частот f_H и f_B , необходимо сделать следующее.

- Отключить (**Analysis – Setup** или пиктограмма ) режим **Transient**. Установить режим анализа по переменному току (**AC Sweep**) с параметрами: *Decade*, *Pts/Decade* = 101, *Start Freq* = 10, *End Freq* = 1Meg.
- Отключить маркер входного сигнала () , так как $E_T=1В$ для всех частот, а 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. $E_T=1В$), а коэффициент усиления измеряется в децибелах: $LK_e(дБ) = 20lg(U_H/E_T)$.

- Запустить схему на расчет (клавиша **F11** или пиктограмма ) и получить амплитудно-частотную характеристику усилителя (рис. 5).
- 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).

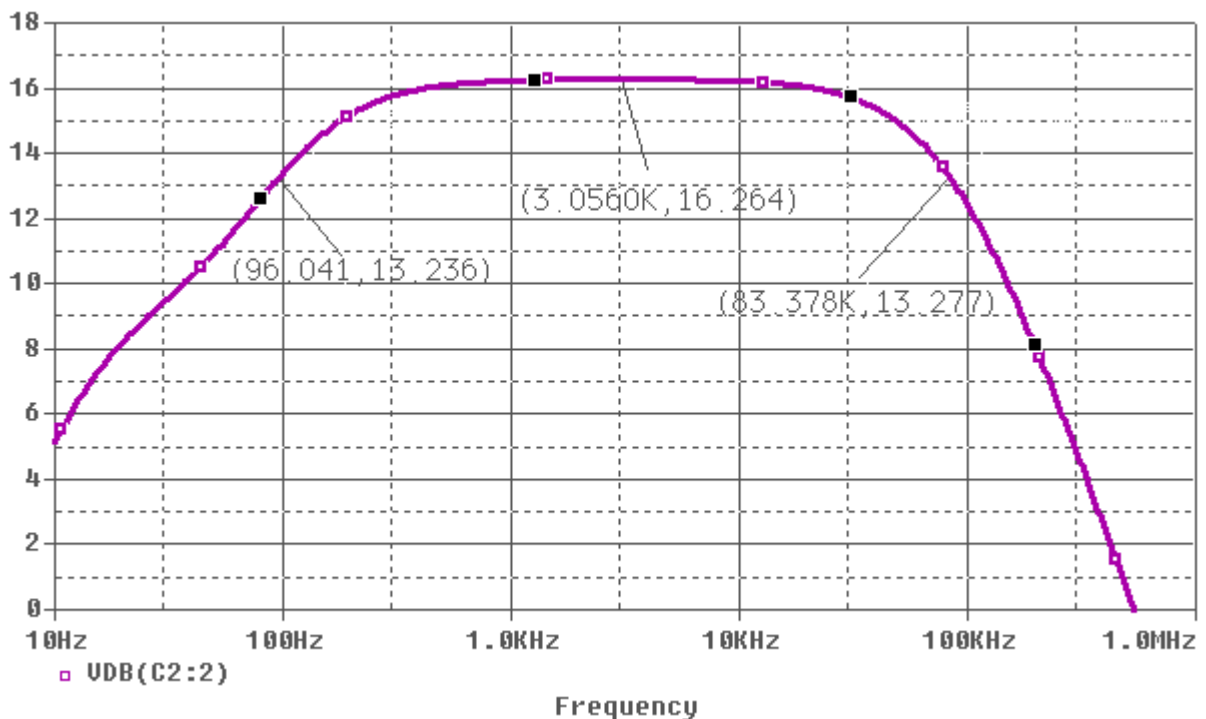





Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика усилителя.

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: $V(C1)/I(V2)$. Определить входное сопротивление можно в области средних частот с помощью электронного курсора  и пиктограммы **Mark Label** .

4. Расчет амплитудной характеристики усилителя.

Амплитудная характеристика (АХ) определяет зависимость амплитуды выходного сигнала усилителя амплитуды входного: $U_{вых} (E_T)$. 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:

- пронумеровать выходной узел: выделить его щелчком ЛКМ и, щелкнув на нем дважды, ввести в появившемся окне номер узла (например, 1);
- 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. 6); для каскада ОК – *Start Value = -5V*; *End Value = 5V*; *Increment = 50mV*;

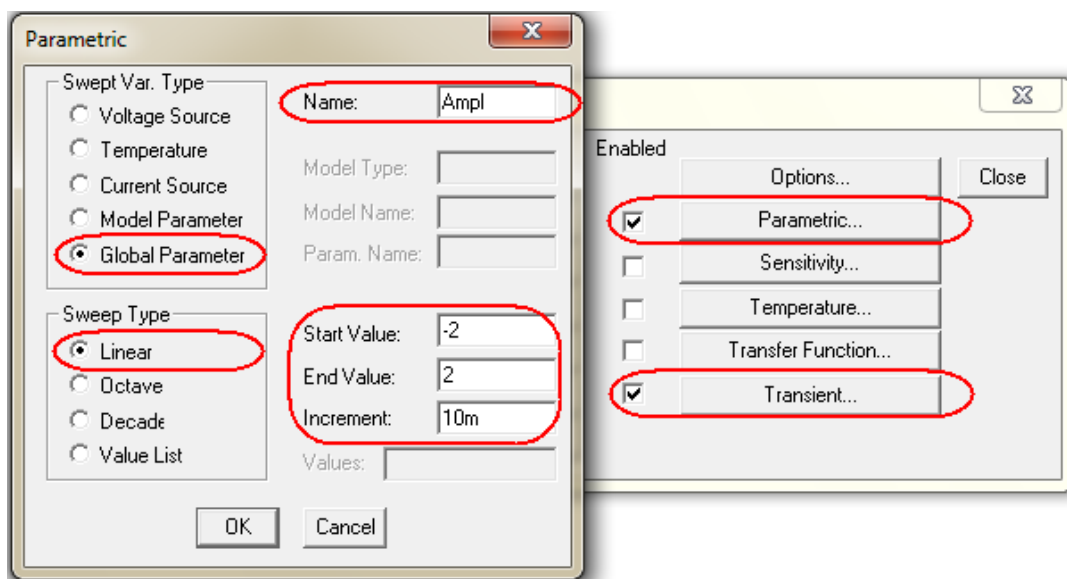






Рис. 6. Установки для параметрического анализа.

- отключить специальный маркер для измерения коэффициента передачи в децибелах (выделить и нажать **Del**), установить на выход схемы (R_n) маркер для вывода осциллограмм 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. 7,б) с предельными значениями, указанными в режиме **PARAMETRIC** (рис. 6). 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. 7,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)**.

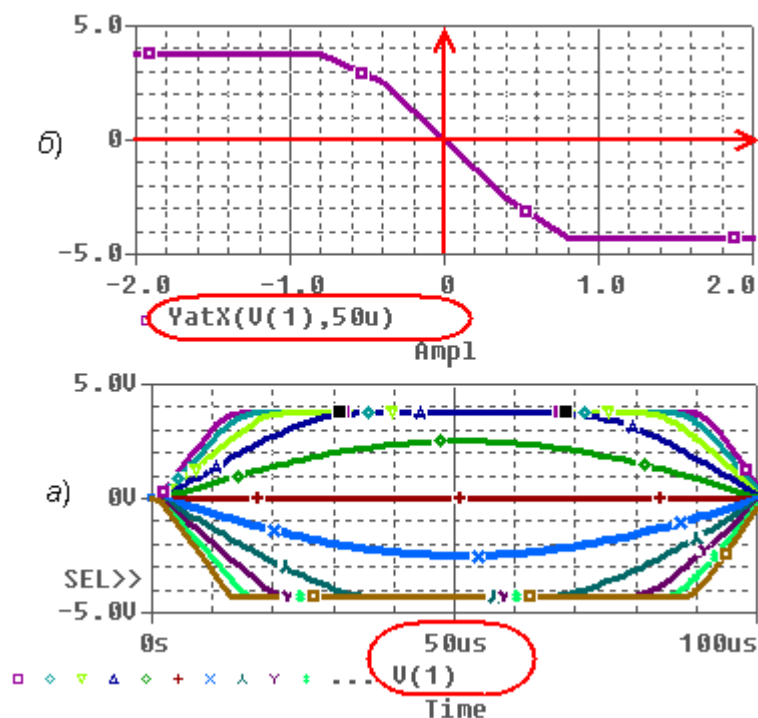






Рис. 7. Осциллограммы выходных напряжений (а) и амплитудная характеристика (б).



Когда окно будет закрыто, появится график амплитудной характеристики (рис.7,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 $K_e = U_n/E_n$. Затем следует сравнить коэффициент усиления K_e с техническим заданием и расчетом.



5. Расчет нагрузочной характеристики усилителя.

Нагрузочная характеристика определяет зависимость коэффициента усиления усилителя от сопротивления нагрузки $K_u(R_n)$. 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.

- Отключить (**Analysis – Setup** или пиктограмма ) режим **Transient**.
- 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_n).
- 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(1)**. При этом в нижней части окна в строке **Trace Expression** появится выражение для построения графика: **YatX(V(1),)**. После запятой надо добавить численное значение частоты f_{cp} , найденное при снятии семейства АЧХ (рис.8,а). Когда окно будет закрыто, появится график нагрузочной характеристики (рис.8,б). После этого рекомендуется убрать

нижний (исходный) график, щелкнув на нем ЛКМ и затем выбрав в меню **Plot – Delete Plot**.

Сопротивление $R_{\text{вых}}$ 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 значении $K_{u\text{xx}}/2$, сопротивление $R_{\text{вых}}$ 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
$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{H1}} R_{\text{H2}} (K_{\text{u2}} - K_{\text{u1}})}{K_{\text{u1}} R_{\text{H2}} - K_{\text{u2}} R_{\text{H1}}}.$$

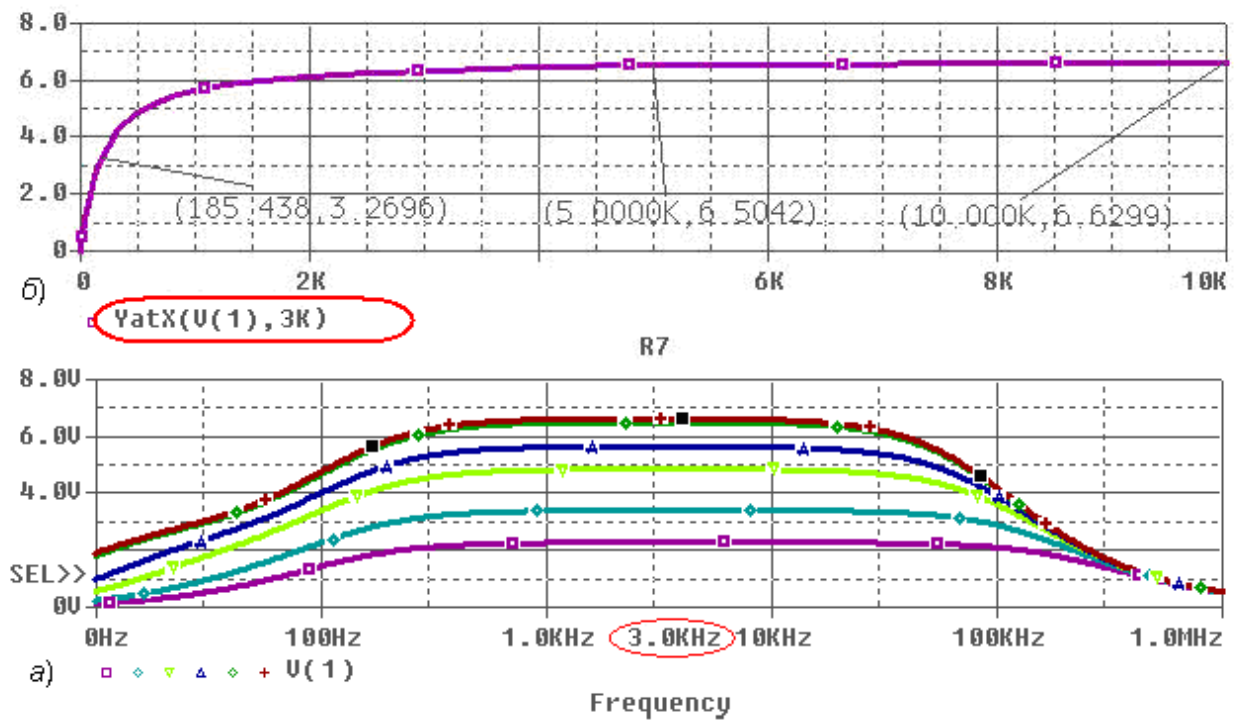





Рис. 8. Семейство АЧХ (а) и нагрузочная характеристика усилителя (б).

6. Расчет параметров каскада (для тех, кому интересно).

Для расчета основных параметров каскада надо:

- добавить источник постоянного напряжения VDC (**V2**) с напряжением, равным потенциалу базы (чтобы не изменился режим работы схемы), на базу транзистора;
- маркировать вывод коллектора (для каскада ОЭ) или эмиттера (для каскада ОК) – установить метку **Out**;
- отключить (*Analysis – Setup* или пиктограмма ) режимы *AC Sweep* и *PARAMETRIC*;
- установить расчет малосигнальных параметров на постоянном токе (*Analysis – Setup* или пиктограмма ) *Transfer Function* с параметрами: *Output Variable* – V(Out), *Input Source* – V2;
- запустить схему на расчет (клавиша **F11** или пиктограмма ).

Результаты анализа можно посмотреть в выходном файле программы *Pspice* с помощью команды *Analysis/Examine Output* программы *Schematics* после заголовка «SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS». Здесь надо учитывать, что программа рассчитывает коэффициент усиления и входное сопротивление (это важно для каскада ОК) в режиме холостого хода.