

Методические указания для выполнения моделирования

В файле содержится инструкция для выполнения п. 14 «Содержания курсовой работы».

1. Расчет рабочего режима

1.1. Собрать схему для расчета рабочего режима усилителя на биполярном транзисторе (на рис. 1 приведена схема по постоянному току для каскада ОЭ на $n-p-n$ транзисторе).

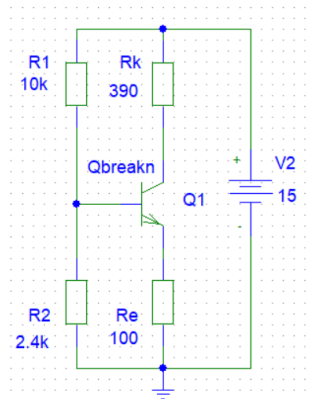





Рис. 1. Схема по постоянному току для каскада с ОЭ

1.2. Рассчитать режим схемы по постоянному току.

- В схеме (рис.1) установить параметры резисторов и источника питания V2 в соответствии с расчетом.
- Сохранить схему под уникальным именем (только латиница и цифры).
- Проверить, присоединена ли нужная (**RUS_Q.LIB**) библиотека транзисторов (**Analysis – Library and Include Files...**).
- Установить (**Analysis/Setup** или пиктограмма ) режим расчета схемы по постоянному току (**Bias Point Detail**).
- Запустить программу расчета (клавиша F11 или пиктограмма )
- Определить потенциалы на базе, коллекторе и эмиттере транзистора, нажав на пиктограмму  (см. рис. 2). Рассчитать напряжения $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$. Для $p-n-p$ транзистора значения напряжений должны получиться отрицательными.

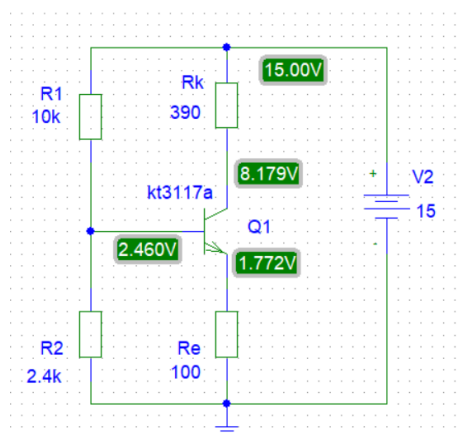


Рис. 2. Расчет потенциалов для каскада с ОЭ

- Для определения токов нажать на пиктограмму **I**. Обратите внимание, что токи коллектора и эмиттера выведены дважды (см. рис. 3 слева): как токи транзистора (причем в программе считается, что все токи транзистора направлены внутрь прибора), и как токи ветвей. Вам нужны именно вторые (положительные) значения. Лишние значения токов лучше выделить и убрать с помощью клавиши «Del» (см. рис. 3 справа).

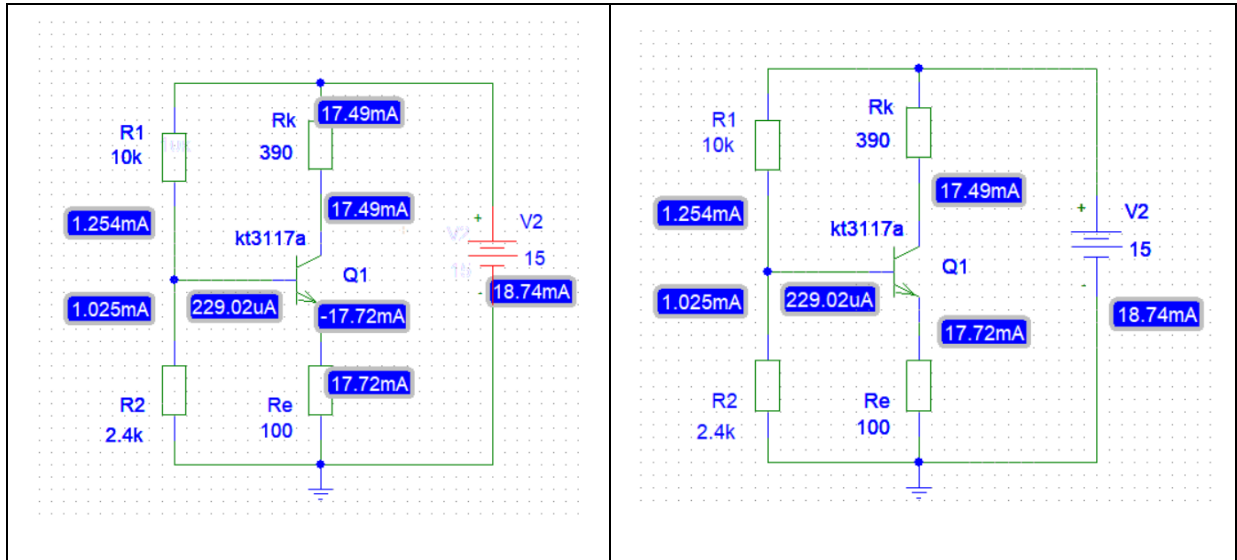


Рис. 3. Расчет токов для каскада с ОЭ

1.3. Сравнить результаты с расчетами в пп. 4 и 7. Существенное отличие говорит о том, что или расчет проведен неправильно, или возникли ошибки при моделировании схемы.

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

**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME	Q_Q1
MODEL	kt3117a
IB	2.29E-04 - ток базы
IC	1.745E-02 - ток коллектора
VBE	6.88E-01 - напряжение база-эмиттер
VBC	-5.72E+00 - напряжение база- коллектор
VCE	6.41E+00 - напряжение коллектор-эмиттер
RPI	1.04E+02 - входное сопротивление транзистора ($h_{11\Omega}$)
RO	3.12E+03 - выходное сопротивление транзистора
BETAAC	6.83E+01 - коэффициент передачи тока ($h_{21\Omega}$)

2. Расчет амплитудно-частотной и нагрузочной и амплитудной характеристик усилительного каскада

Расчет показан на примере каскада ОЭ на биполярном транзисторе. 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.

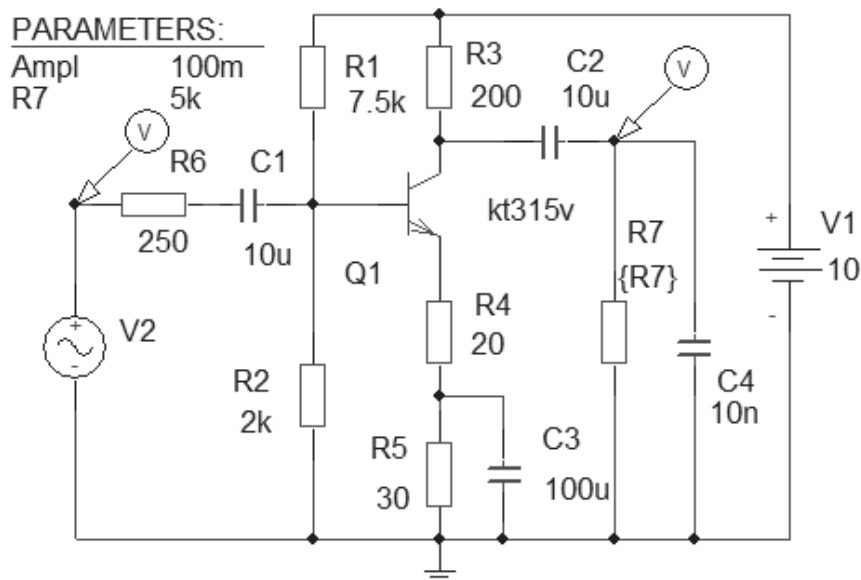


Рис.1. Схема для моделирования каскада ОЭ

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 (частоту, возможно, в некоторых пп. придется менять). 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). В качестве R_7 вводим значение сопротивления нагрузки, заданное в ТЗ.

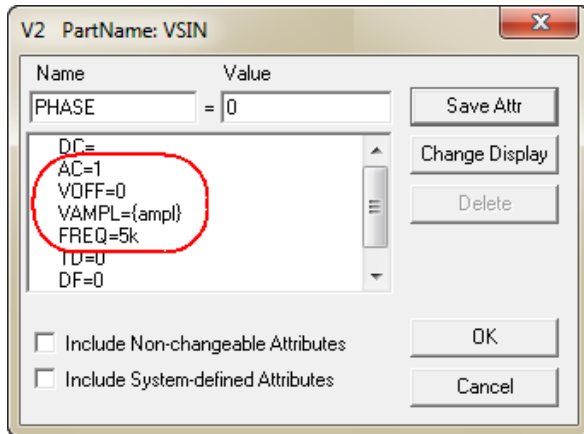


Рис.2. Установки для источника входного сигнала

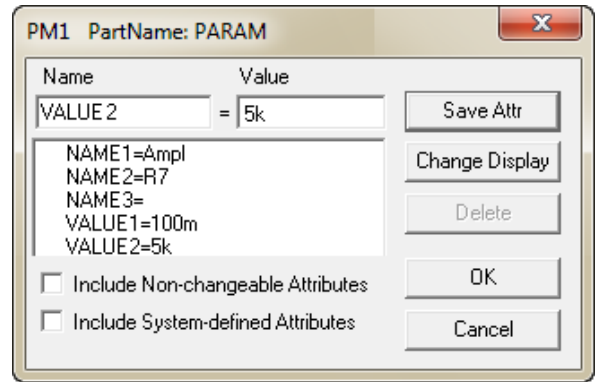







Рис.3. Установки глобальных параметров

2.1. Расчет амплитудно-частотной характеристики усилителя

Для получения частотной характеристики усилителя и определения коэффициента усиления усилителя $K_{e0} = U_{\text{вых}}/E_{\Gamma}$ и граничных частот $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$, 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. $E_{\Gamma}=1\text{В}$), а коэффициент усиления измеряется в децибелах: $LK_e(\text{дБ}) = 20\lg(U_{\text{вых}}/E_{\Gamma})$.
- Запустить схему на расчет (клавиша **F11** или пиктограмма ) и получить амплитудно-частотную характеристику усилителя (рис. 4).

Полученную характеристику надо, изменив масштаб, обрезать так, чтобы было представлена часть графика, **размахом не более 10-15 дБ**. Изменить масштаб по оси X или Y, можно дважды щелкнув ЛКМ внизу/слева от оси, и, поставив галочку в графе *User Defined*, установить нужные пределы изменения соответствующей величины. Затем с помощью электронных курсоров можно определить коэффициент усиления LK_{e0} в децибелах в области средних частот (надо также найти значение K_{e0} в **линейном масштабе**). Затем на средней частоте ($f_{\text{ср}}$) на уровне -3дБ от значения LK_{e0} определить граничные частоты ($f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$). Для поиска граничной частоты можно воспользоваться командой поиска по заданному значению, которая становится доступна после активизации электронных курсоров (пиктограмма ). Затем надо нажать пиктограмму  и в открывшемся окне ввести следующую команду *search forward level: sfle(LK_{e0}-3)*, если курсор расположен в начале графика, или *search back level: sble(LK_{e0}-3)*, если курсор находится в его конце; здесь LK_{e0} – численное

значение логарифмического коэффициента усиления, найденное по ЛАЧХ на средней частоте. Затем найденную точку нужно отметить маркером курсора (пиктограмма **Mark Label** ) , он позволяет вывести на экран координаты точки, помеченной курсором (рис. 4).

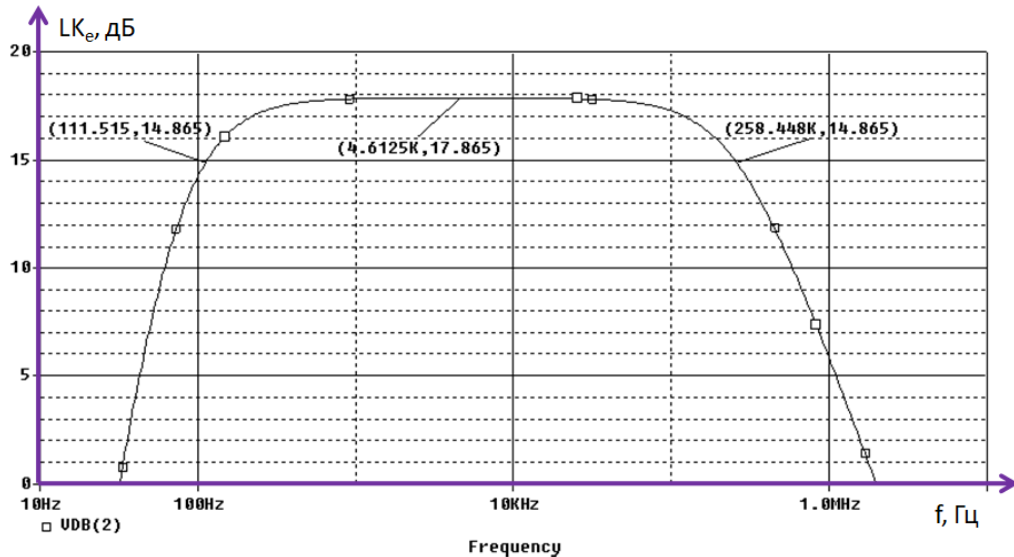





Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

2.2. 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**  (рис. 5).

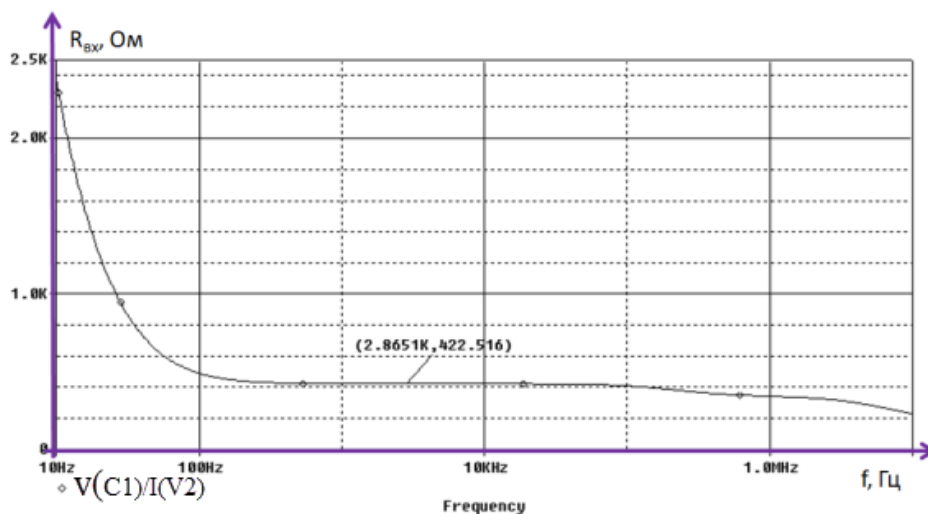







Рис. 5. Определение входного сопротивления

2.3. Расчет нагрузочной характеристики усилителя

Выходное сопротивление усилителя можно определить по нагрузочной характеристике, которая определяет зависимость коэффициента усиления усилителя от сопротивления нагрузки $K_u(R_H)$. Для выполнения этого пункта надо 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* = R7, 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* (или 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} , определяемое на средних частотах при получении семейства АЧХ (на рис. 6,б это 5 кГц). Эта частота примерно равна средней частоте, на которой определялся по АЧХ коэффициент усиления LK_{e0} .

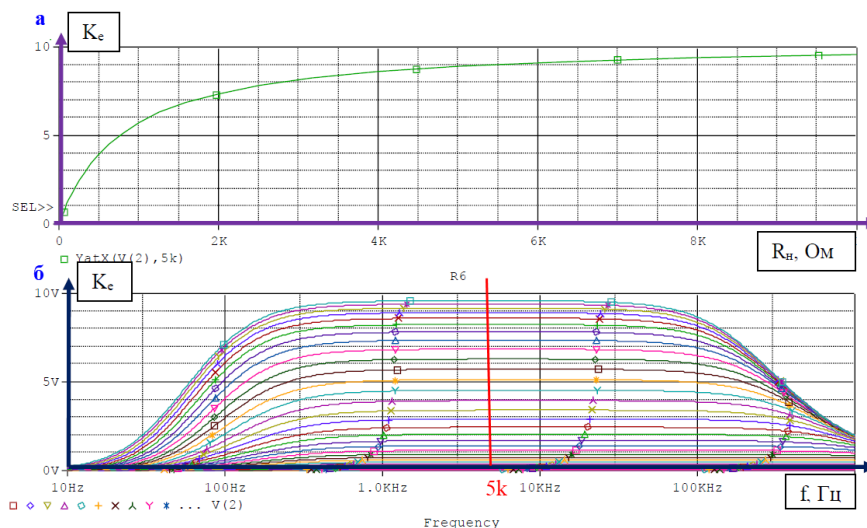




Рис. 6. Семейство АЧХ (а) и нагрузочная характеристика усилителя (б)

Когда окно будет закрыто, появится график нагрузочной характеристики (рис. 6,а). После этого рекомендуется убрать нижние (исходные) графики, 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 $K_{u\text{xx}}/2$ (передвигать курсор можно также, оперируя курсорными клавишами клавиатуры), сопротивление $R_{\text{вых}}$ будет получено в левом столбце окошка **Probe Cursor**. Эту точку также надо отметить с помощью пиктограммы **Mark Label** . Часто уровень $K_{u\text{xx}}$ определить бывает затруднительно, тогда для более точного определения выходного сопротивления рекомендуется определить его по формуле, отметив на характеристике (рис. 7) две произвольные точки (точки рекомендуется брать подальше друг от друга, так, чтобы значения коэффициента усиления заметно отличались друг от друга):

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{н1}} R_{\text{н2}} (K_{u2} - K_{u1})}{K_{u1} R_{\text{н2}} - K_{u2} R_{\text{н1}}} .$$

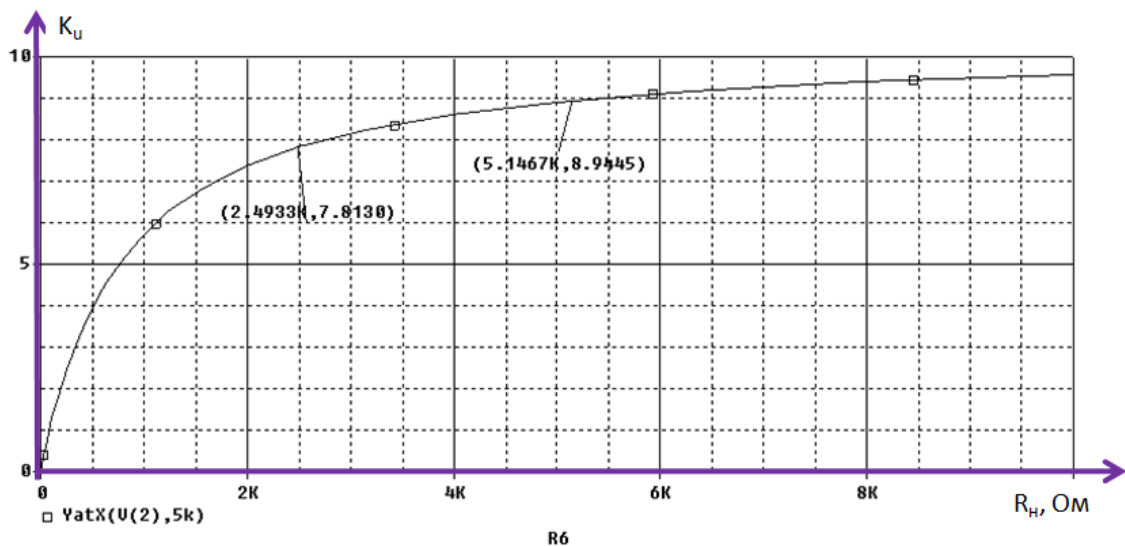




Рис. 7. Нагрузочная характеристика усилителя

2.4. Расчет амплитудной характеристики усилителя.

Амплитудная характеристика (АХ) определяет зависимость амплитуды выходного сигнала усилителя 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). Частоту источника **VSIN** надо установить примерно равную частоте f_{cp} , выбранную при получении АЧХ.

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, 2);
- 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. 8); для каскада ОК – *Start Value = -5V*; *End Value = 5V*; *Increment = 50mV*;

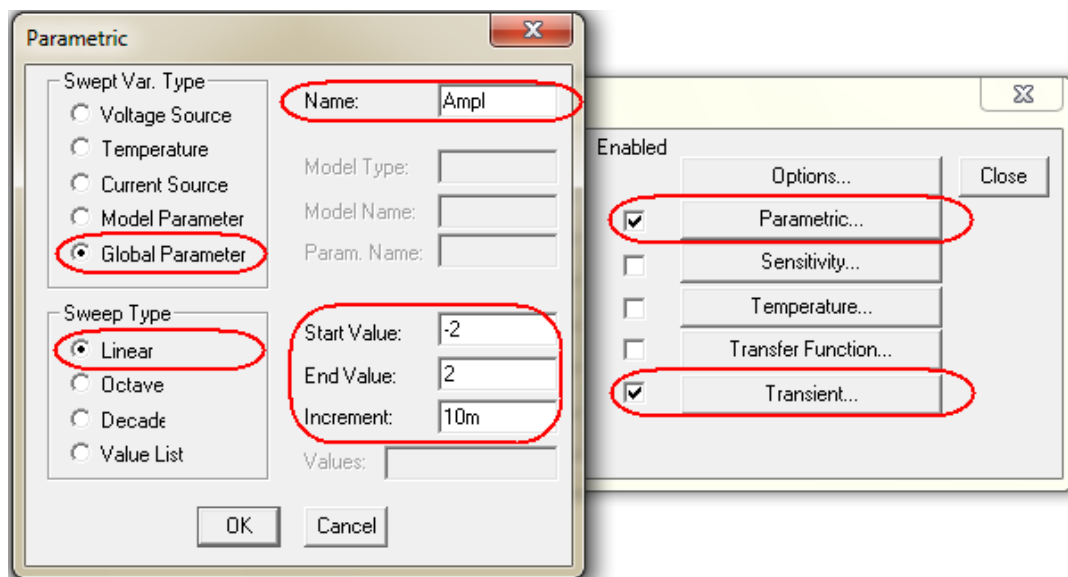






Рис. 8. Установки для параметрического анализа.

- отключить специальный маркер для измерения коэффициента передачи в децибелах (выделить и нажать **Del**), установить на выход схемы (R_H) 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 ОК.

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. 9,б) с предельными значениями, указанными в режиме **PARAMETRIC** (рис. 8). 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(2)**. В момент, когда выходное напряжение достигает предельных значений (рис. 9,б), определяем заданную точку – на рисунке это 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(2),50u)**.

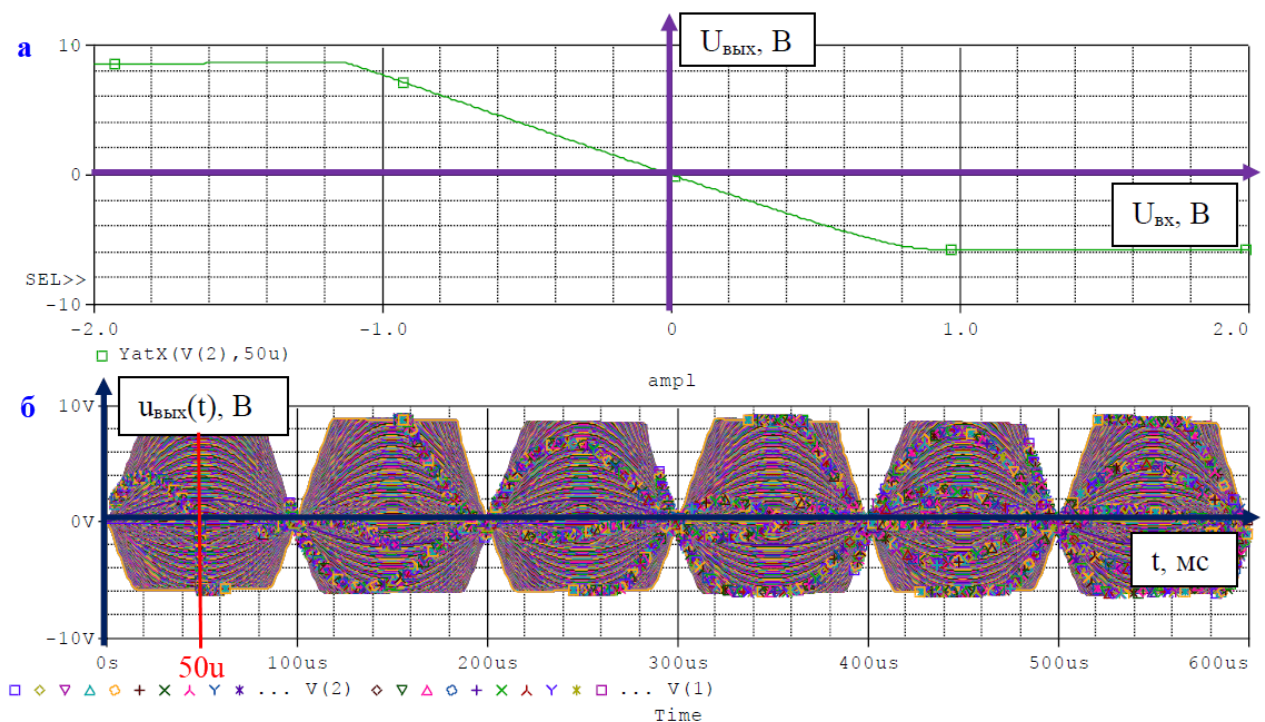



Рис. 9. Осциллограммы выходных напряжений (а) и амплитудная характеристика (б)

Когда окно будет закрыто, появится график амплитудной характеристики (рис. 9,а). Если график получится слишком мелким, можно установить другой 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 ($U_{\text{ВХ макс}}$).

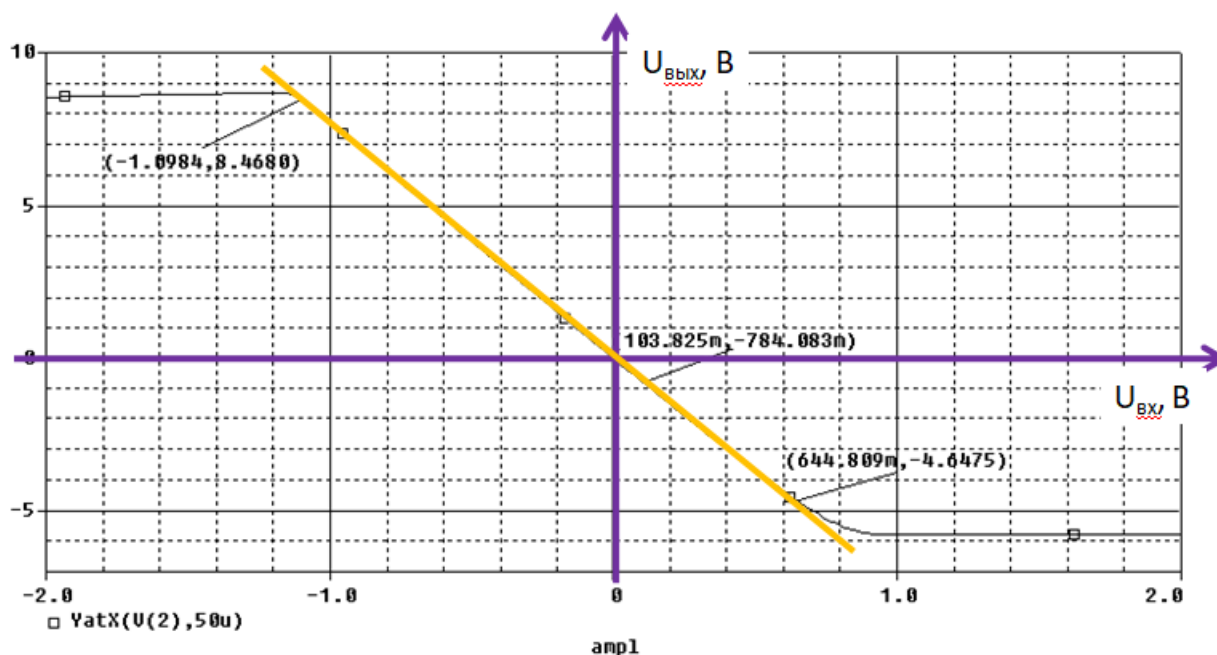




Рис. 7. Амплитудная характеристика

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 $K_{e0} = U_{\text{ВЫХ}}/E_{\Gamma}$. Затем следует сравнить коэффициент усиления K_{e0} с техническим заданием и расчетом.

3. Определение коэффициента нелинейных искажений.

Для определения коэффициента нелинейных искажений усилителя надо подать на его вход синусоидальный сигнал с частотой, равной округленному до 1-2 значащих цифр значению $f_{\text{ср}}$ ($f_{\text{ср0}}$) и амплитуду сигнала генератора ($E_{\Gamma \text{ макс}}$), соответствующую рассчитанной в п. 9 максимальной амплитуде неискаженного выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ макс}}$. Для этого необходимо сделать следующее.

- Установить нужную частоту у источника VSIN и амплитуду в глобальном параметре **PARAM**: {Ampl} = численное значение $E_{\Gamma \text{ макс}}$.
- Установить режим расчета схемы во временной области (**Analysis – Setup – Transient...**) с параметрами: *Print Step*=10ns; *Final Time*=5T, *Step Ceiling*= *Final Time*/1000, где $T=1/f_{\text{ср0}}$. 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 )
- Установить параметры Фурье-анализа: поставить галочку в графе *Enable Fourier*, задать значение *Central Frequency*= f_{cp0} , *Number of Harmonics*=5, указать выход схемы *Output*.

В выплывшем окне программы *Probe* появятся осциллограммы входного и выходного синусоидальных сигналов. Результаты гармонического анализа можно посмотреть в окне программы *Schematics* в выходном файле программы *Pspice*, воспользовавшись командой *Analysis/Examine Output*.

Рассчитать коэффициент нелинейных искажений можно как отношение действующего значения высших (2-5) гармоник к амплитуде основной (первой) гармоники.

4. 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.