

## СИМИРОВАНИЕ

Начну с того, что я хочу увидеть и, собственно, какие характеристики мне нужно построить.

Как гласит теория, для анализа устойчивости усилителя можно применить три метода исследования. Применяются при включенной ООС. Первый – измерить запаздывание сигнала на выходе усилителя относительно входа при изменении частоты сигнала. При этом измеряется фаза сигнала и к-т усиления. Если фаза сигнала при положительном к-те усиления становится соизмеримой с фазой входного сигнала, можно говорить о потенциальной неустойчивости усилителя. Второй – измерить АЧХ усилителя. По виду АЧХ можно сделать вывод о наличии предпосылок к неустойчивости. Третий, самый жесткий, измерение переходной характеристики. По виду отклика также делается вывод об устойчивости. Первый метод на практике, т.е., на железе, обычно не применяется, так как измерение фазы в реальных условиях затруднено из-за отсутствия нужных приборов. Сейчас, правда, выпускаются всякие навороченные, так что, наверно, уже можно, хотя на самом деле особой надобности в этом нет. Зато применение второго и третьего не вызывает затруднений, кроме как необходимости применения качественных генераторов и осциллографов.

Что мы должны увидеть в каждом методе буду комментировать по ходу дела.

Применение симуляторов позволяет использовать все три метода, поскольку расчет фазовой характеристики затруднений не вызывает, при этом увеличивается наглядность полученных результатов, а также появляется возможность перекрестного анализа.

Итак, поехали.

Снимаем АФЧХ усилителя.

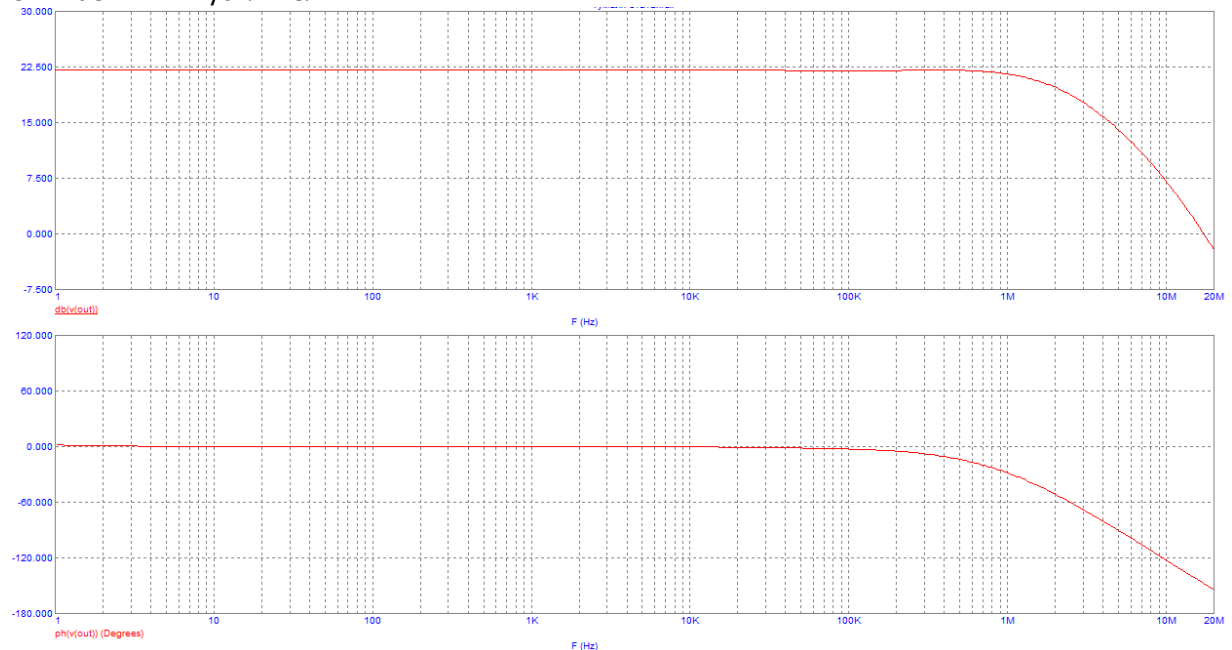


Рисунок 1 АФЧХ усилителя.

Все идеально. Полоса пропускания порядка 1 МГц, никаких выбросов нет. Слегка смущает, что фаза при единичном усилении от нуля опускается куда-то к 360 град.

А что нам скажет переходная характеристика?

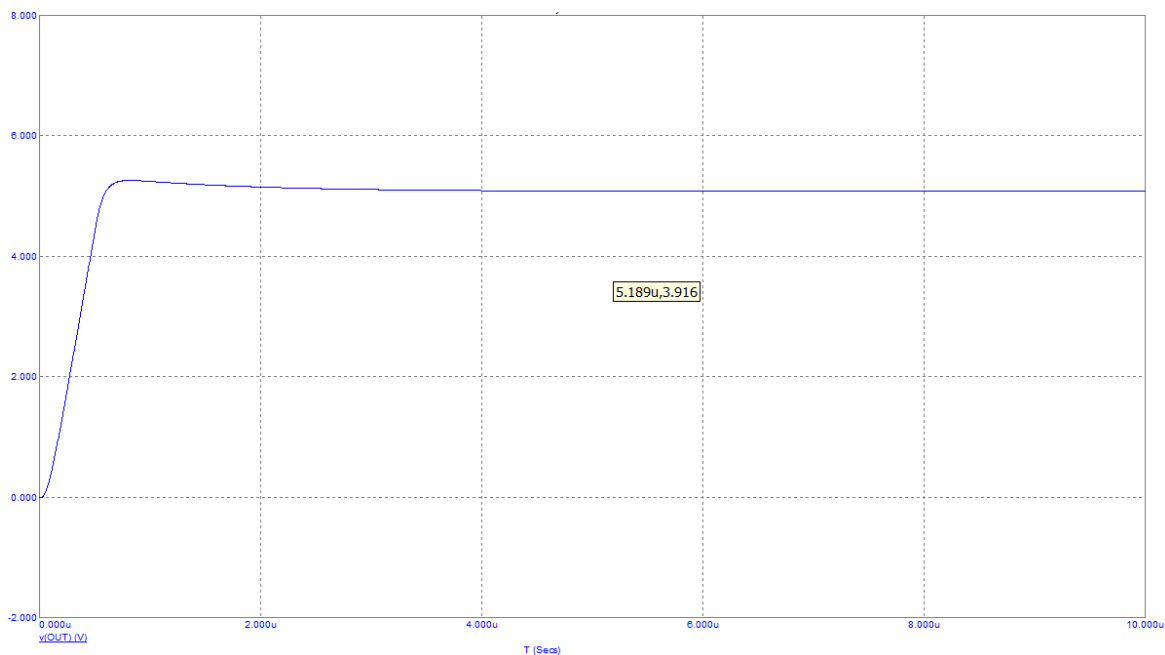


Рисунок 2 Переходная характеристика.

А вот здесь просматриваются признаки того, что мы ищем. Я говорю о небольшом пике после окончания переднего фронта, который носит название выброса на переходной характеристике. По его величине можно судить о степени неустойчивости усилителя. Посчитаем как отношение дельта к величине установившегося значения. Получим 4%. Как утверждает теория, для такой величины выброса запас по фазе составляет больше 60 град, что достаточно для признания усилителя устойчивым.

На всякий случай для проверки рисуем АЧХ в несколько ином масштабе.

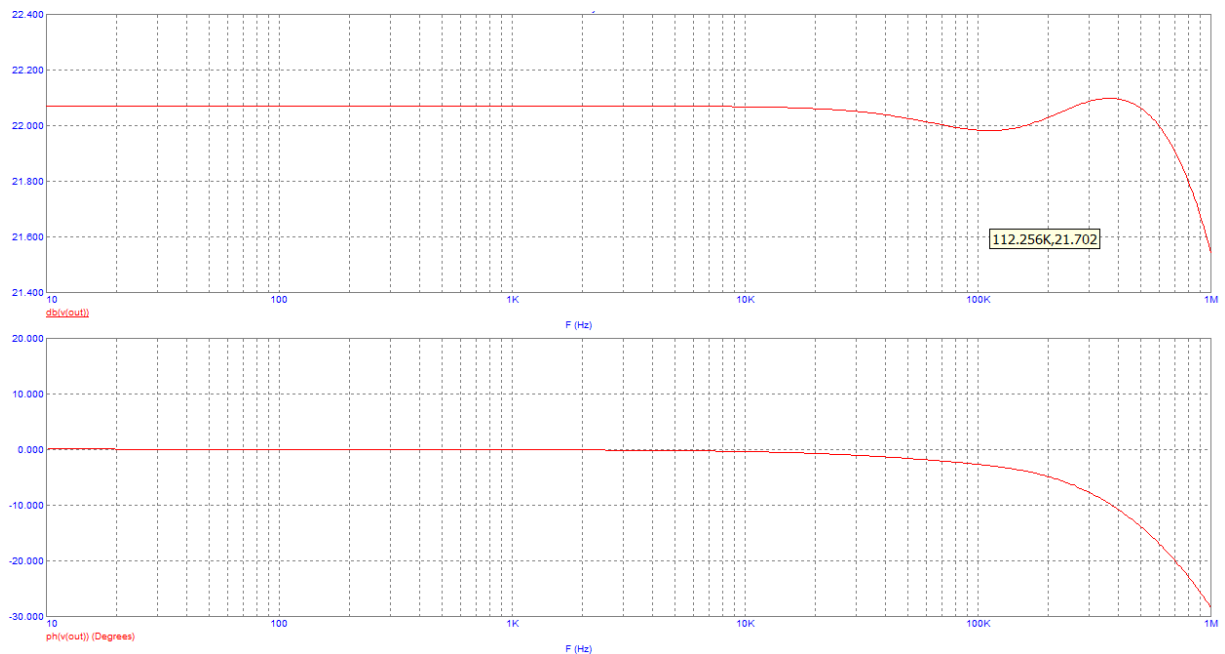


Рисунок 3 АФЧХ усилителя в другом масштабе.

Таки да, на частоте 400к видим характерный пик с предварительным провалом на 100к. Опять же, по величине этого пика можно судить об устойчивости усилителя. В нашем случае величина выброса менее 0,3 дБ, что соответствует данным переходной характеристики и означает, что усилитель устойчив.

Но мы продолжаем злобствовать и не верить. Обратимся к предварительно проведенному анализу работы усилителя. Из него следует, что до некоторой амплитуды выходного напряжения

два выходных транзистора (ВК) находятся в отсечке. При этом к-т усиления мал, что позволяет сместить паразитные полюса на АЧХ в область минимума усиления, их влияние на устойчивость усилителя несущественно. Как только сигнал вырастает до уровня открывания выходных транзисторов, к-т усиления без ООС вырастает из-за появления дополнительного усиления токового бустера, паразитные полюса поднимаются и могут оказывать влияние на параметры усилителя.

Почему же мы не видим желаемого? Смотрим в учебники. Оказывается, СМ10 при расчете АФЧХ линеаризует активные элементы. Как он это делает, знает только он сам. Для нас же важно, что запертые выходные транзисторы для расчета АЧХ СИМ не воспринимает. Ну, или, возможно, не воспринимает. Соответственно, влияние дополнительного усиления также не учитывается. Суслик не виден. Но он там может быть!

Попробуем извлечь суслика. Для этого необходимо симитировать режим активной работы ВК. Поступаем очень просто: подаем начальный ток в транзисторы. ВК переходит в активный режим, каскад входит в режим усиления, полюса вылезают из небытия, СИМ понимает все как надо, мы радуемся. Изменения в схеме довольно примитивны: достаточно увеличить резисторы R8,R9 до 220 Ом. Величина тока ВК устанавливается в 140 мА, что нас вполне устраивает. Изменение номиналов резисторов не приводит к значительному изменению других параметров усилителя, поскольку увеличение составляет всего 18%.

Что получилось?

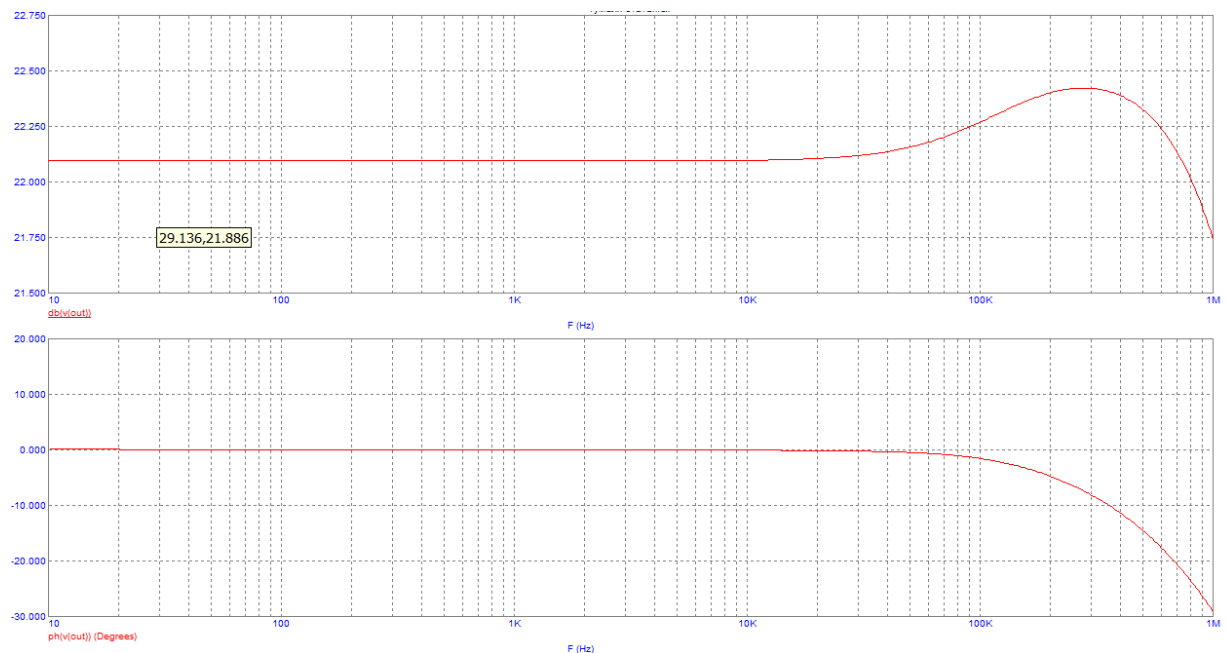


Рисунок 4 АФЧХ усилителя с начальным током ВК.

Таки да, эффект есть. Но величина выброса остается меньше 0,3дБ. Т.е., усилок все равно устойчив.

На переходной характеристике изменений не заметил, поэтому ее не привожу.

К сожалению, АЧХ в предельных режимах, т.е., при максимальных токах и напряжениях посмотреть пока не могу, хотя очень хочется. Не умею ☹. Надо подумать.

Теперь хочу рассмотреть влияние емкости С3. Это легко. Даем ей значение заведомо ниже номинала, например, 1000 пФ, и смотрим результат. Ток ВК оставляем 140 мА.

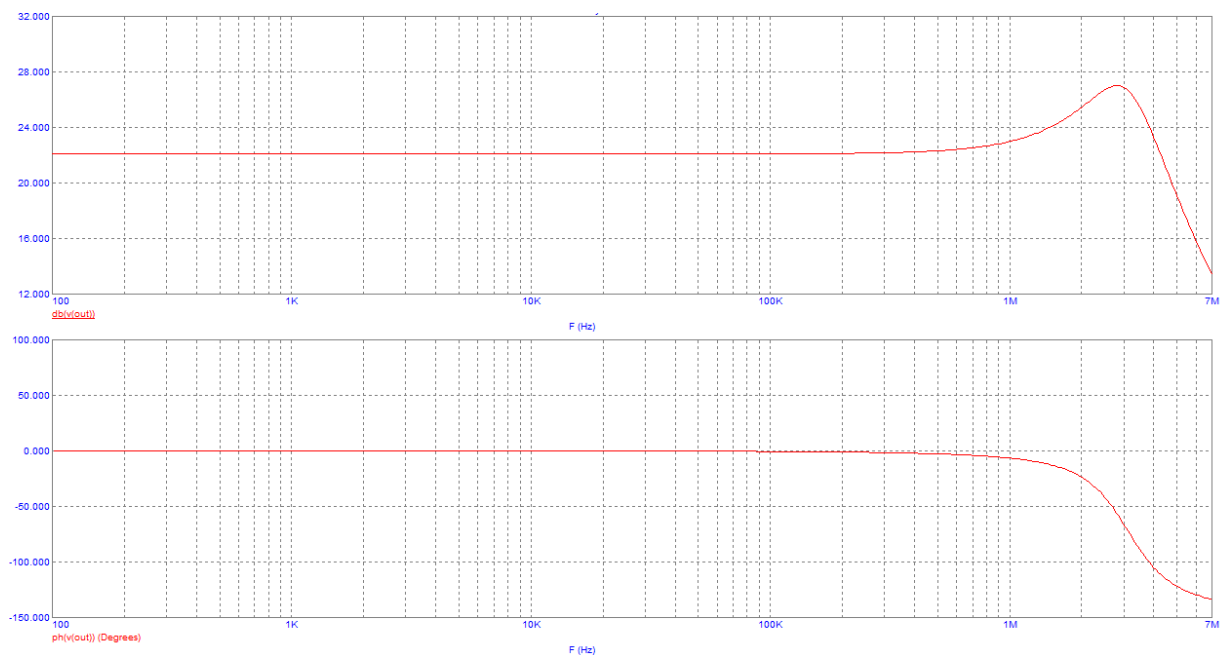


Рисунок 5 Влияние емкости  $C_3$ . АЧХ.

Как видим, на АЧХ появился хорошо выраженный резонансный пик амплитудой порядка 5 дБ. Запас по фазе при этом градусов 30. Это уже криминал. Такой усилитель склонен к самовозбуждению.

Переходная характеристика принимает вид

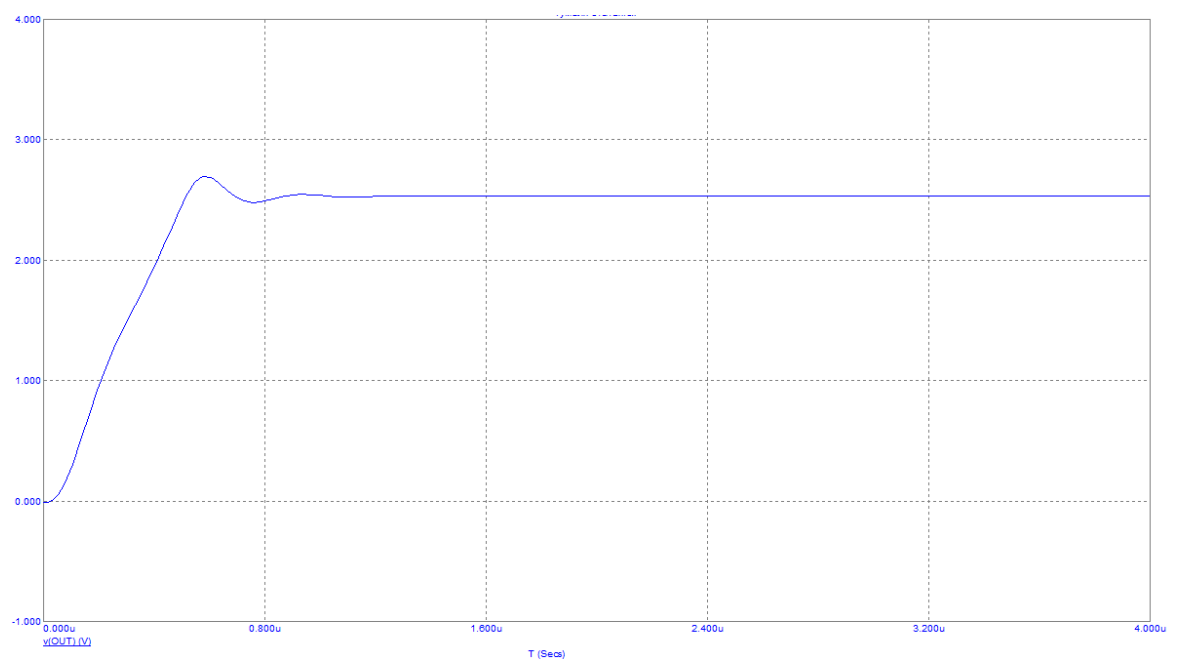


Рисунок 6 Влияние емкости  $C_3$ . Переходная характеристика.

Как видим, изменения существенные. Мало того, что выброс увеличился, так еще после выброса появился хорошо заметный синусоидальный переходной процесс. Хотя усилитель по-прежнему не склонен к самовозбуждению.

На данной эпюре просматривается еще одна интересная деталь. Я имею ввиду передний фронт импульса. Видно, что до напряжения примерно чуть больше 1 вольта характеристика имеет один, крутой, наклон, который потом плавно переходит в более пологий. В данном случае эта картинка отражает две характеристики усилителя: 1-скорость нарастания, 2-время установления. Первая – нелинейная характеристика. Она означает, что где-то в недрах усилителя имеется емкость, заряд которой имеющиеся активные компоненты в активном режиме зарядить не могут. Поэтому ее заряд происходит неким стабильным током до какого-то значения. После этого петля

обратной связи захватывает выходное напряжение, начинается Второй режим, активного нарастания. Здесь напряжение подчиняется экспоненциальному закону. Поскольку усилитель близок к зоне неустойчивости, первая экспонента нарастает с высокой крутизной и с выходом за пределы установившегося значения (это называется перерегулированием). Крутизна нарастания экспоненты определяется первой производной от нее и в начальный момент больше, чем скорость нарастания выходного напряжения усилителя. В нашем случае до 1 В усилитель работает в нелинейном режиме, потом – в линейном, но с перерегулированием.

Как видим, С3 выбрана достаточно правильно и обеспечивает устойчивую работу усилителя.

И, наконец, последнее на данном этапе. Поскольку мы все-таки исследуем работу конкретного усилителя, необходимо посмотреть работу схемы в исходном режиме. Вернем сначала ранее выброшенные нами конденсаторы С4, С5. Ток ВК=140мА. С3=33н.

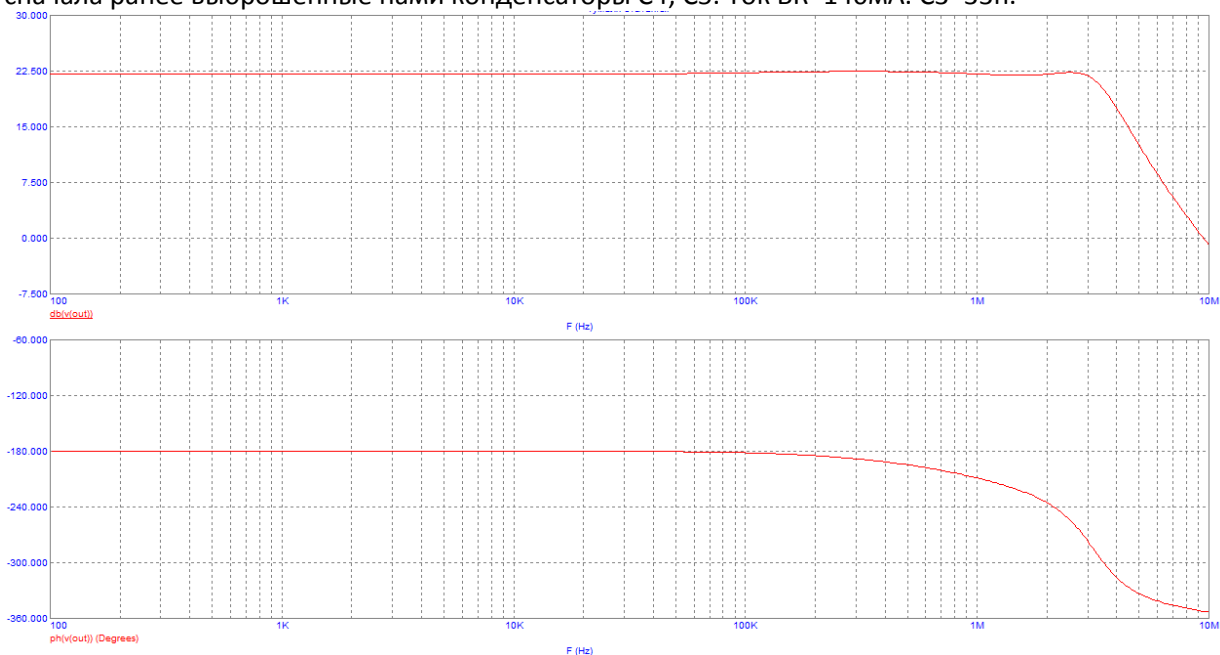


Рисунок 7 Влияние емкости С4, С5. АФЧХ.

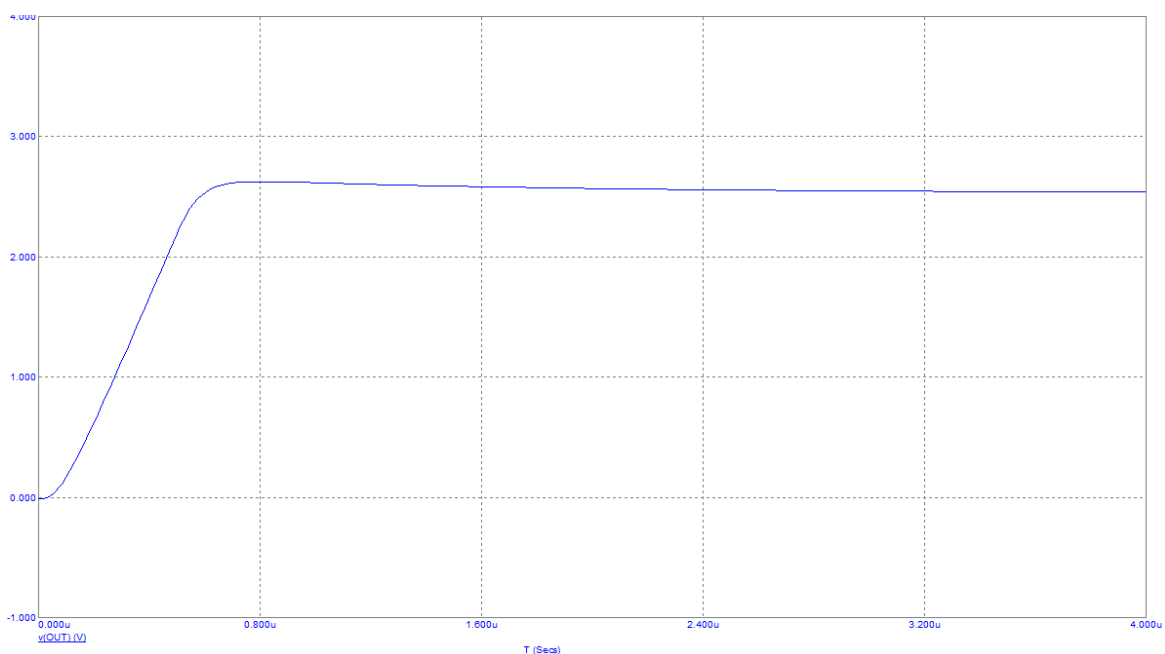


Рисунок 8 Влияние емкости С4, С5. Переходная характеристика.

Ну так и не вижу я никакого криминала. Кроме как подозрительно ровный передний фронт. И начальная фаза почему-то стала равна (-180) град. ☹. Но это могут быть штучки СИМа. Надо будет подумать на досуге. Собственно, не вижу и особого положительного влияния.

Кроме того, для себя проверил влияние этих емкостей при  $C_3=1\text{н}$ . Изменений тоже не заметил, поэтому картинки не привожу.

А теперь вернем на место конденсатор  $C_2=470\text{пФ}$ . Ток  $BK=140\text{мА}$ .  $C_3$  установим  $1\text{н}$ . Как мы видели ранее, такой номинал приводит к неустойчивой характеристике. А нам нужно установить влияние  $C_2$ .

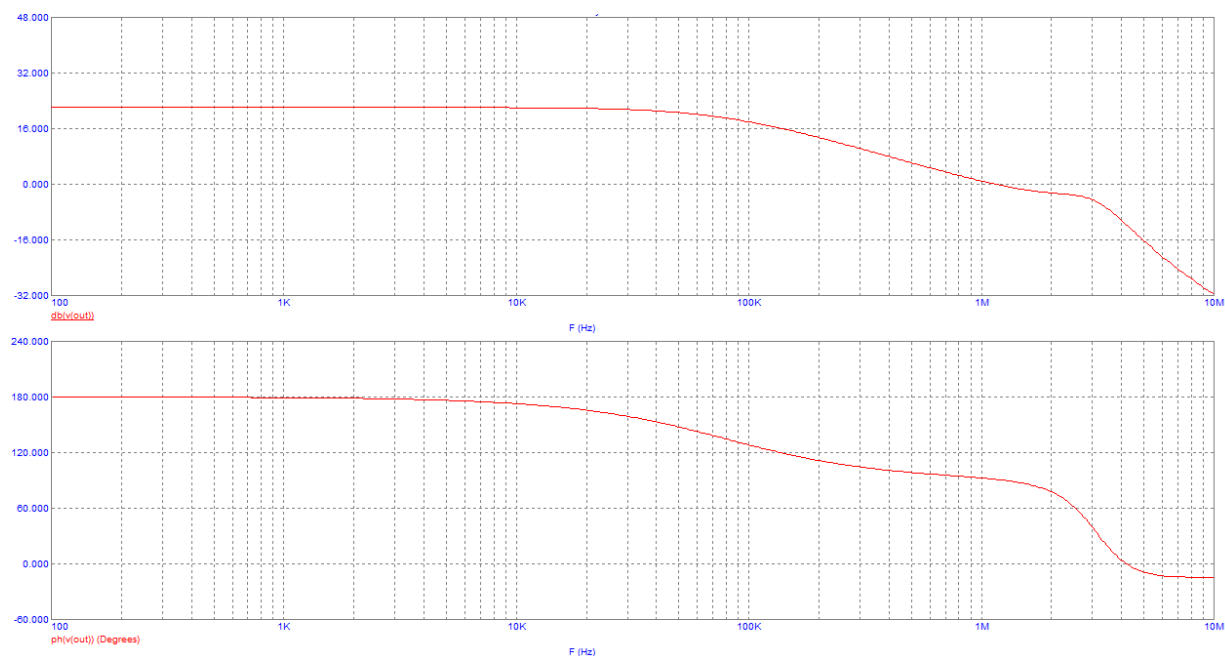


Рисунок 9 Влияние емкости  $C_2$ . АФЧХ.

Как видим, характерные признаки неустойчивости уползли вниз. Единичное усиление на частоте  $1\text{М}$ . Переворот фазы наступает далеко за пределами полосы усилителя. Мало того, резонансный пик не имеет ярко выраженной характерной формы и может быть пропущен при анализе.

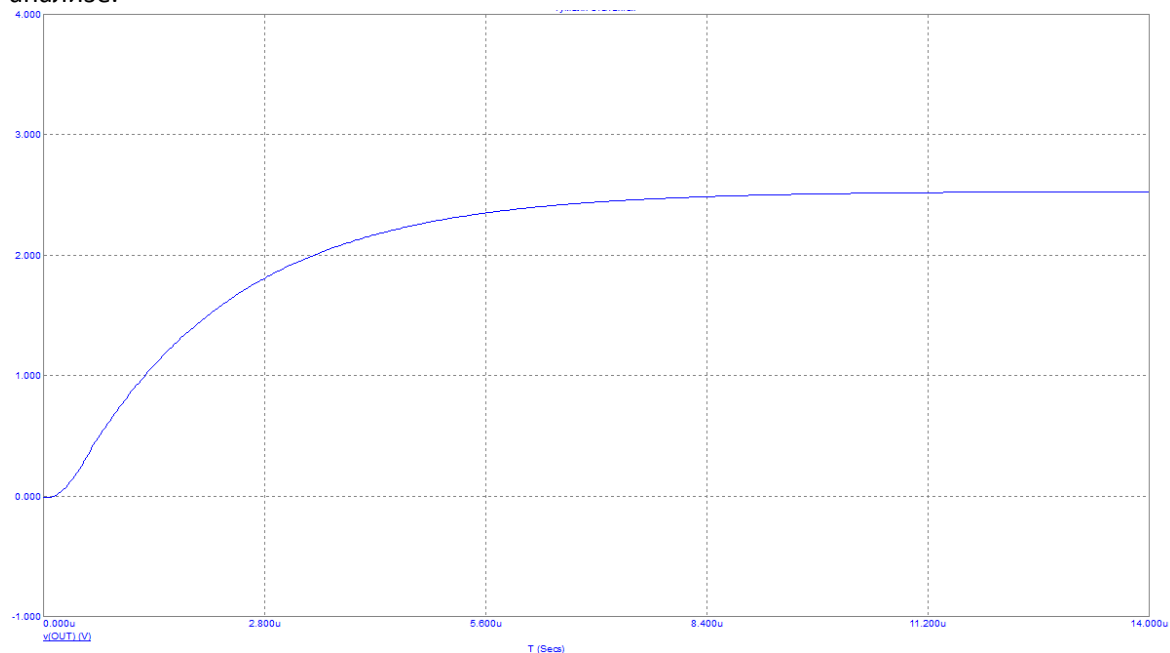


Рисунок 10 Влияние емкости  $C_2$ . Переходная характеристика.

А переходная характеристика характеризует абсолютно устойчивый однополюсный усилитель. Вообще супер. Единственная неприятность: начало импульса имеет малюсенькую задержку. Но мы-то знаем, что усилитель, скорее всего, работать не будет, так как все неприятности находятся ПОСЛЕ С2.

Вывод: При установке С2 и последующем измерении параметров усилителя происходит маскировка реально происходящих в нем процессов.