

ДОММ-19

УСИЛИТЕЛЬ НА ГЕРМАНИИ 24В

Работаем с переходной характеристикой.

Ну а теперь – настройка усилителя. Проще всего использовать переходную характеристику, т.е., реакцию на выходе усилителю при возбуждении входа импульсным сигналом. Но сначала немного теории. Нужно же нам знать, с какими монстрами бороться?

Теория

Мы имеем один усилительный элемент, транзистор Т2. Для него всё, что мы имеем согласно результатам измерений: усиление 67 дБ, частота среза 34 кГц. Примем это значение в качестве одного из полюсов и разберёмся, что ещё такого может быть в схеме усилителя.

1. Полюс на частоте, которая определяет частотные свойства транзистора. Этот полюс можно определить через β транзистора, то есть там, где β начинает уменьшаться с ростом частоты, там и расположен полюс схемы. Для П609А частота единичного усиления по ДШ $F_1=120\text{МГц}$, а $\beta=80\dots240$. На самом деле частотные свойства транзистора обычно слегка получше, но, чтобы не заморачиваться с расчётами, примем их согласно ДШ. Считаем условно $\beta=100$, тогда полюс будет на частоте $F_1/\beta=120/100=1,2\text{МГц}$. Замечание: если нам попадётся хороший транзистор с $\beta=240$, то полюс сдвинется вниз по частоте до 500 кГц. В этом случае можем иметь проблемы.

2. Полюс в выходном каскаде. Это, как и в первом случае, также частота, на которой кончаются усилительные свойства транзисторов, но теперь уже предвыходных драйверов. Частотные параметры для них нормируются на частоте 1 МГц. Поскольку здесь они включены повторителями, то примем их полюс равным 1 МГц.

Таким образом, в качестве первого полюса напрашивается полюс на частоте 34 кГц, в качестве второго – полюс на частоте 1 МГц, третьего – на частоте 1,2 МГц. Имеем АЧХ, которая формируется тремя полюсами: до частоты 34 кГц АЧХ равномерна на уровне 67 дБ, в точке 34кГц д действием первого полюса начинается наклон АЧХ со скоростью 20 дБ/дек, под действием второго полюса на частоте 1 МГц наклон АЧХ увеличивается до 40 дБ/дек, под действием третьего полюса на частоте 1,2 МГц наклон АЧХ увеличивается до 60 дБ/дек. Чтобы оценить, насколько критично будет такое расположение полюсов, необходимо рассчитать к-т усиления усилителя без ООС в критических точках.

К-т усиления каскада на Т2 на частоте второго полюса.

$$K_{f2} = 67 - 20 * \log_{10} \frac{f_2}{f_1} = 67 - 20 * \log_{10} \frac{1000}{34} = 67 - 29,4 = 37,6 \text{ дБ}$$

Усиление в точке третьего полюса.

$$K_{f3} = 67 - 20 * \log_{10} \frac{f_3}{f_1} = 67 - 20 * \log_{10} \frac{1200}{34} = 67 - 31 = 36 \text{ дБ}$$

Что означают полученные результаты? Поскольку к-т усиления без ООС получился больше, чем к-т усилителя с включенной ООС, который равен 26 дБ, то линия ООС в точке 1 МГц гарантированно будет упираться в наклон характеристики 40 дБ/дек. В самом деле, к-т усиления превышает усиление с ООС более чем на 10 дБ. Согласно теории, такой усилитель будет, мягко говоря, неустойчив, если не радостно загенерит. А в точке 1,2 МГц наклон характеристики составит уже 60 дБ/дек, что тоже превышает усиление с ООС. В этом случае усилитель точно перейдёт в режим генерации.

Что нужно делать? Поскольку форма фронта определяется близко расположенными полюсами, то способ устранения – уменьшить их влияние друг на друга, чего можно достичь несколькими методами:

1. Увеличить к-т усиления усилителя с ООС. В этом случае параметры ООС выбираются такими, чтобы к-т усиления стал больше, чем усиление каскада на Т2 на частотах полюсов. В этом

случае полюса перестают оказывать влияние на АЧХ усилителя. Обычно для нейтрализации полюса необходимо установить параметры ООС так, чтобы усиление на частоте полюса было меньше усиления ООС хотя бы на 6 дБ. В нашем случае практически на одной частоте расположены два полюса, поэтому для их нейтрализации необходим запас в 12 дБ. Плюс ещё немного для верности. Итого получается, что к-т усиления с ООС усилителя необходимо выбирать в районе 50 дБ. Между прочим, так поступали корифеи в середине 70-х прошлого века. Это не наш метод.

2. Растащить полюса по частотной оси. Сдвинуть второй и третий полюс по частоте невозможно, остаётся двигать первый полюс в сторону понижения его частоты. Поскольку он образован паразитными емкостями транзисторов и входным сопротивлением драйверного каскада, то единственным способом уменьшить его частоту является подсоединение в коллектор Т2 конденсатора на землю, параллельно сопротивлению нагрузки и паразитным емкостям. Этот метод имеет небольшой недостаток: снижение частоты к-та усиления каскада Т2 приводит к уменьшению запаса усиления с ростом частоты и соответствующему росту НИ. Если такая коррекция приведёт к снижению частоты этого полюса в область звуковых частот, например, до 1 кГц, то, начиная с частоты 1 кГц будем иметь рост НИ со скоростью 6дБ на октаву.

В этой связи, наверное, стоит оценить, до какой частоты необходимо снизить частоту первого полюса, чтобы исключить влияние следующих. Руководствуюсь тем, что на частоте 1 МГц надо иметь запас по к-ту усиления без ООС не менее 18 дБ: по 6 дБ на каждый полюс плюс 6 дБ запас. Т.е., к-т усиления на частоте 1 МГц должен быть не более $24-18=6$ дБ. Тогда частота полюса должна составить

$$f_1 = 1000/10^{\frac{67-6}{20}} = 0.89 \text{ кГц}$$

Худшие опасения подтвердились. Скорректированный полюс будет попадать в область звуковых частот.

3. Снизить усиление на высоких частотах, так чтобы к-т передачи цепи ООС на частоте второго полюса был заведомо ниже критического. Снизить усиление на высоких частотах проще всего установкой ёмкости между коллектором и базой транзистора Т2, ограничив тем самым частоту среза этого каскада. В этом случае работает цепь ООС: на частоте второго полюса усиление снижается благодаря конденсатору обратной связи, что благоприятно сказывается на параметрах усилителя. В отличие от первого метода первый полюс сдвигается незначительно.

Также посчитаем, только теперь у нас получится не частота первого полюса, а к-т усиления усилителя с ООС. На частоте 1 МГц имеем 6 дБ усиления, отсчёт идёт уже не от 67 дБ, а от 24 дБ ООС.

$$f_{\text{оос}} = 1000/10^{\frac{24-6}{20}} = 125 \text{ кГц}$$

Т.е., если у нас будет усилитель с полосой пропускания 125 кГц, то высокие полюса будут исключены из влияния.

4. Комбинация п.п.2 и 3.

Практика.

На вход подключаю генератор импульсов и на выходе смотрю отклик на перепад напряжения.

Здесь необходимо придерживаться следующих правил.

Если мы хотим измерить **линейную** характеристику усилителя, то, чтобы не перегружать входной каскад, на вход подается сигнал размахом не более 50 мВ. Довольно комфортно смотреть по осциллографу амплитуду где-нибудь в 600-900 мВ, по входу это будет от 25 мВ. Точно так же в случае снятия АЧХ входной транзистор не должен перегружаться большим сигналом, размах синуса по входу не должен превышать 100 мВ. При таком измерении исключаются искажения, вызванные ограничением скорости нарастания, т.е., перегрузкой, обычно первого каскада.

После определения границ искажений можно перейти к большим амплитудам, в этом случае можно будет разделить искажения, вызванные перегрузкой и нарушением устойчивости.

Ну что ж, фиксируем переходную характеристику.

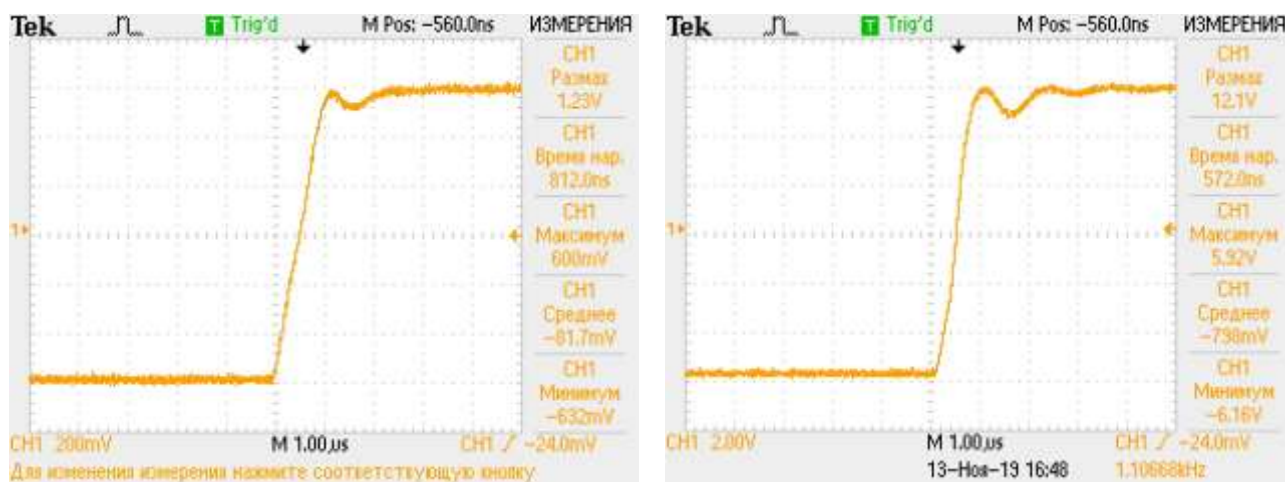


Рисунок 1. Переходная характеристика.

Повторюсь: дальнейшие операции можно не проводить, всё и так нормально.

Слева – на малом сигнале. Рискую предположить, что при такой переходной характеристике при подаче на вход звукового сигнала с резким перепадом напряжения мы услышим не только сам звуковой ряд, но еще и «продукты переработки» того самого переколебания, несмотря на то, что оно лежит далеко за пределами звукового диапазона. На всякий случай, обращаю **особенное внимание**, что до понятия «скорость нарастания» здесь еще даже и не дошло: усилитель работает в **линейном** режиме.

Справа – на большом сигнале. Радует, что форма очень похожа. Видно, что скорость нарастания довольно прилична. Посчитать её значение можно, но не имеет смысла, так как импульс имеет небольшие переколебания после окончания фронта, точно так же, как и на малом, и с этим придётся бороться. Но. Дело в том, что столь быстрый передний фронт на самом деле формируется из-за **дефекта усилителя**: близко расположенных первого и второго полюсов. То есть, усилитель окрашивает выходной сигнал согласно своим, внутренним правилам. На синусе это, может быть, и не заметно, а вот на резких перепадах – вполне. Мало того, что в любом усилителе уже имеется один дефект: фронты на выходе затягиваются из-за ограниченной полосы пропускания, так к нему ещё добавляются фронты, который формируются из-за другого дефекта. Впрочем, вполне возможно, что этот эффект как раз наоборот, приятен на слух.

А что нам говорит теория? Мы вычислили, что в усилителе имеются паразитные эффекты: близко расположенные полюса АЧХ. Форма фронта определяется их взаимным взаимодействием. Быстрое нарастание вызвано действием быстрой экспоненты, которая определяется вторым и третьим полюсами, после их окончания вступает медленная экспонента от первого полюса. Откуда берутся переколебания, сказать трудно, возможно, из-за слишком близкого расположения полюсов, возможно, из-за суммарного взаимодействия второго и третьего.

Ну что ж, привожу характеристику, как мне кажется, к нормальному виду.

Надо отметить один момент: время установления импульса составляет около 4 мкс (время отсчитывается от нулевой оси, она маркирована курсором). Это значит, что после проведения коррекции, скорее всего, таким будет и время установления конечного усилителя.

Фиксирую полосу пропускания. $F_{min}=15$ Гц $F_{max}=396$ кГц.

Начнём с третьего метода. Попробую коррекцию в обратной связи T2, миллеровскую. Ставлю между базой и коллектором T2 ёмкость сразу 47пФ, имею

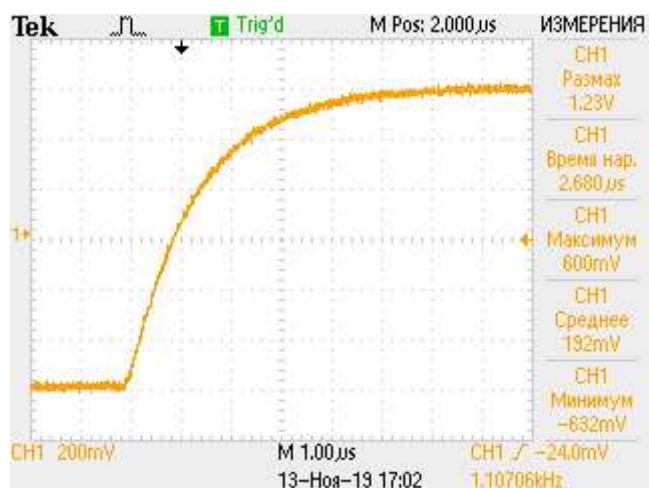


Рисунок 2. Переходная характеристика 47 пФ

Переходная характеристика стала гладкой, каких-либо искажений не видно. Время установления увеличилось до 5 мкс. Что характерно, обе кривые на малом и на большом сигналах опять ведут себя практически одинаково. Можно считать, что произошла полная нейтрализация влияния верхних полюсов.

Возможно, мы загрузили динамику усилителя. Но скорее всего, при прослушивании мы ничего не заметим, но ведь динамику можно слегка и восстановить. Надо только слегка уменьшить корректирующую ёмкость. Таки и уменьшим её, до 27 пФ.

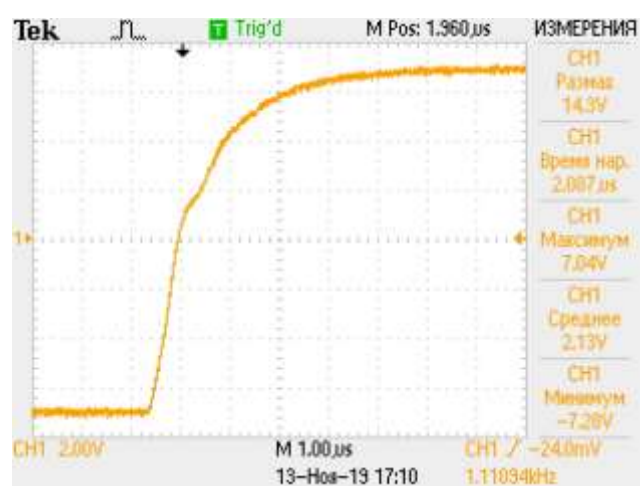
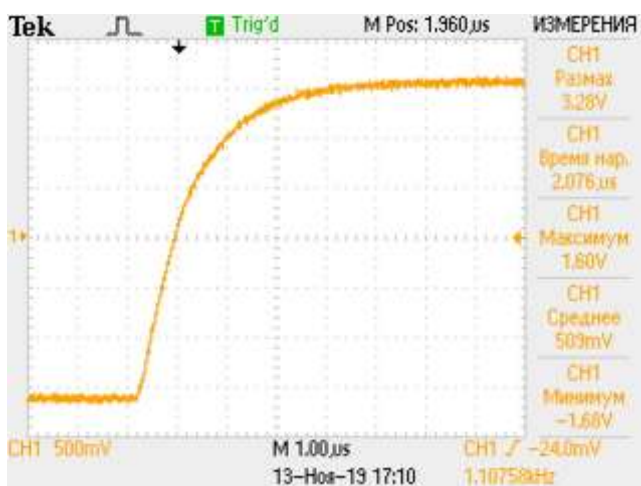


Рисунок 3. Переходная характеристика с 27 пФ.

На малом сигнале характеристика не изменилась, на большом – появилось небольшое искажение. Вероятно, на больших сигналах изменяются параметры выходного бустера, скорее всего, уменьшаются ёмкости предвыходных транзисторов, из-за чего первый полюс смещается в область высших частот, сближаясь с верхними полюсами. А может быть, на больших токах теряются частотные свойства мощных транзисторов. Время установления слегка уменьшилось, но не сильно.

Имеет смысл корректирующую ёмкость слегка увеличить. Но, в общем-то уже надоело, поэтому оставляю, как есть. Опять же, надо бы всё это протестировать акустически, типа, прослушать...

Обязательно надо убедиться в том, что характеристика по отрицательному фронту не имеет дефектов

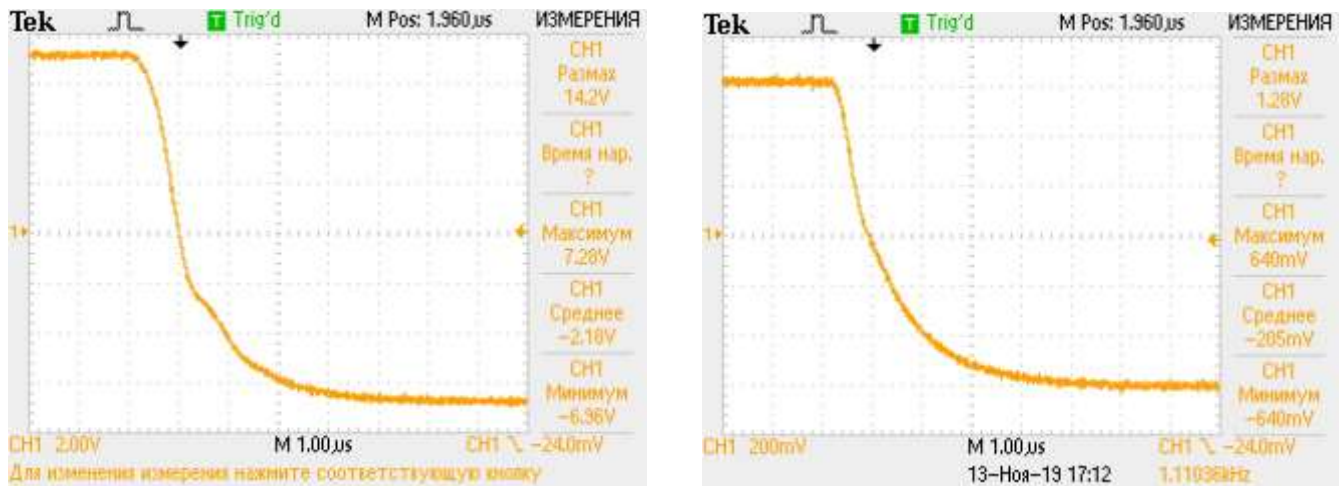


Рисунок 4. Переходная характеристика по отрицательному фронту

То же самое. Принимается.

Смотрю полосу пропускания. $F_{min}=15$ Гц $F_{max}=160$ кГц

Введение коррекции уменьшило полосу пропускания усилителя почти в три раза, тем не менее, она остаётся достаточно широкой, чтобы обеспечить нормальную динамику усилителя.

Поскольку результат получили более-менее приемлемый, обращаем внимание на тонкие моменты: при перестройке по частоте следим за тем, чтобы в диапазоне от F_{min} до F_{max} выходное напряжение самопроизвольно не увеличивалось и не уменьшалось. Если это происходит, значит, мы чего-то не заметили. В этом случае придется применять более изощренные методы анализа.

Кстати, замечание: после фиксации F_{max} стоит посмотреть реакцию усилителя на частотах более F_{max} хотя бы в два раза. Может быть, это как раз и есть тот самый «провал».

Ну ладно, с этим, типа, всё. Посмотрим теперь первый метод. Снимаю 27 пик и ставлю в коллектор 470 пФ.

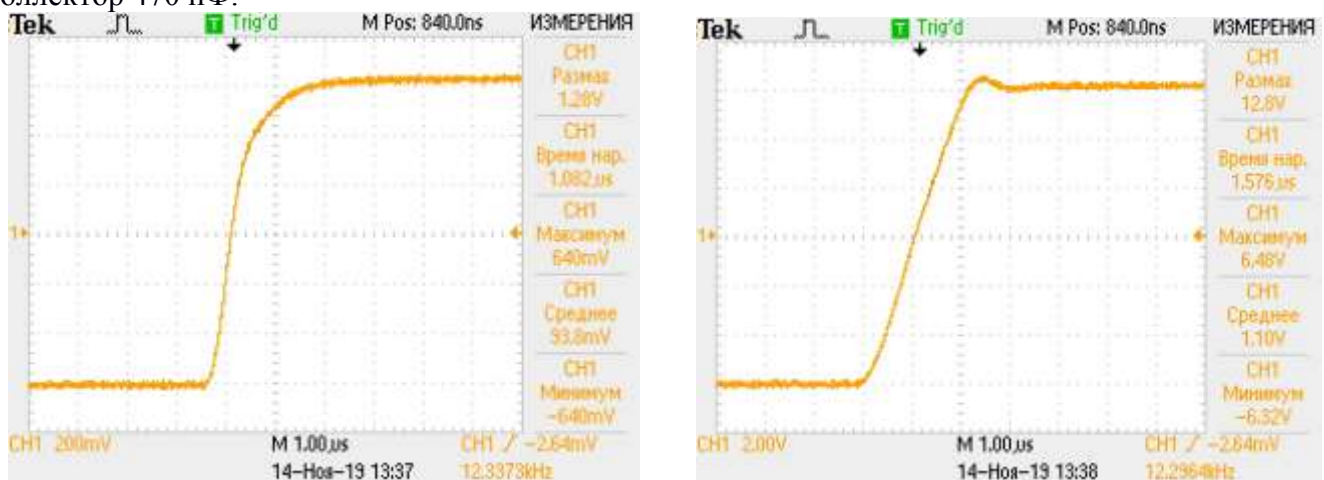


Рисунок 5. Переходная характеристика при коррекции в коллекторе

А что? Мне так даже больше нравится. Правда, большой сигнал подкачал, маленький выброс таки остался. Ну так давайте вернём 27 пФ и оставим 470 (комбинированный метод).

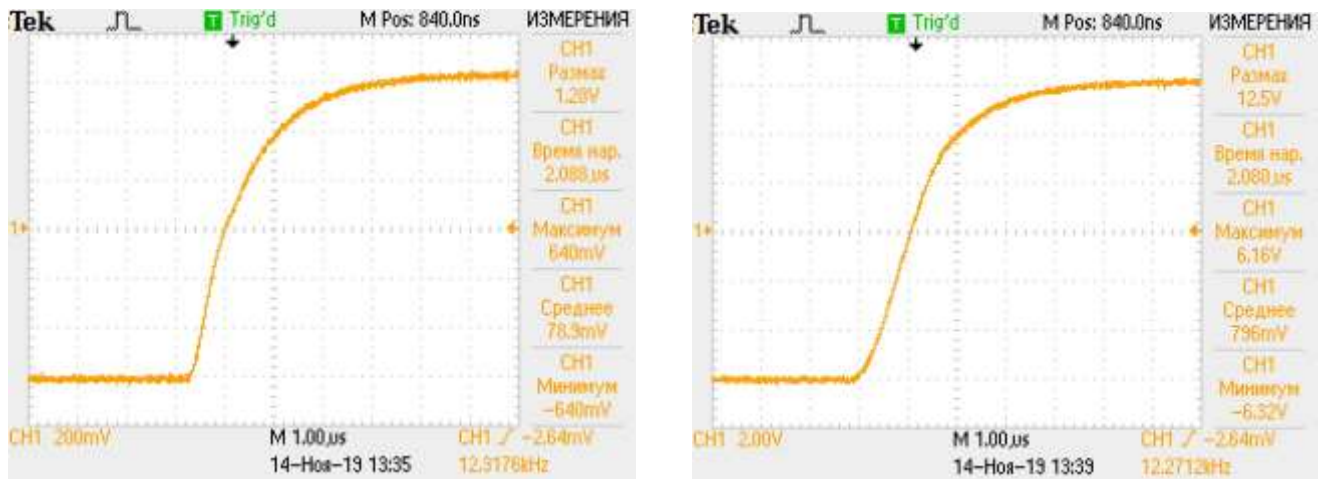


Рисунок 6. Переходная характеристика при емкостях в коллекторе и коллектор-база

Идеально! Наверно, есть смысл оставить. Но сначала проверить, что у нас с частотными параметрами. Меряем верхнюю частоту $F_{max}=160$ кГц. Не изменилась, видимо, запаса по усилению хватает для стабилизации к-та усиления на этой частоте. Частота среза каскада на T2 снизилась до $F_{maxT2} = 12.5$ кГц. В принципе, не особо пугает, но любителям низких НИ на частоте 20 кГц имеет смысл задуматься.

А что нам говорит теория? Имеем два воздействия: сдвиг первого полюса и ограничение полосы пропускания усилителя. Совместное воздействие их приводит к требуемому результату. При этом полоса пропускания получается шире заявленной и первый полюс не опускается глубоко в низкие частоты.

А сейчас проведу один эксперимент. Его целью является определение влияния частотных свойств транзистора T2 на общие параметры усилителя. Ставлю самый что ни есть дохлый транзистор МП25А, с большим допустимым напряжением, но отвратительными скоростными параметрами. Сколько раз видел, как народ лепит его в усилители, не понимая, к чему приводит появление такого низкочастотного элемента в цепи передачи сигнала. Я сразу говорил, что в этом месте необходим ВЧ транзистор, вот и посмотрим, на чём основывается моё мнение. Ставлю, смотрю. На картинке всё видно. Переходная характеристика.

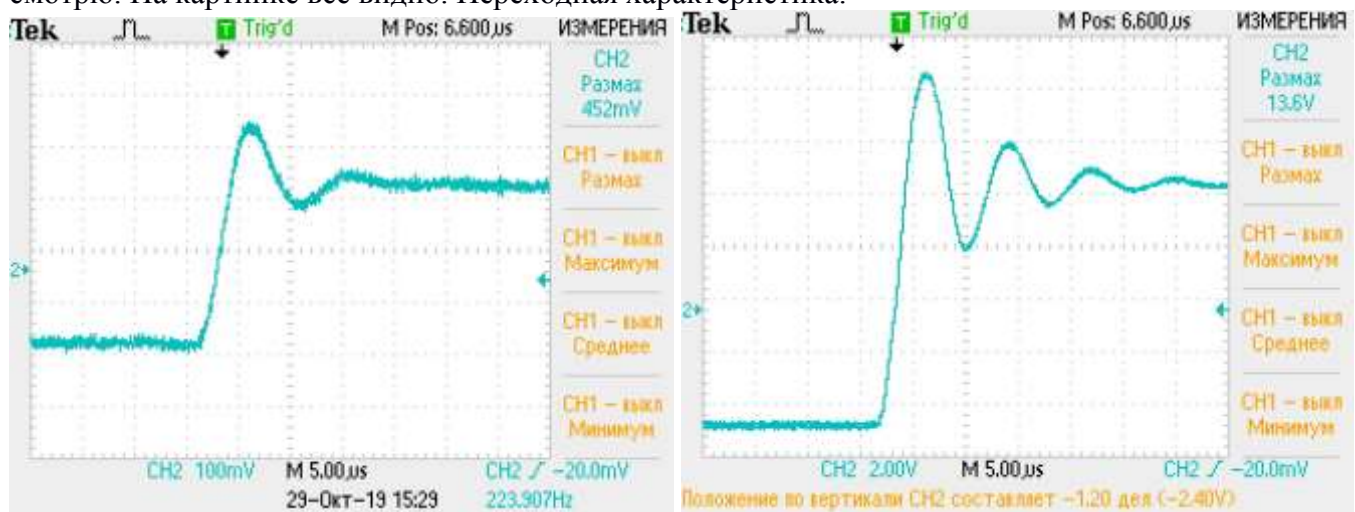


Рисунок 7. Переходная характеристика при T2=МП25А

Ну что можно сказать? Никуда не годится. Мало того, что имеется огромный выброс на фронте, так ещё и затем хорошо выраженные переколебания. Как ни странно, усилитель работает, возбудов нет, но фактически находится на границе устойчивости. Убрать такие дефекты будет практически невозможно, только разве что ценой полного загробления свойств усилителя.

Согласно теории, в данном случае полюс, зависящий от паразитных емкостей транзистора, не изменился, поскольку имеет примерно ту же величину, что и у П605, а полюс, зависящий от

частотных свойств транзистора, опустился в низкочастотную область, не считал, но, думаю, где-то к 100 кГц. Отсюда такие переколебания и отвратительная переходная характеристика.

В принципе, усилитель с МП25А настроить вообще будет невозможно, ну, довольно проблематично, а если и получится, то ценой ухудшения динамики, т.е., длительность нарастания сигнала будет никак не меньше 30 мкс.

Ясный пень, связываться с ним не буду и никому не советую.

Кстати, интересно посмотреть, как будет выглядеть АЧХ усилителя с таким транзистором. Поскольку и деформация АЧХ, и искажения фронта импульса – это проявления одного и того же дефекта – задержки фазы в цепи ООС, то на АЧХ мы должны увидеть горб, который располагается вблизи верхней частоты, после которой начинается спад характеристики.