

БАРК-001

Принципиальная схема

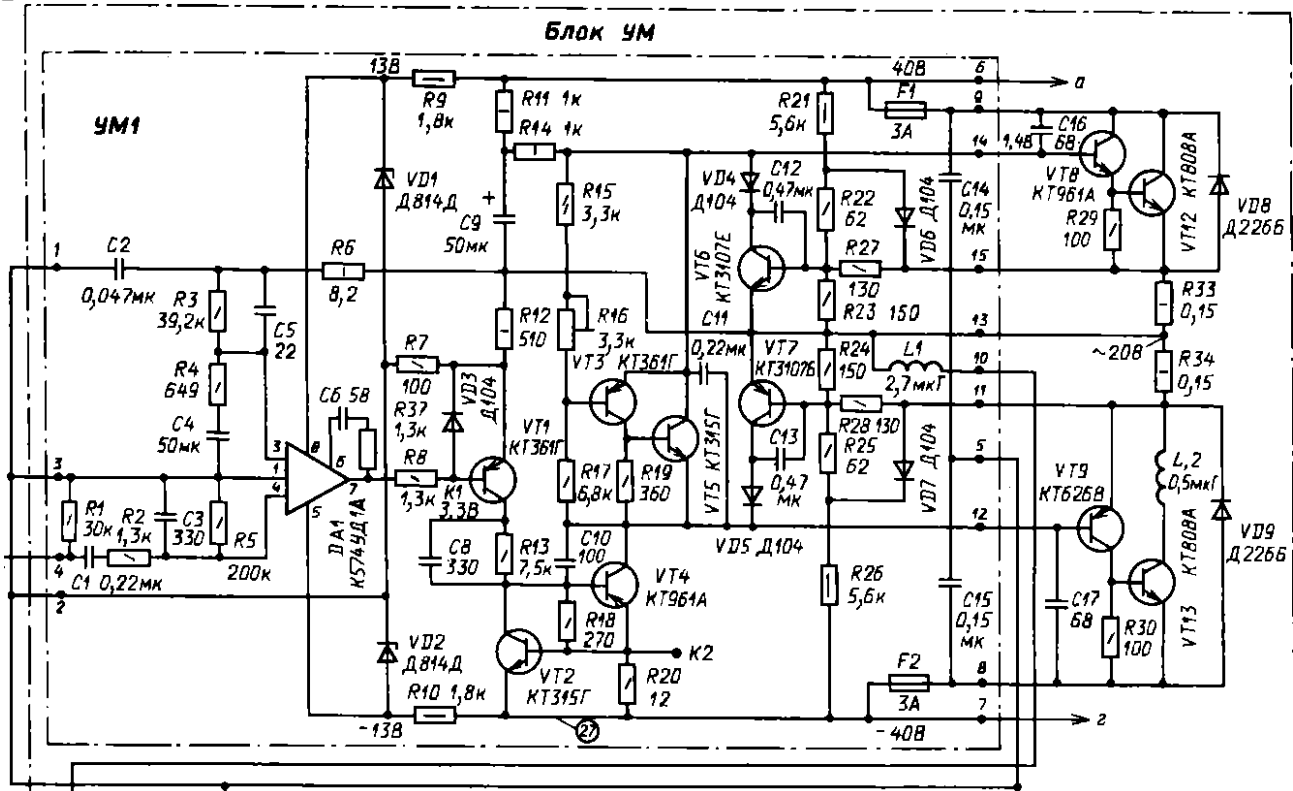


Рис. 1 Принципиальная схема усилителя мощности Барк-001

Структуру усилителя можно разбить на две части: операционный усилитель (ОУ) и усилитель на дискретных элементах (далее ДУ-дискретный усилитель). При первом взгляде на принципиальную схему возникают противоположные чувства: схема достаточно стандартная, но имеются некоторые особенности, которые вызывают, мягко говоря, недоумение. Я говорю об этом:

1. **Каскад на транзисторах VT2, VT4.** Сильно напоминает токовое зеркало. Вполне вероятно, что так и задумывалось, впрочем, обсуждать даже не берусь. А лучше попробую посчитать режимы.

Для того, чтобы отпереть транзистор VT2 необходимо на его базе обеспечить напряжение 0,6 В. Для этого ток резистора R20 должен быть $0,6 \text{ В} / 12 \text{ Ом} = 50 \text{ мА}$.

Ток через транзистор VT4 задаётся резисторами R11, R14 и считается как $40 \text{ В} / 2 \text{ кОм} = 20 \text{ мА}$.

Итого на базе VT2 получается $12 \text{ В} * 20 \text{ мА} = 0,24 \text{ В}$. Нужно ещё 0,36 В. Взять их можно только из коллектора VT1. И нужно $0,36 \text{ В} / 12 \text{ Ом} = 30 \text{ мА}$. А теперь 30 мА умножаем на 7,5 кОм (этот ток должен протекать по резистору R13) и получаем 225 В. Я чего-то не понимаю? Реально здесь течёт ток не более 4 мА (для отпираия VT4 необходим ток $0,6 \text{ В} / 270 \text{ Ом} = 2,2 \text{ мА}$, ну ещё плюс ток базы VT4), чего явно недостаточно для отпираия. Получается, что VT2 не отпирается из-за малого базового напряжения. А тогда смысл его установки?

2. **Резистор R11.** Его мощность рассеяния указана как 1 Вт. Предположим, на выходе установилось напряжение амплитудой -40 В (при оценке эффекта я округляю для упрощения). Тогда через конденсатор вольтодобавки C9 это напряжение передаётся в точку соединения R11, R14, и к R11 будет приложено напряжение 80 В, а ток через него достигнет 80 мА! Мгновенная мощность, которая выделится при этом, $P_m = 80 \text{ В} * 80 \text{ мА} = 6,4 \text{ Вт}$. Не много? Получается, что резистор будет работать с постоянным локальным перегревом.

Собстно, дефект не катастрофический, но разработчикам его стоило бы учесть.

3. **Интегрирующая цепь R6, C2.** Вот тут я шизею. Это некий удар по устойчивости усилителя. Поясняю. Лучше, наверно, если сделать это с помощью сим'а. Собираю вот такую схему.

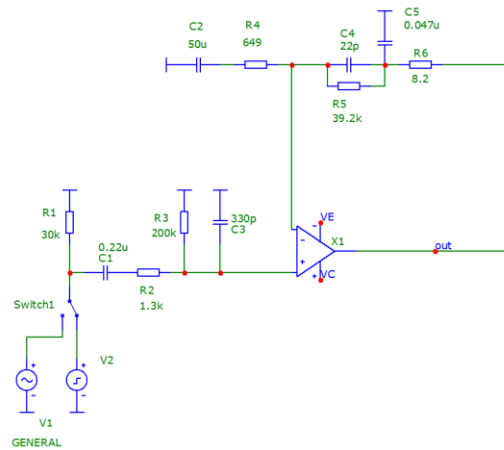


Рис. 2 Усилитель для проверки действия цепи ООС

С3 (это уже по схеме на рисунке) отключаю, чтобы не мешала. С4 и С5 буду подключать по очереди.

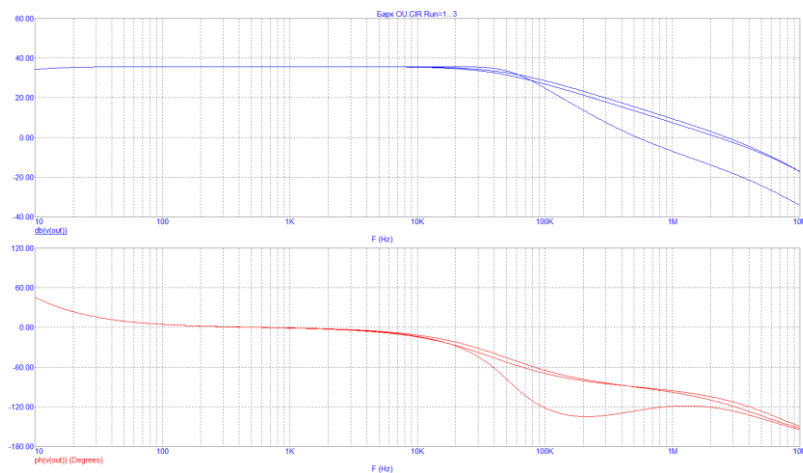


Рис. 3 СИМ усилителя

Что здесь? Верхняя картинка, синяя, – АЧХ, нижняя, красная, - ФЧХ. На каждой картинке три кривые: верхняя– это с отключёнными С4 и С5, средняя – подключена С4, нижняя - подключена дополнительно С5.

Больше всего интересует с подключённой С5. Как ни странно, относительно других кривых завал АЧХ выровнялся до примерно 40 кГц, но крутизна спада при этом резко увеличилась. Фазу резко кинуло вниз, и уже на частоте около 100 кГц её задержка приблизилась к критическим -180° . А усиление при этом осталось больше 1.

Смотрим ещё один метод оценки устойчивости. Анализ с помощью переходной характеристики.

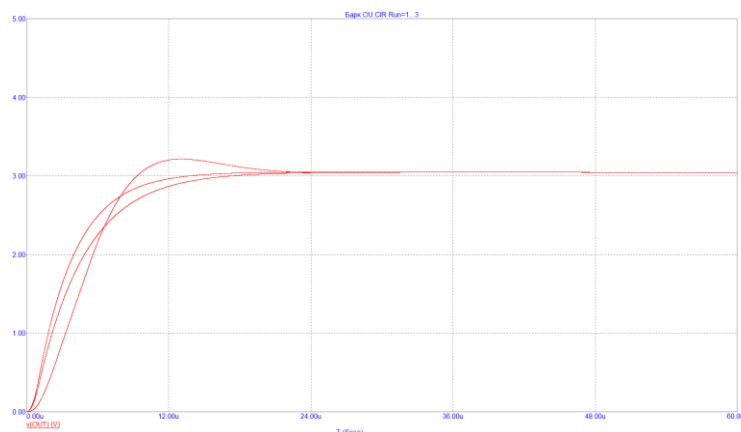


Рис. 4 Переходная характеристика

Здесь: средняя линия – отключены все ёмкости, нижняя линия – подключена C4, верхняя линия – дополнительно подключена C5.

Что происходит? Когда отключены все ёмкости, фронт выходного сигнала определяется собственными ёмкостями усилителя. При этом нарастание сигнала происходит по экспоненте, параметры которой задаются одним паразитным полюсом. Ёмкость C4 включена в цепь ООС и формирует второй полюс. Её действие обычно не критично, что и видно на картинке. Разве что уменьшился наклон начальной кривой, и отсюда увеличилось время установления сигнала.

А вот установка C5 кардинально меняет картинку. Во-первых, появился начальный «хвостик», т.е., задержка начального роста. Во-вторых, после окончания импульса появился выброс над установившимся значением. Наличие такого выброса свидетельствует о сильном влиянии второго полюса усилителя. В данном случае влияние мало, но в сочетании с другими паразитами может привести к неустойчивой работе. В-третьих, сам рост фронта уже мало похож на экспоненту. Он определяется совместным действием двух полюсов и представляет собой суперпозицию двух экспонент. Хорошо это или плохо – не знаю, но начальный звук, его резкие перепады, будет окрашиваться воздействием некоего дефекта усилителя.

А вот так будет выглядеть фронт импульса без C4, с одной C5.

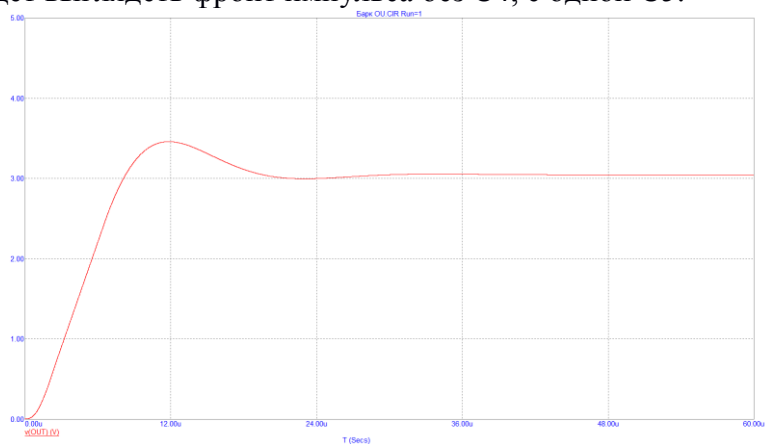


Рис. 5 Переходная характеристика с одной C5

Хорошо видно, что импульс подходит к полочке с переколебаниями. Такого вообще допускать категорически нельзя.

Итак, по данному пункту имеется вывод: установленная RC-цепь приводит к нарушению устойчивости усилителя и искажению его переходной характеристики. Сама по себе она оказывает малое влияние, однако в сочетании с другими дестабилизирующими факторами, коих тут предостаточно, может привести к неустойчивой работе и искажению звука.

4. Выходные транзисторы КТ808А. При внешней крутости (для тех лет) эти транзисторы обладают тремя весьма неприятными особенностями:

- постоянное допустимое напряжение коллектор-эмиттер, 120 В, нормируется при сопротивлении между базой и эмиттером 10 Ом,
- к-т передачи тока в схеме ОЭ находится в пределах от 10 до 50, типовое значение – всего 15,
- большое тепловое сопротивление переход-корпус $R_{\theta}=2\text{град/Вт}$.

Первая особенность возникает из-за того, что в усилителе в базах установлены резисторы в 10 раз больше нормируемых (100 Ом). Если на выходе будем работать с большими амплитудами, то между коллектором и эмиттером транзистора возможны напряжения, достигающие 80 В. А это влечёт за собой повышение неуправляемых токов из-за самоотпирания транзистора.

Вторая особенность влияет на предвыходные каскады. Им требуется повышенная мощность для раскачки выходных каскадов, что может привести к перегреву и выходу из строя. Здесь требуется отдельный расчёт.

Третья особенность не так очевидна, но именно она перечёркивает возможность применения этих транзисторов в схеме. Для иллюстрации сказанного рассчитаю величину рассеиваемой мощности на коллекторном переходе одного из транзисторов и связанный с ней перегрев.

Сначала буду рассматривать синусоидальный сигнал на нагрузке 4 Ом. Считать буду зависимость средней рассеиваемой мощности на коллекторе транзистора от амплитуды выходного сигнала. Поскольку транзистор работает в течение половины периода синуса, а вторую половину он заперт, то средняя рассеиваемая мощность подразумевается как *средняя за половину периода*.

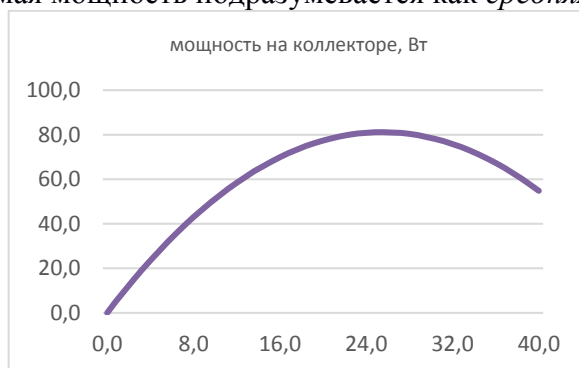


Рис. 6 Мощность на переходе транзистора

Ничего себе! За полпериода транзистор может рассеивать на коллекторе больше 80 Вт! Причём пик приходится совсем не на граничные режимы, а на самую что ни есть серединку, амплитуда в это время 26 В. Выходная мощность при этом 84 Вт. Это при максимальной 50!

Как ни странно, поскольку за вторую половину периода мощность на транзисторе не выделяется, то средняя рассеиваемая мощность за **полный** период будет равна 40 Вт, что не противоречит требованиям к транзистору. Даже запас имеется. Видимо, разработчики так и подумали.

А вот так будет выглядеть его перегрев

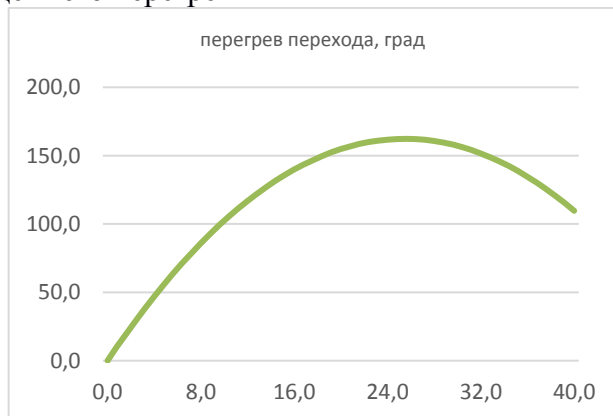


Рис. 7 Перегрев перехода транзистора

Ну да, перегрев 160 градусов, и это ещё при нормальных внешних условиях, 25⁰ по Цельсию. А что будет, если радиаторы нагреются? А допустимая температура перехода для КТ808А всего 150 градусов... Надеюсь, не надо объяснять, к чему приводит такой перегрев? Тут и повышенные тепловые искажения, и сгорание транзисторов от перегрева.

Кстати, про искажения. Посмотрим, когда можно ждать их появление. Для этого продолжаем анализировать синус, но смотреть будем мгновенный разогрев перехода транзистора. Ну как бы считаем, что мгновенная мощность, равная произведению тока на напряжение разогревает переход. Если в какой-то момент температура перехода достигла пика, то в следующий момент переход начинает остывать.

Расчёт опять получается в течение полупериода. Во второй полупериод транзистор заперт.

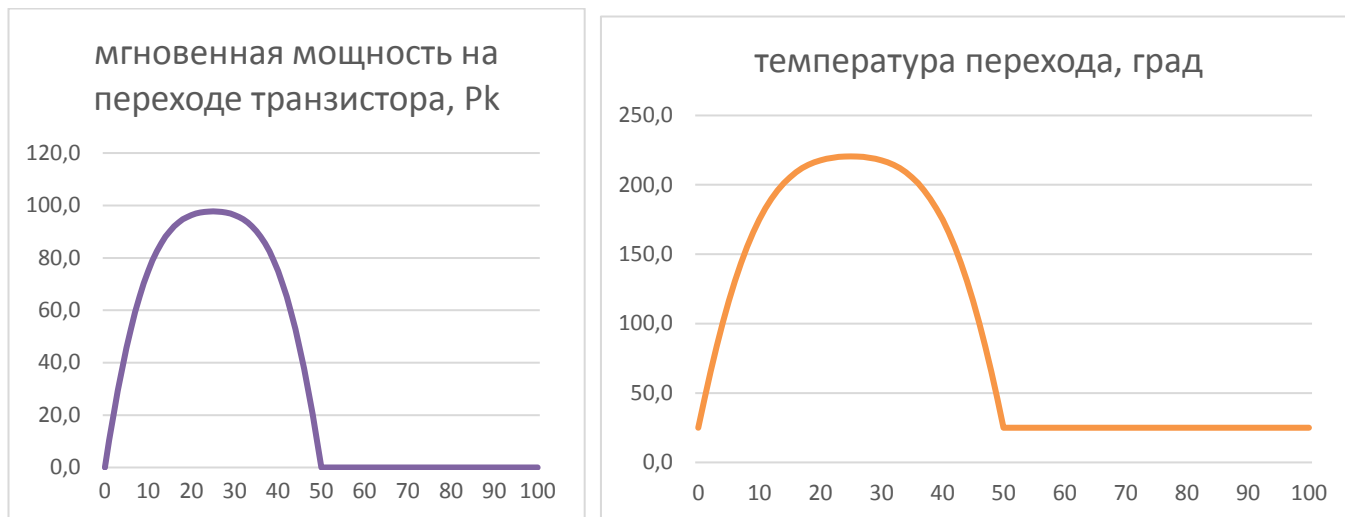


Рис. 8 Мгновенная мощность при критической амплитуде

В отличие от средней мощности мгновенная мощность выделяется в течение периода колебания в каждый момент времени. Как видим, величина мгновенной выделяемой мощности приближается к 100 Вт, а перегрев перехода достигает 220 градусов. Ну это уже не лезет ни в какие ворота! Причём начало такого экстремального перегрева начинается около 20 В амплитуды. То есть, даже при работе с относительно малыми сигналами мы катастрофически перегреваем транзисторы.

Для иллюстрации приведу расчёт, когда температура перехода приближается к критической 150° .

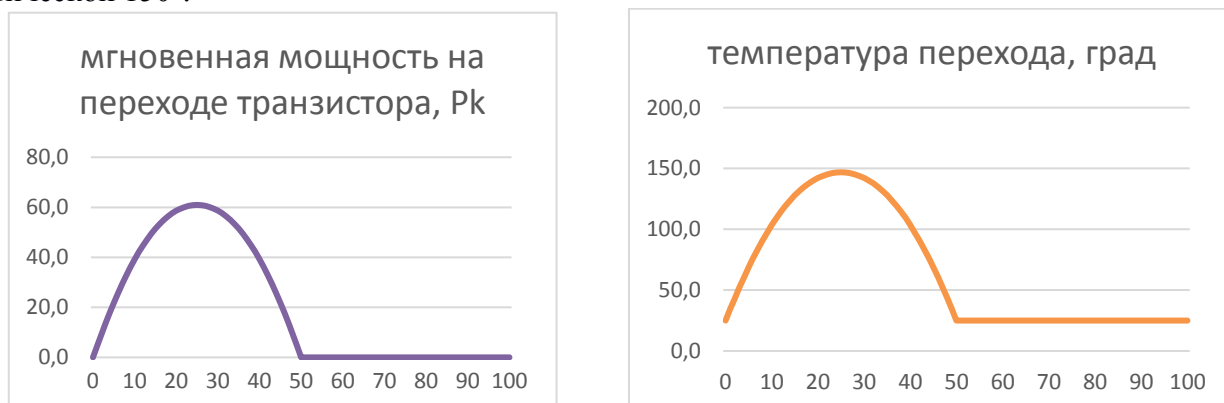


Рис. 9 Мгновенная мощность на переходе транзистора при амплитуде выходного напряжения 7,5 Вольт

Как видим, рассеиваемая мощность подбирается к 60 ваттам. В этом случае температура перехода приближается к запрещённым 150 град. При этом выходная мощность всего 7 Ватт.

И ещё один пример, когда рассеиваемая мощность превышает некую критическую.

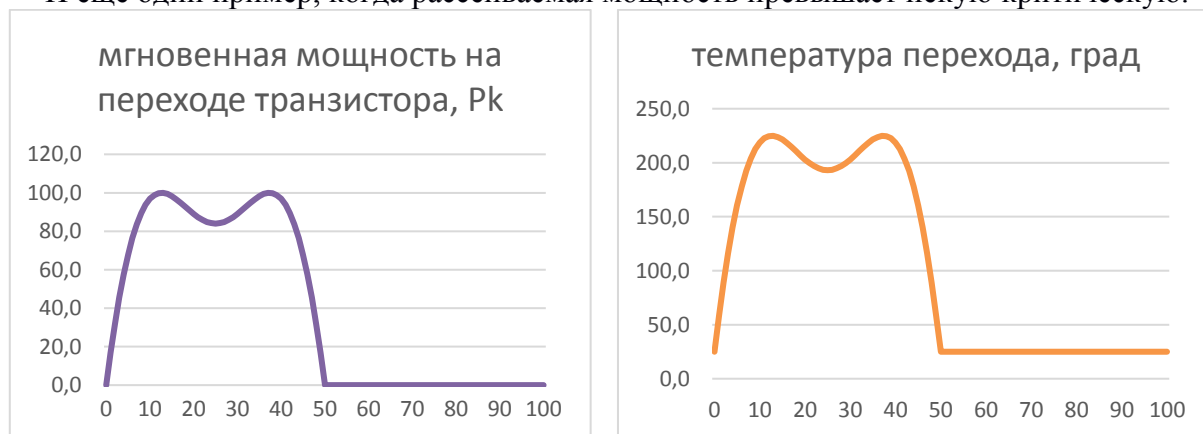


Рис. 10 Мгновенная мощность на переходе транзистора при амплитуде выходного напряжения 28 Вольт

Здесь скажу только, что при превышении критической мощности (Рис.8) на графике температуры появляются два пика, которые с ростом мощности расходятся в стороны. Амплитуда при этом остаётся постоянной.

Такое дефективное поведение усилителя, связанное с перегревом транзисторов, возникло из-за выбора высокого, относительно, напряжения питания.

Вывод однозначный: эти транзисторы в данной схеме использовать категорически нельзя. Разработчики хотя и заложили в схему достаточно крутые транзисторы, но их крутизны совершенно недостаточно для обеспечения работы усилителя. Причём, исправить положение не получится даже установкой дополнительной пары транзисторов в параллель. Впрочем, эти ограничения можно легко снять заменой на современные транзисторы, например, 5200, даже по одному в плечо.

Ну и ещё можно было бы провести такой же расчёт и для предвыходных драйверов. Но не буду, потому как даже и без расчётов ясно, что они имеют те же проблемы.