

О динамических искажениях в транзисторных усилителях НЧ

Написал П. Зуев, вторник, 23 Сентябрь 2003 г.

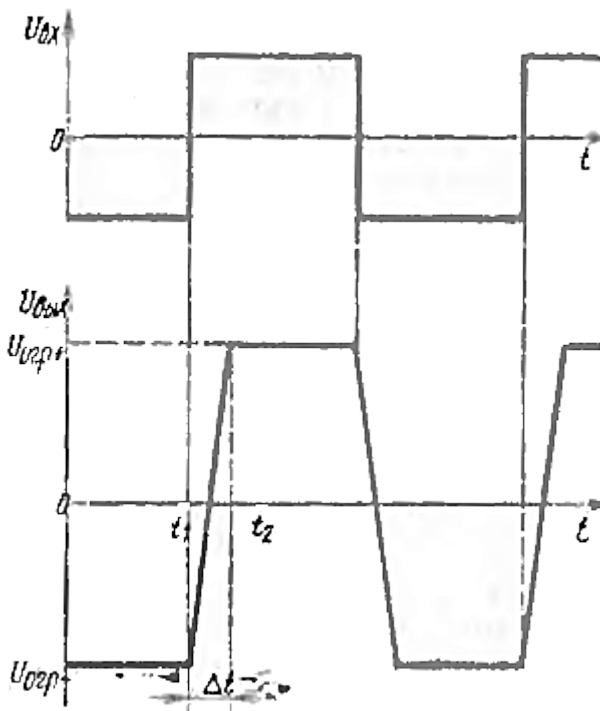


Рис. 1

Отрицательная обратная связь (ООС) резко снижает нелинейные искажения в усилителях НЧ, но, к сожалению, приводит к необходимости повышать их устойчивость введением частотной коррекции [2]. В скорректированном же усилителе из-за недостаточно высокой частоты среза самого низкочастотного каскада усилителя НЧ нередко появляются динамические искажения [1]. Этот тип искажений известен в теории и практике применения операционных усилителей и связан с ограничением скорости нарастания выходного напряжения усилителя, охваченного глубокой ООС (3, 4). Ограничение скорости нарастания характерно не только для операционных усилителей, но и для любого усилителя, охваченного глубокой ООС. Действительно, если на вход такого усилителя подать перепад напряжения с крутым фронтом, то его выходное напряжение не сможет повторить по форме входное, а будет изменяться с конечной скоростью нарастания,

предельной для усилителя.

На рис. 1 показаны поступающие на вход усилителя прямоугольные импульсы с крутыми фронтами и амплитудой, переводящей усилитель в режим, близкий к ограничению положительной и отрицательной полувольты выходного сигнала. Очевидно, что предельная скорость нарастания выходного напряжения $S_{пр}$ равна:

$$S_{пр} = \frac{U_{орп+} - U_{орп-}}{t_2 - t_1}.$$

Обычно в усилителях НЧ амплитуды напряжений в режиме ограничения равны, поэтому предыдущую формулу можно записать иначе:

$$S_{пр} = \frac{2U_{орп}}{\Delta t},$$

где Δt - время перехода усилителя из режима ограничения одной полувольты сигнала в режим ограничения другой полувольты.

Если на вход усилителя подать синусоидальный сигнал и постепенно увеличивать его частоту, то искажения будут отсутствовать только до тех пор, пока скорость нарастания выходного напряжения не достигнет предельного значения $S_{пр}$.

Для синусоидального сигнала амплитудой U_m и частотой f максимальная скорость

нарастания равна

$$S'_{\text{пр}} = 2\pi f U_m$$

Отсюда нетрудно найти предельную частоту $f_{\text{пр}}$ синусоидального сигнала, который может быть усилен без динамических искажений:

$$f_{\text{пр}} = S'_{\text{пр}} / 2\pi U_m \approx 0,16 S'_{\text{пр}} / U_m$$

Интересно отметить, что частота $f_{\text{пр}}$ зависит от амплитуды U_m усиливаемого синусоидального сигнала и при ее повышении уменьшается.

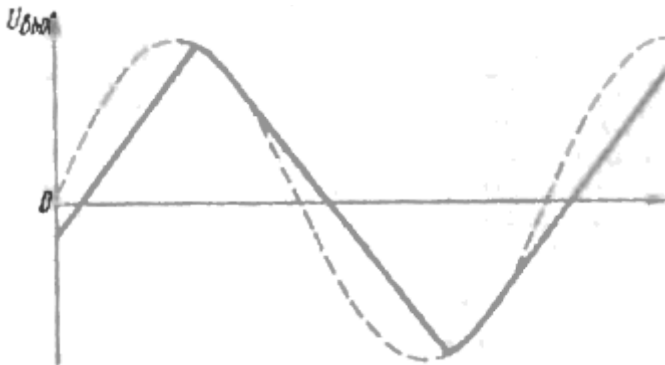


Рис. 2

Характерный вид сигнала с динамическими искажениями показан на рис. 2 (неискаженный сигнал изображен штриховой линией).

Каковы же критерии отсутствия динамических искажений в усилителях НЧ?

Известно, что сигнал реальной музыкальной программы практически не содержит составляющих частотой выше 20

кГц, а предельная амплитуда $U_{\text{огр}}$ выходного сигнала усилителя НЧ ограничена напряжением питания. Очевидно, что самым худшим с точки зрения проявления динамических искажений будет случай, когда усиленный сигнал имеет предельную амплитуду $U_{\text{огр}}$ на верхней рабочей частоте $f_{\text{в}}$, равной 20 кГц. Для отсутствия динамических искажений при воспроизведении любой музыкальной программы предельная скорость нарастания $S_{\text{пр}}$ усилителя НЧ должна быть не менее

$$S_{\text{пр}} \geq 2\pi f_{\text{в}} U_{\text{огр}} \approx 1,25 \cdot 10^3 U_{\text{огр}}$$

Поскольку при усилении синусоидальных сигналов динамические искажения проявляются в виде искажений формы синусоиды, их можно нормировать, как и обычные нелинейные искажения, коэффициентом гармоник. Эти измерения необходимо производить на нескольких высоких частотах рабочего диапазона (включая частоту 20 кГц) при выходной мощности, близкой к максимальной (например, на уровне -3 дБ от максимальной).

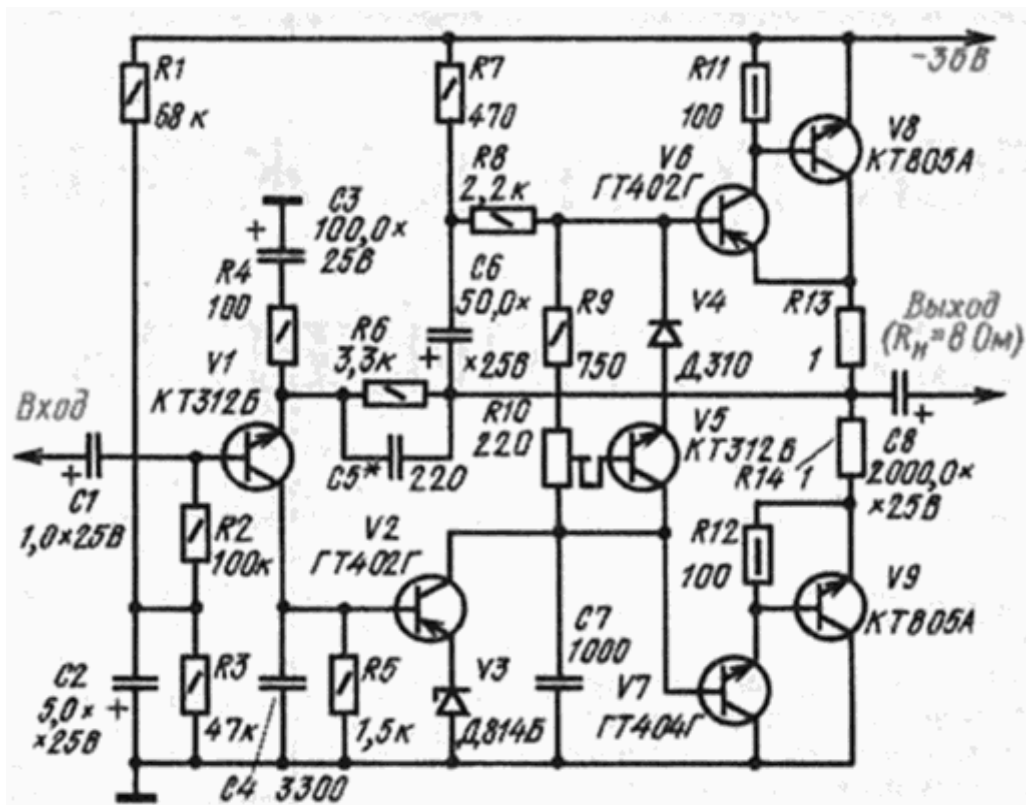
Рассмотрим возможности уменьшения нелинейных искажений при отсутствии динамических искажений.

Как известно, необходимая глубина A отрицательной обратной связи (ООС), обеспечивающая приемлемые нелинейные искажения, зависит от схемы усилителя НЧ и практически составляет 30...60 дБ.

С другой стороны, как показано в литературе [2], для отсутствия динамических искажений частота среза f_1 самого низкочастотного каскада усилителя НЧ должна быть не менее 20 кГц. В этом случае для обеспечения устойчивости усилителя (с запасом по фазе около 45°) при использовании простейшей

$$\underline{f_2 \geq A f_1 = (30 \dots 1000) \cdot 20 \text{ кГц} = 0,6 \dots 20 \text{ МГц.}}$$

Противоречие между необходимостью снижения нелинейных искажений, с одной стороны, и динамических искажений, с другой, можно устранить применением так называемой оптимальной частотной коррекции, сочетающей коррекцию как на отставание, так и на опережение по фазе [3].



Возможность реализации оптимальной коррекции основана на том, что устойчивость усилителя, охваченного ООС, определяется наклоном его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на диаграмме Бode в той ее области, где глубина ООС уменьшается до 0 дБ, причем этот наклон должен быть около 20 дБ на декаду. На более низких частотах допустим наклон АЧХ до 40 дБ на декаду запаса по фазе [3].

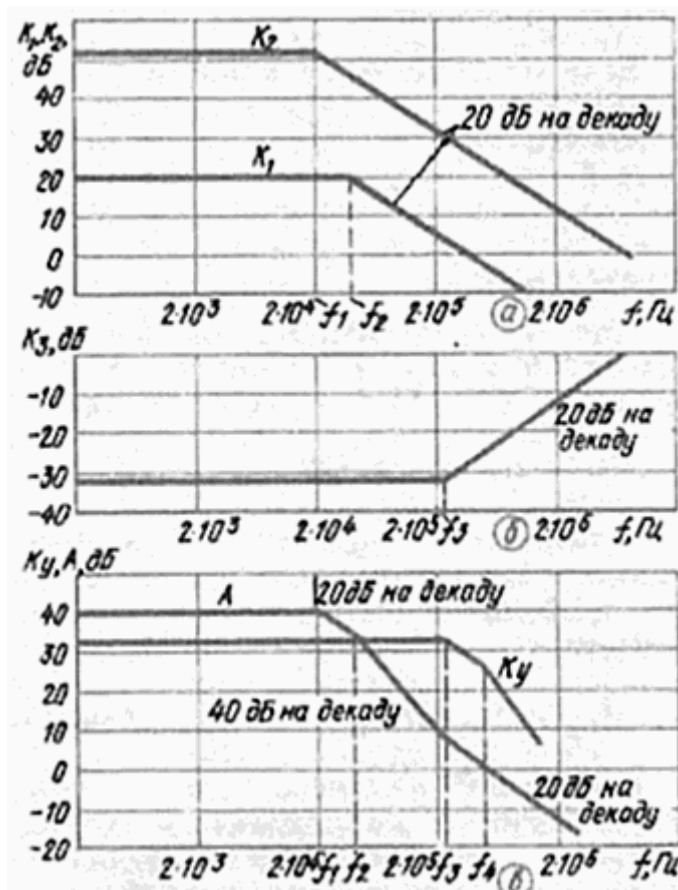


Рис. 3

низкочастотный ($f_{гр} = 15...50$ кГц), то конденсатор С4 может отсутствовать, а частота среза f_2 фактически будет определяться граничной частотой коэффициента передачи тока и сопротивлением резистора R5.

Частота среза f_3 (коррекция на опережение по фазе) определяется постоянной времени цепочки R6C5 в цепи ООС усилителя, Емкость конденсатора С5 подбирают при налаживании по отсутствию самовозбуждения усилителя НЧ.

Как видно из характеристик усилителя, глубина ООС выбрана равной 40 дБ, а частоты среза f_1 , f_2 , f_3 -соответственно 20, 40 и 220 кГц. Частота f_4 , на которой глубина ООС уменьшается до 0 дБ, равна 400 кГц при запасе по фазе около 60° , что значительно облегчает получение гарантированной устойчивости усилителя НЧ. Верхняя граница рабочего диапазона частот усилителя в режиме малого сигнала практически совпадает с частотой среза цепи ООС (220 кГц).

Из диаграмм также видно, что цепочка R6C5 частотной коррекции на опережение уменьшает наклон АЧХ глубины ООС (А) до 20 дБ на декаду на частотах выше 220 кГц, что и повышает устойчивость усилителя НЧ.

Необходимо отметить, что приведенные данные получены при использовании транзистора V2 со статическим коэффициентом передачи тока $h_{21Э}$, равным 150. При применении транзистора с меньшим значением этого параметра несколько уменьшится глубина ООС.

На рис. 3 для примера показана схема усилителя НЧ с оптимальной частотной коррекцией, а на рис. 4 - его диаграммы Бode (а - АЧХ каскадов на транзисторах V1 - K1 и V2 - K2; б - АЧХ цепи ООС R4R6C5; в - АЧХ глубины ООС - А - и всего усилителя, охваченного ООС, - K_y). Частоты среза f_1 и f_2 в усилителе НЧ должны выбираться в пределах 20...50 кГц. Выбор частоты f_3 зависит от глубины ООС в усилителе и частот f_1 , f_2 : практически она может быть в , пределах 100...500 кГц. В рассматриваемом усилителе частота среза f_1 определяется выходным сопротивлением каскада на транзисторе V2, входными сопротивлением и емкостью оконечного каскада, а также емкостью корректирующего конденсатора С7. Частота среза f_2 зависит от входного сопротивления каскада на транзисторе V2, граничной частоты коэффициента передачи тока $f_{гр}$ этого транзистора и емкости корректирующего конденсатора С4. Если транзистор V2 —

Испытания усилителя показали, что его коэффициент гармоник, измеренный при выходной мощности 0,05; 1 и 8 Вт на нагрузке 8 Ом, не превышает 0,2% даже в том случае, если произведения статических коэффициентов передачи тока транзисторов V6, V8 и V7. V9 различаются в 4 раза. В то же время усилитель воспроизводит без динамических искажений синусоидальный сигнал частотой 25 кГц при выходной мощности 9 Вт, что близко к его максимальной мощности, равной 10 Вт.

Таким образом, применяя в транзисторных усилителях НЧ оптимальную частотную коррекцию и рационально выбирая частоты среза корректирующих цепей, можно получить очень малый коэффициент гармоник при отсутствии динамических искажений и сохранении устойчивости усилителя.

В заключение следует отметить необходимость ограничения полосы пропускания со стороны высших частот в предварительном усилителе. Дело в том, что сигнал, поданный на вход усилителя НЧ, иногда содержит помехи, частота которых значительно превышает 20 кГц. Примером может быть сигнал с выхода детектора АМ радиоприемника, который иногда содержит составляющие недостаточно отфильтрованной промежуточной частоты 465 кГц. Несмотря на относительную малость амплитуды такой помехи, скорость нарастания входного напряжения может превысить допустимый для усилителя НЧ предел, и его входной каскад перегрузится, что приведет к заметным на слух искажениям усиливаемого низкочастотного сигнала. Поэтому полосу пропускания предварительного усилителя необходимо ограничивать до 30...50 кГц, применяя, например, пассивные RC-фильтры нижних частот.

Для оценки качественных показателей транзисторных усилителей НЧ можно рекомендовать следующие параметры: рабочий диапазон частот при выходной мощности, близкой к максимальной (при нормированном уровне коэффициента гармоник), и зависимость коэффициента гармоник от выходного напряжения усилителя и выходной мощности, снятую на нескольких частотах рабочего диапазона, включая частоту 20 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров А.. Динамические искажения в транзисторных усилителях НЧ.- «Радио», 1976, № 4. с. 41, 42.
2. Майоров А. Еще раз о динамических искажениях в транзисторных усилителях. - «Радио», 1977, № 5. с. 45—47.
3. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с фр. Л., «Энергия», 1974.
4. Проектирование и применение операционных усилителей. Под ред. Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. М., «Мир», 1974.
5. Гальперин М. и др. Транзисторные усилители постоянного тока. М., «Энергия». 1972.

Радио № 8, 1978г.