

Глубокая ООС и динамические искажения в УМЗЧ

Е. Пашигоров, 4 августа 2012

Прежде всего следует определиться, что понимать под термином «динамические искажения», поскольку многие авторы трактуют этот термин по-разному, зачастую смешивая в нем совершенно разные виды искажений [1-2].

В данной статье речь идет только об искажениях, связанных с перегрузкой на высоких частотах промежуточных каскадов усилителя вследствие наличия в нем глубокой отрицательной обратной связи (ООС).

Теория.

Рассмотрим усилитель из двух каскадов, первый из которых безынерционный (то есть, имеющий бесконечную полосу пропускания) с коэффициентом передачи K_1 , а второй — инерционный с коэффициентом передачи $\frac{K_2}{1+i\omega\tau}$, где ω — круговая частота, а τ — постоянная времени второго каскада.

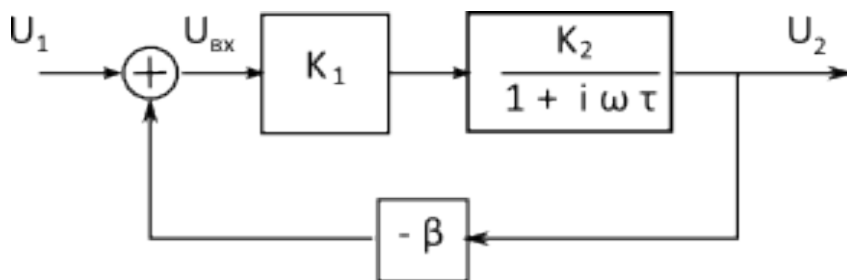


Рис. 1

Функция передачи исходного усилителя без ООС

$$K = \frac{K_1 K_2}{1 + i\omega\tau} \quad (1).$$

Охватим исходный усилитель безынерционной отрицательной обратной связью с коэффициентом передачи $-\beta$.

Наша цель — нахождение функции передачи первого и второго каскадов после включения ООС.

Как известно, для коэффициента передачи усилителя с ООС справедливо выражение

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + \beta K}.$$

Подставляя в него (1), получим коэффициент передачи нашего усилителя с ООС:

$$K_{oc} = \frac{K_1 K_2}{1 + \beta K_1 K_2 + i\omega\tau} \quad (2).$$

Для функции передачи на вход первого каскада справедливо выражение

$$K_{BX} = \frac{1}{1 + \beta K} .$$

Подставляя в него (1), имеем:

$$K_{BX} = \frac{1 + i \omega \tau}{1 + \beta K_1 K_2 + i \omega \tau} . (3)$$

Ясно, что коэффициент передачи первого каскада получится $K_{БЫХ1} = K_{BX} K_1$, то есть

$$K_{БЫХ1} = K_1 \frac{1 + i \omega \tau}{1 + \beta K_1 K_2 + i \omega \tau} \quad (4),$$

а коэффициент передачи второго каскада совпадает с (2).

А теперь внимательно посмотрим на выражение (3). При возрастании частоты от 0 до бесконечности коэффициент передачи на вход первого каскада K_{BX} возрастает от величины $\frac{1}{1 + \beta K_1 K_2}$ до 1, то есть увеличивается в $1 + \beta K_1 K_2$ раз (а это и есть глубина ООС). Соответственно пропорционально возрастает и коэффициент передачи первого каскада.

Другими словами, с ростом частоты входное напряжение первого каскада U_{BX} растет, и на достаточно высоких частотах достигает амплитуды входного сигнала U_1 .

Если входной каскад не рассчитан на такое входное напряжение, он может перегрузиться.

А коэффициент передачи второго каскада с ростом частоты уменьшается (2), следовательно напряжение на выходе второго каскада не возрастает, так что для него опасности перегрузки нет.

Вывод: в усилителях с ООС имеется опасность перегрузки каскадов, стоящих перед инерционным каскадом. Когда такая перегрузка наступает — возникают динамические искажения.

Модель.

Для иллюстрации полученных результатов собрана (в MicroCap9) модель двухкаскадного усилителя, состоящая из безынерционного каскада с коэффициентом передачи $K_1 = 100$, и инерционного каскада с коэффициентом передачи $K_2 = \frac{-10}{1 + i \omega \tau}$. Частота среза инерционного звена выбрана около 100

Гц. Составленный из этих двух каскадов инвертирующий усилитель охвачен 100% ООС через резисторы R2, R3 (рис. 2).

После охвата всего усилителя ООС глубиной 60 дБ его частота среза возрастает до 10 кГц.

Вот что получается на выходе при подаче на вход синусоидального сигнала

амплитудой 1 В и частотой 1 кГц (рис. 3):

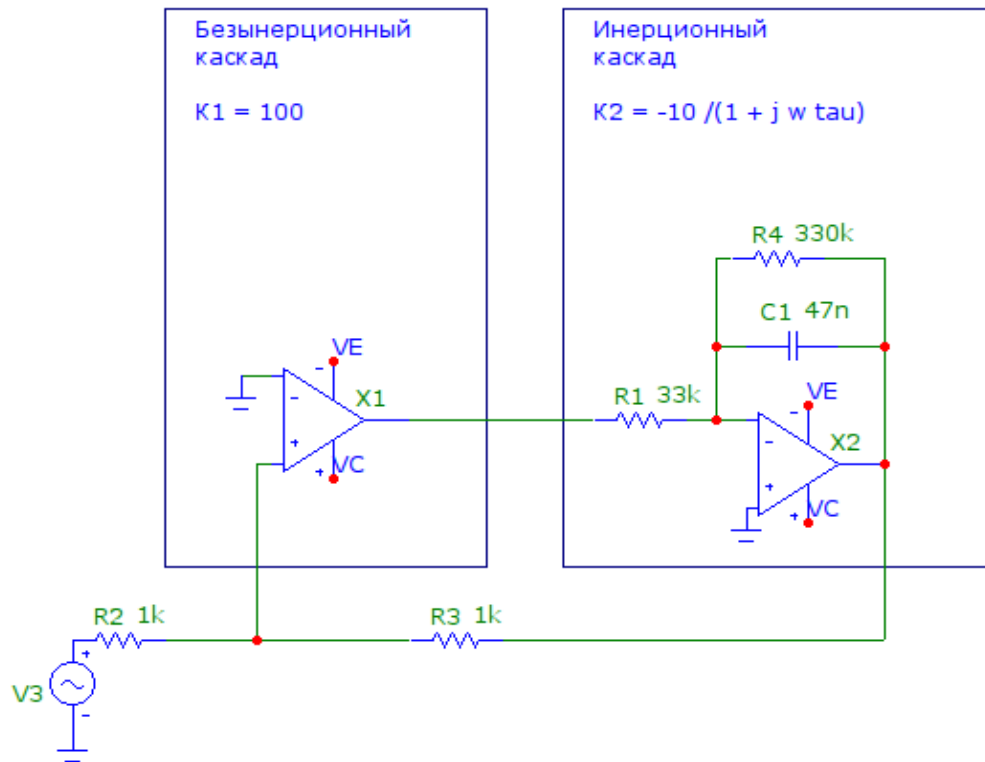


Рис. 2

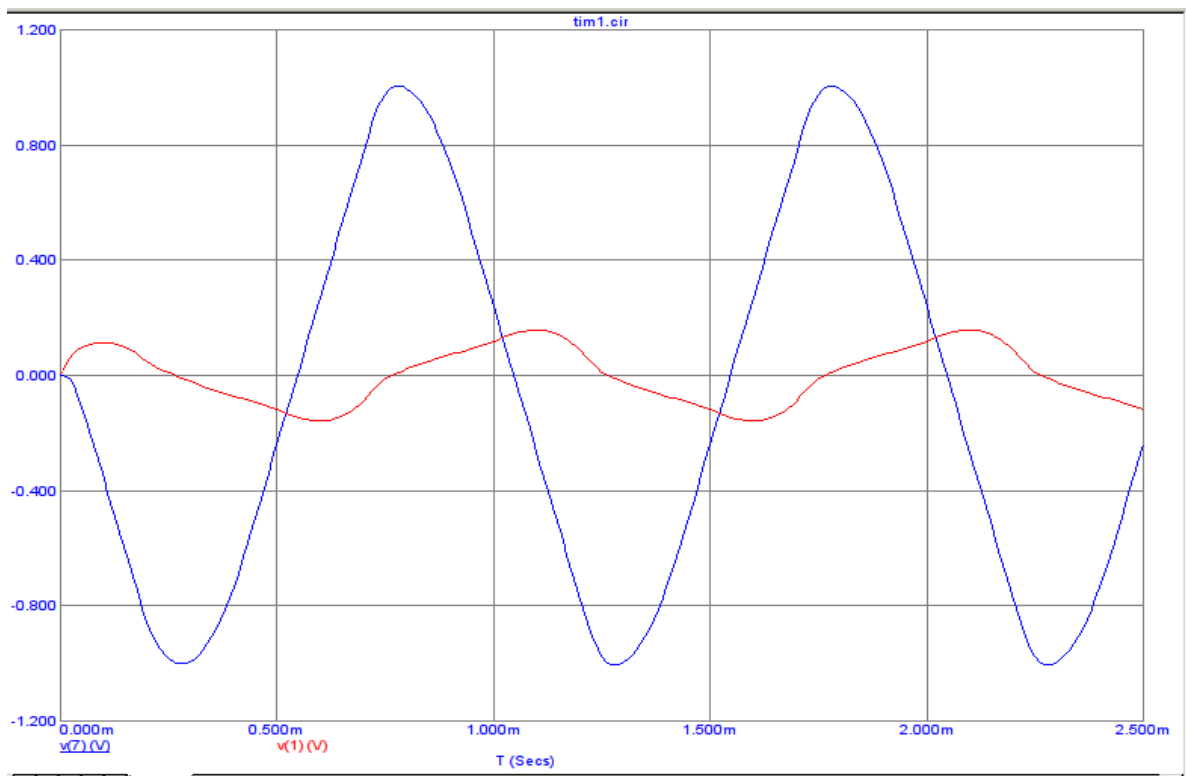


рис. 3

(Синий график — выходной сигнал, красный — напряжение в точке суммирования ООС).

На выходе не синус, а скорее треугольник. Это и есть динамические искажения — следствие перегрузки входным напряжением первого каскада. Он перегрузился и ограничивает свой выходной сигнал, который становится ближе к прямоугольному. Прямоугольник интегрируется вторым, инерционным каскадом, и на выходе получается напряжение, похожее на треугольное (чем выше степень перегрузки, тем ближе к треугольнику).

Теперь поменяем каскады местами, чтобы инерционным стал первый каскад (рис. 4). При этом все параметры усилителя практически не изменяются (по сравнению с первым вариантом).

Для пущего эффекта мы подали ему на вход сигнал в четыре раза больше, но на выходе все в порядке, чистый синус, динамических искажений нет (рис. 5).

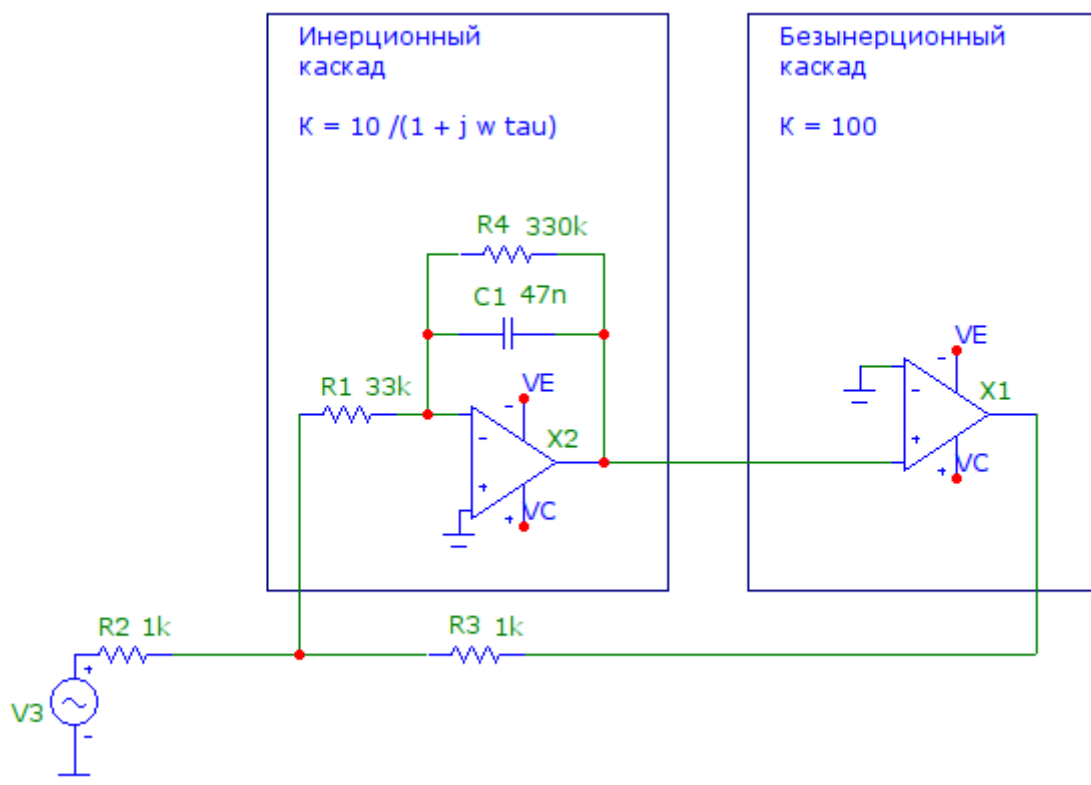


Рис. 4

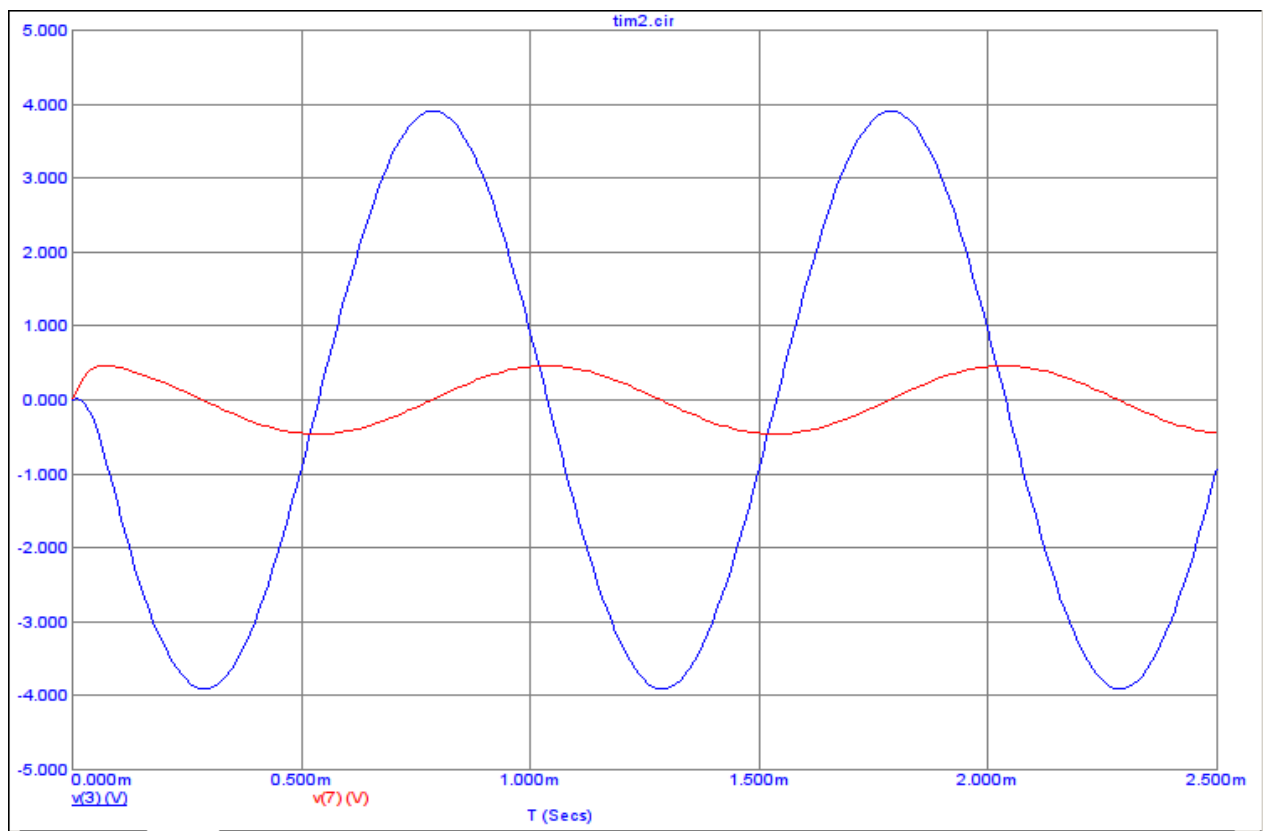


Рис. 5

Нетрудно убедиться, что в данном усилителе динамические искажения не возникают ни на каких частотах.

То есть, имеем два практически идентичных усилителя, только в одном динамические искажения есть, а в другом их нет.

Выводы.

Глубина ООС в УМЗЧ может достигать 60 дБ и более. Таков же получается и диапазон изменения напряжения на входе и выходе первого каскада (при условии, что инерционным является второй каскад).

1. В многокаскадных усилителях с глубокой ООС имеется немалая вероятность перегрузки каскадов, находящихся перед инерционным каскадом (определяющим первый полюс АЧХ). Во время перегрузки каскада и возникают динамические искажения.

Вероятность динамических искажений тем выше, чем больше глубина ООС. Здесь я затрудняюсь с формулировкой. С одной стороны, перегрузка входного/промежуточного каскада вроде бы указывает на недостаток проектировки, но с другой стороны, стремление получить возможно более глубокую ООС заставляет повышать коэффициент усиления каждого каскада насколько возможно, а большое усиление способствует перегрузке с увеличением сигнала.

Проблему полностью снимает однокаскадный УМЗЧ. В усилителях с одним каскадом усиления напряжения [3] динамические искажения невозможны по определению. Даже если наш единственный каскад и перегрузится, все равно это будет одновременно и ограничение по выходу.

2. Если инерционным каскадом усилителя является первый каскад, то в усилителе динамические искажения не возникают при любой глубине ООС. Проектируя усилитель с частотной коррекцией в первом каскаде, мы с гарантией избегаем динамических искажений. (Коррекция обязательно должна охватывать вход первого каскада, чтобы он не мог перегрузиться и по входу).
3. Можно сформулировать и более сложное условие. Для отсутствия динамических искажений необходимо, чтобы в усилителе с разомкнутой цепью ООС ограничение наступало вначале в выходном каскаде, потом в предвыходном и так далее до входного каскада. То есть, на максимальной рабочей частоте последующие каскады должны перегружаться раньше предыдущих (или одновременно).

Действительно, если это условие выполнено, то возникновение перегрузки в любом промежуточном каскаде означает, что выходной каскад тоже перегрузился. А это уже не динамические искажения, а обычный клиппинг.

Неплохой профилактической мерой можно считать ФНЧ хотя бы первого порядка, включенный на входе УМЗЧ и срезающий частоты выше звуковых, так как при наличии во входном сигнале высокочастотных составляющих вероятность появления динамических искажений увеличивается (но лучше проектировать так, чтобы их не было совсем).

Проверка наличия динамических искажений.

Динамические искажения можно обнаружить на синусоидальном входном сигнале, контролируя форму выходного сигнала на максимальной рабочей частоте и максимальной амплитуде. При возникновении перегрузки в промежуточных каскадах выходной сигнал становится треугольным, а не синусоидальным.

Рассмотрев схемы многих УМЗЧ, можно заметить, что частотная коррекция по запаздыванию, необходимая для сохранения устойчивости усилителя (как раз формирующая первый полюс АЧХ), вводится во втором каскаде. Тем самым создаются благоприятные условия для возникновения динамических искажений.

Наверное, следует обратить внимание и на схемотехнику предварительных усилителей, регуляторов тембра, фильтров и т. д., собранных на основе ОУ, поскольку в них глубина ООС заведомо велика, а частотная коррекция в ОУ стандартно применяется во втором каскаде.

То есть, применяемые в звуковоспроизведении каскады усиления на ОУ неплохо было бы проверять на динамические искажения простым синусоидальным сигналом, как описано выше.

Литература.

1. «Динамические искажения в транзисторных усилителях НЧ», А.Майоров. "Радио" №4, 1976 "Радио" №5, 1977.
2. «О динамических искажениях в транзисторных усилителях НЧ», П. Зуев.

«Радио» №8, 1978.

3. «УМЗЧ с однокаскадным усилением напряжения», А. Орлов, «Радио» №12, 1997.
4. К сожалению, ссылка на журнал «Радиотехника», в котором я и прочитал данную статью, мною утеряна за давностью лет. Чтобы ее найти, необходимо просмотреть хотя бы содержание журналов «Радиотехника» примерно с 1978 по 1984 годы... Увы, пока такая возможность не представилась.