



Усилитель с ТОС С. Лозицкого и его доработка

Александр Петров, г. Минск

Подавляющее большинство транзисторных усилителей звуковой частоты выполнено с обратной связью по напряжению. Усилителям с токовой обратной связью (ТОС), на мой взгляд, незаслуженно уделяется недостаточно внимания.

В качестве исключения в журнале «Радио» можно найти несколько публикаций относительно простых усилителей И. Акулиничева, а также усилитель В. Короля [1].

В 2003 году был опубликован УМЗЧ с токовой обратной связью выполненный по классической схеме **рис. 1** [2]. Автором были проведены исследования параметров усилителя с разными конденсаторами коррекции $C7$ от 51 до 470 пФ, при этом запас устойчивости был от 70 до 88 градусов. При выходной мощности 50 Вт на нагрузке 4 Ома на частоте 10 кГц искажения не превышали 0.003%.

Проведем более детальные исследования этого усилителя с помощью программного моделирования. Для начала снимем график петлевого усиления, **рис. 2**.

Первый полюс на частоте 8 кГц, петлевое усиление на частоте 20 кГц равно 45 дБ, запас по фазе 83 градуса.

При токе покоя 130 мА и выходной мощности 50 Вт искажения на частоте 10 кГц составили 0.005%. Это несколько больше, чем заявлено автором. Это не первый случай, когда искажения реального усилителя меньше чем его модели. Известно, что нелинейные искажения слабо ха-



рактеризуют качество звукоусиления, так как их измерение проводится на монотонусоидальном сигнале (каковым музыкальный сигнал не является) к тому же в установившемся режиме работы УМЗЧ. Поэтому проведем дополнительные исследования на интермодуляционные искажения (ИМИ) для более полного представления о параметрах усилителя. График интермодуляционных искажений показан на **рис. 3**.

Уровень ИМИ первого порядка частотой 1 кГц равен 0.15 мВ или 0.0005% от амплитуды сигнала. Уровень шумовой подставки в полосе звуковых частот составляет примерно 60 мкВ.

Последнее время большое внимание стали уделять скорости нарастания выходного напряжения считая, что для качественного звуковоспроизведения она должна быть с многократным запасом. Измерим этот параметр данного усилителя импульсным методом, **рис. 4**. В отличие от

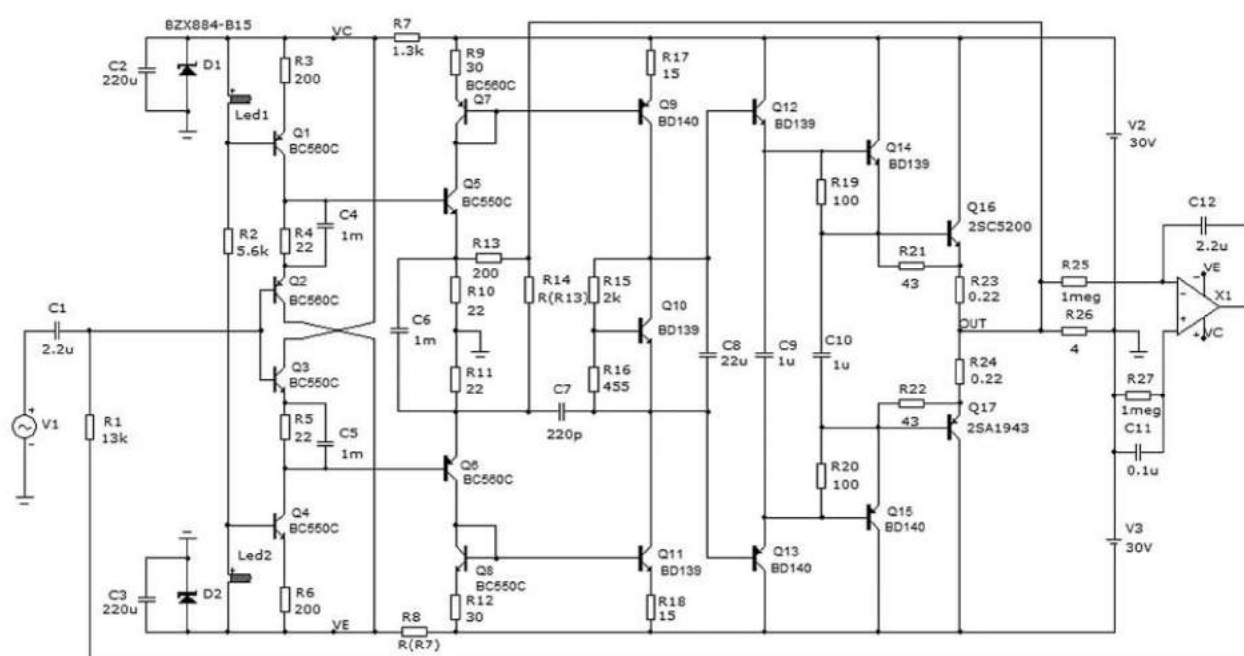


Рис. 1

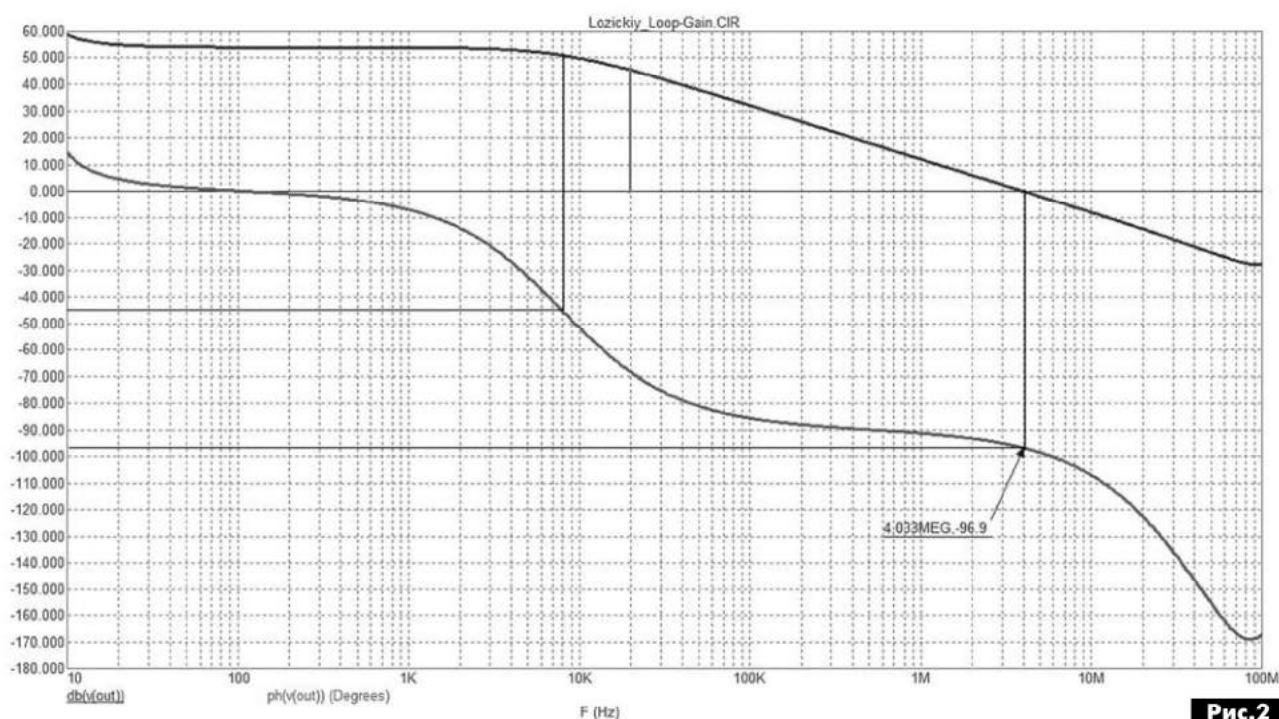


Рис.2

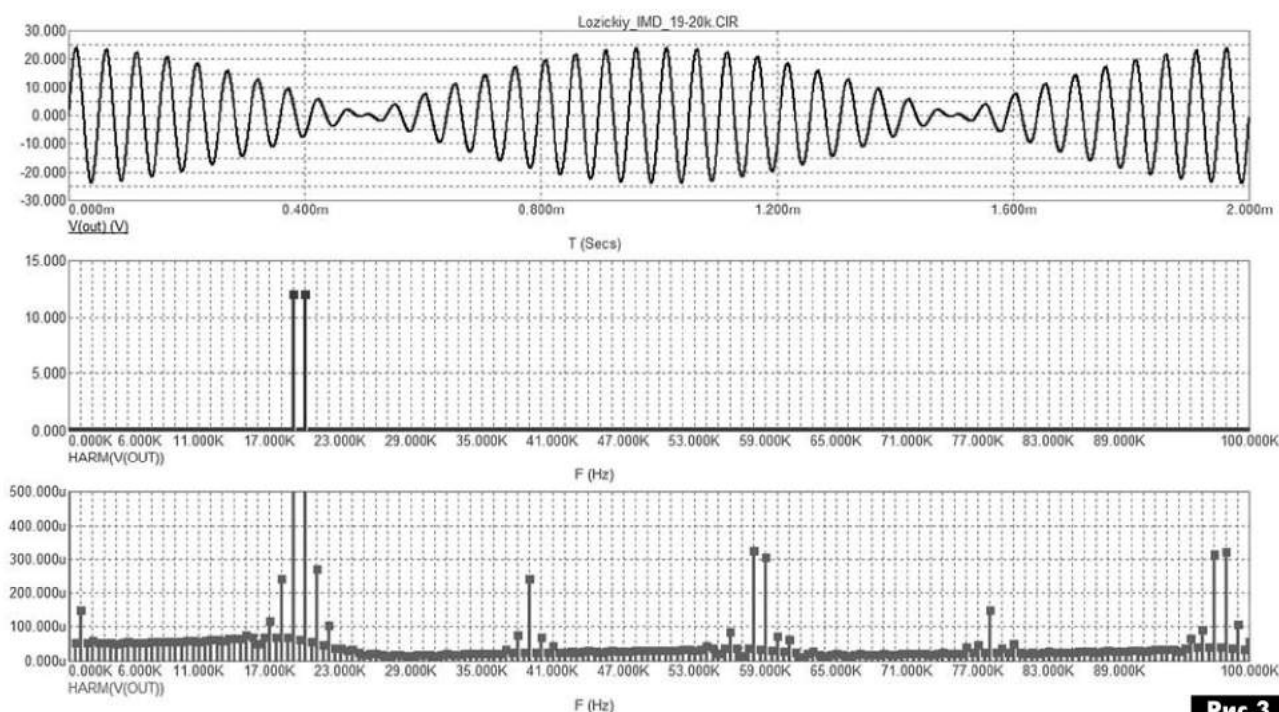


Рис.3

меандра этот метод позволяет выявить нежелательные искажения в районе нуля, поскольку в некоторых усилителях выходной сигнал перелезает за нулевую линию на величину до 10 В.

Скорость нарастания выходного напряжения достаточно высокая – 200 В/мкс, передача импульсов чистая, без выбросов и звона. Однако, как показала практика, даже четкая передача импульсных сигналов часто не гарантирует такого же качественного звукоусиления.

Более 50 лет назад Питер Баксандалл [3] придумал тест, заключающийся в получении погрешности усиления путем вычитания приведенного

выходного напряжения по уровню к входному из входного напряжения. Позднее этот метод взял на вооружение и И. Акулиничев. При всей привлекательности этого метода он дает большие погрешности в измерениях, так как невозможно простыми RC-цепями внести необходимую задержку входного сигнала равную задержке вносимой усилителем. Для одних усилителей (например ОУ при $K_u=\pm 1$) она может быть от долей до нескольких десятков нс, а для УМЗЧ может быть от нескольких десятков нс до нескольких мкс. В даташитах на ОУ этот параметр приводится редко и называется Propagation Delay (t_{PD}).

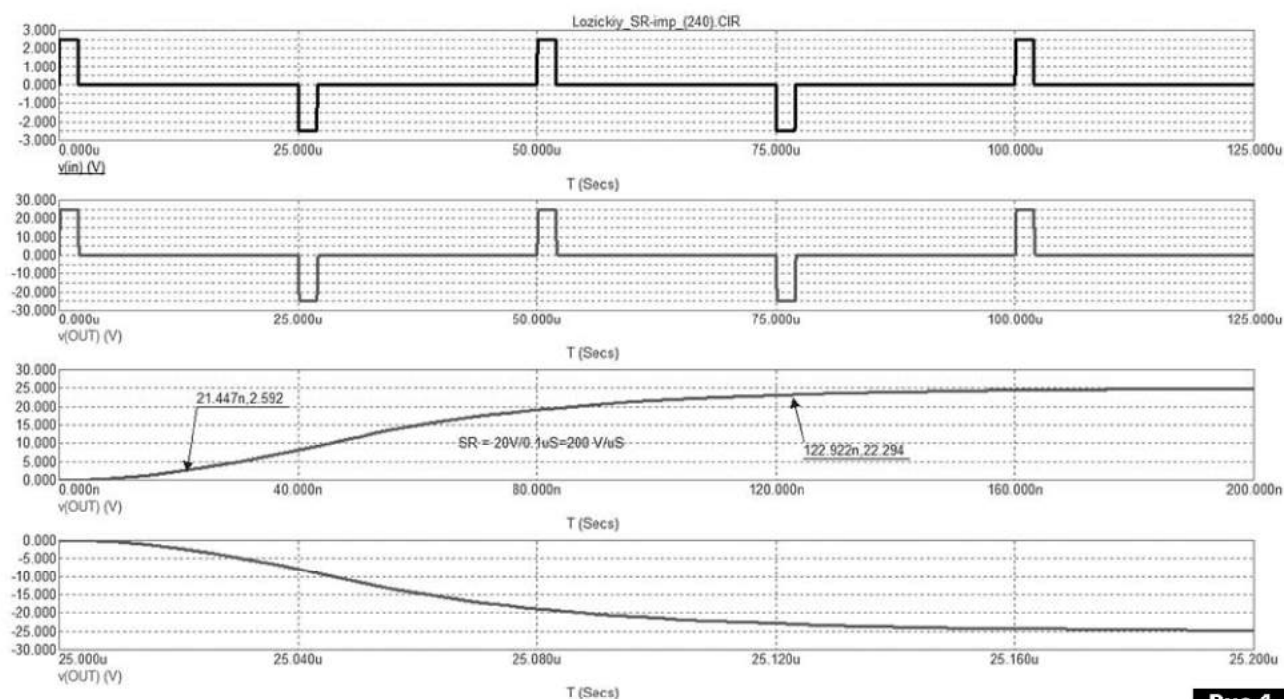


Рис.4

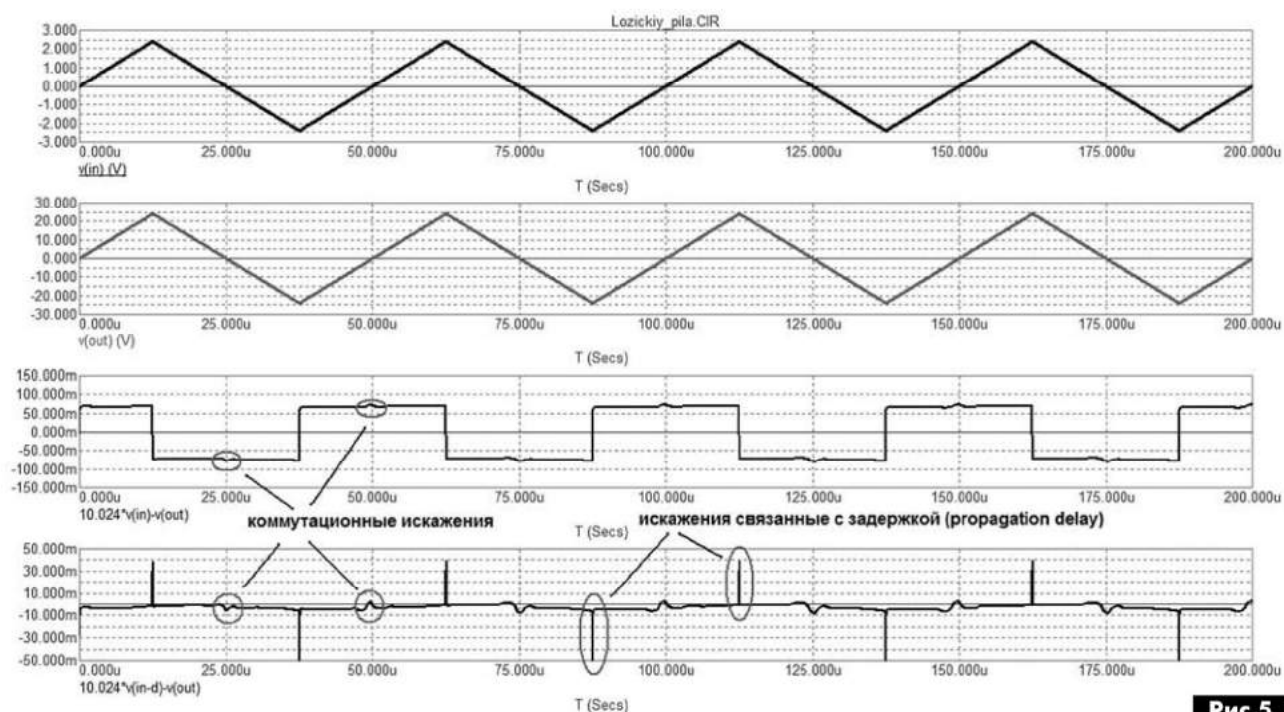


Рис.5

При компьютерном моделировании эта проблема решается очень просто – достаточно ввести линию задержки на необходимое время. Наиболее наглядный тест выявляющий искажения связанные с задержкой можно провести используя в качестве тестового пилообразный сигнал с частотой следования 10 кГц. Скорость нарастания выходного напряжения такого сигнала очень мала ($50 \text{ В}/25 \text{ мкс} = 2 \text{ В}/\text{мкс}$), и он под силу любому усилителю. Чтобы измерять искажения натуральной величины, а не приведенные, будем вычитать выходной сигнал из задержанного входного умноженного на K_u , **рис.5**.

Если вычесть друг из друга два одинаковых пилообразных напряжения, но сдвинутых во времени, то получим меандр, амплитуда которого зависит от задержки (третья осциллограмма на **рис.5**). Чтобы получить реальные искажения необходимо сдвинуть приведенный входной сигнал на время задержки (в данном случае 39 нс) – четвертая осциллограмма. В данном случае на 4-й осциллограмме мы видим не только искажения импульсного характера связанные с задержкой прохождения сигнала, но и коммутационные искажения при переходе сигнала через ноль. Ровность полог меандра (3-я осциллограмма) и линии продуктов ис-

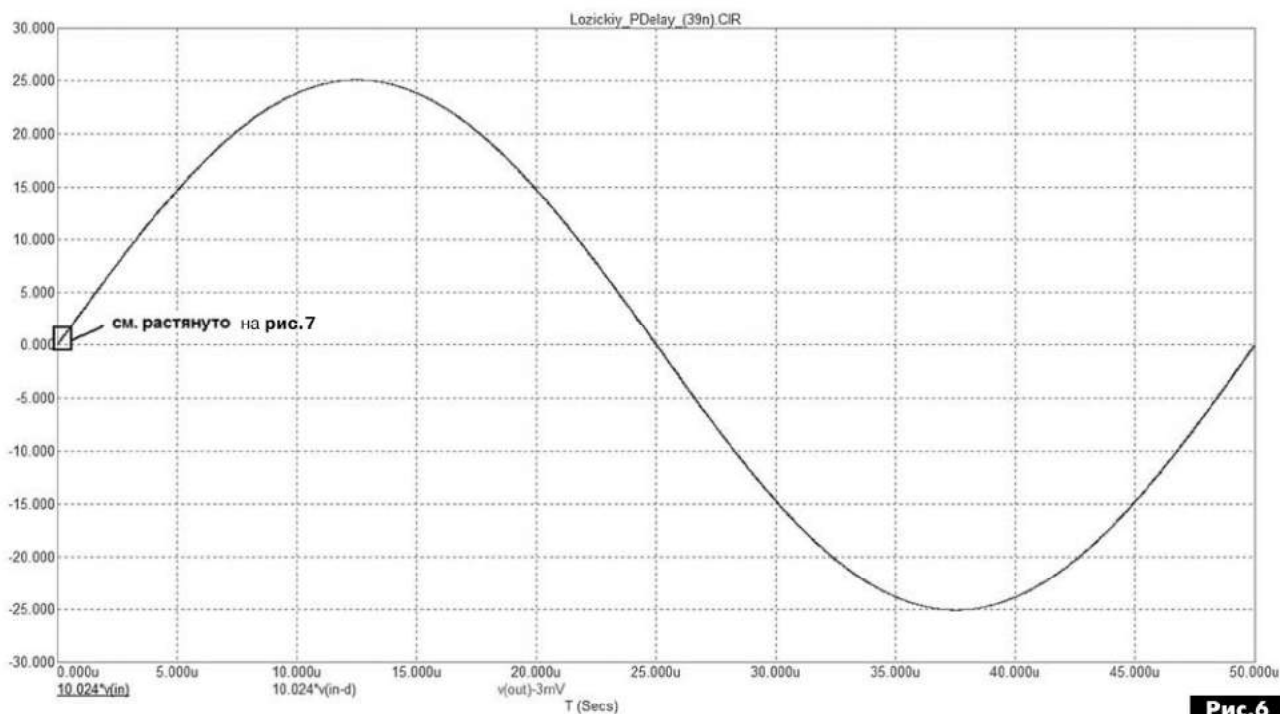


Рис.6

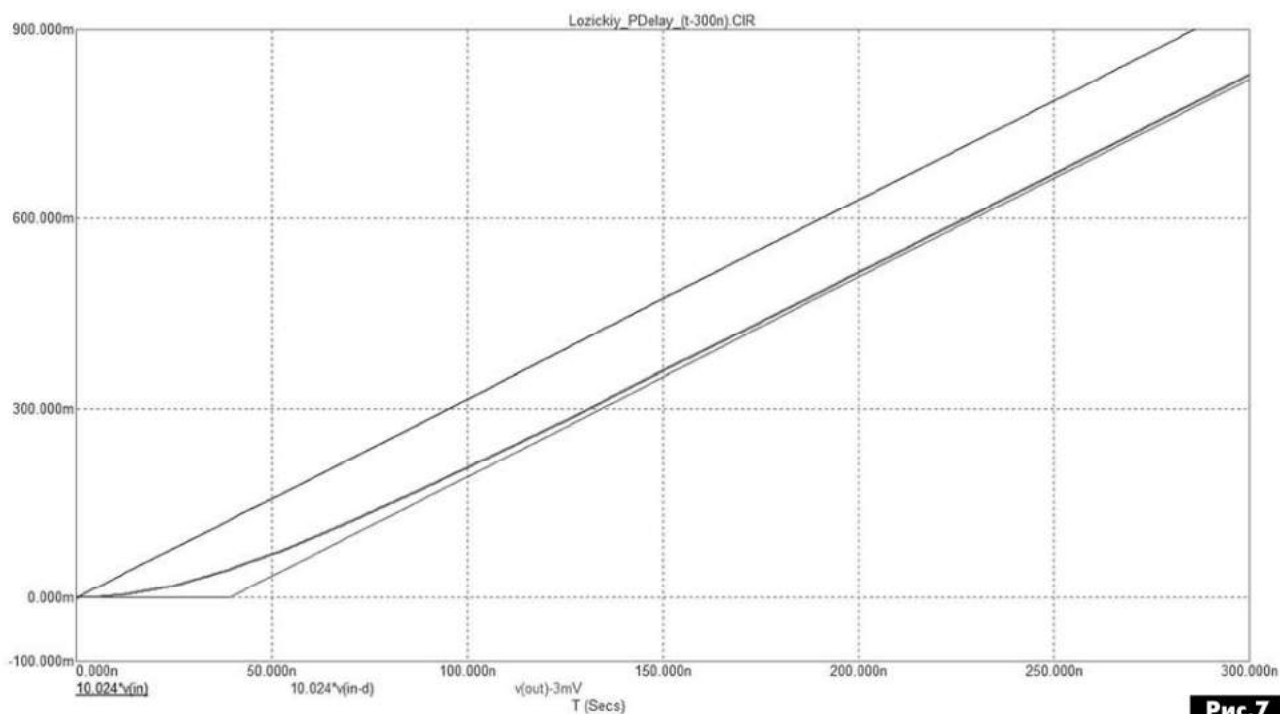


Рис.7

кажений (4-я осциллограмма) говорит о линейности амплитудной характеристики усилителя.

Для некоторых ОУ параметр Propagation Delay указан в даташитах. Например для EL2044 этот параметр равен 2.5 нс, для ОРА633 – 1 нс. Этот параметр обычно указывают для единичного усиления. При использовании ОУ с некоторым коэффициентом усиления (K_u) время задержки возрастает в K_u раз.

Причем важна не только величина задержки в установившемся режиме, но и время выхода на установившийся режим и его характер (плавная кривая, волнистая кривая).

В большинстве УМЗЧ этот параметр можно измерить в диапазоне частот 5...100 кГц. Измерим этот параметр для данного усилителя на частоте 20 кГц, **рис.6** и **рис.7**. Его значение примерно равно групповому времени задержки (ГВЗ) измеренному на малосигнальном уровне при снятии диаграммы Боде. При измерениях на больших сигналах как в предыдущем тесте приходится более точно подбирать время задержки.

(Продолжение следует)



Усилитель с ТОС С. Лозицкого и его доработка

Александр Петров, г. Минск

(Продолжение. Начало см. в РА5/2018)

На **рис.6** показаны три синусоиды: выходной сигнал, а также входной и входной задержанный на время propagation delay приведенные к уровню выходного путем умножения на K_u . В данном случае измеренная задержка составляет 39 нс. Ее легко увидеть, если растянуть участок перехода сигналов через ноль.

На **рис.7** показано начало бурста сигнала частотой 20 кГц: верхняя линия – приведенный входной сигнал, вторая – выходной сигнал, нижняя – приведенный задержанный сигнал. Площадь между красной и синей кривыми и есть искажение ошибки. Чем меньше задержка и чем быстрее происходит выход выходного напряжения на установившийся режим, тем меньше возникает продуктов искажений.

В усилителях класса АВ большое внимание следует уделять коммутационным искажениям. До недавнего времени этот вид искажений практически не исследовался, так как не существовало измерительных приборов. Измерим искажения с помощью виртуального прибора [4], **рис.8**.

Считается, что широкополосные и быстродействующие усилители класса АВ прекрасно справляются с коммутационными искажениями, но в данном случае это не спасает положение, как видим, коммутационные искажения носят сложный «рванный» характер с амплитудой до 3 мВ.



Известно что коммутационные искажения во многом определяются выходным каскадом (ВК). Переделаем выходной каскад под типовой, выставим ток покоя равным 100 мА подбором резистора R18 и уменьшим емкость коррекции C8 (в исходной схеме [2] C12) до 75 пФ (**рис.9**) и заново проверим параметры. Для борьбы с радиопомехами в схему добавлен входной RC-фильтр R2, C2.

Для начала проверим петлевое усиление чтобы убедиться в запасах по фазе и по усилению, **рис.10**.

С такой коррекцией частота первого полюса стала выше 20 кГц, при этом запас по фазе достаточно большой — 77 градусов, петлевое усиление на частоте 20 кГц стало более 50 дБ.

ИМИ модифицированного варианта УМЗЧ показаны на **рис.11**.

Как видно из графика ИМИ искажения снизились как минимум в 3 раза. Проверим скорость нарастания, **рис.12**.

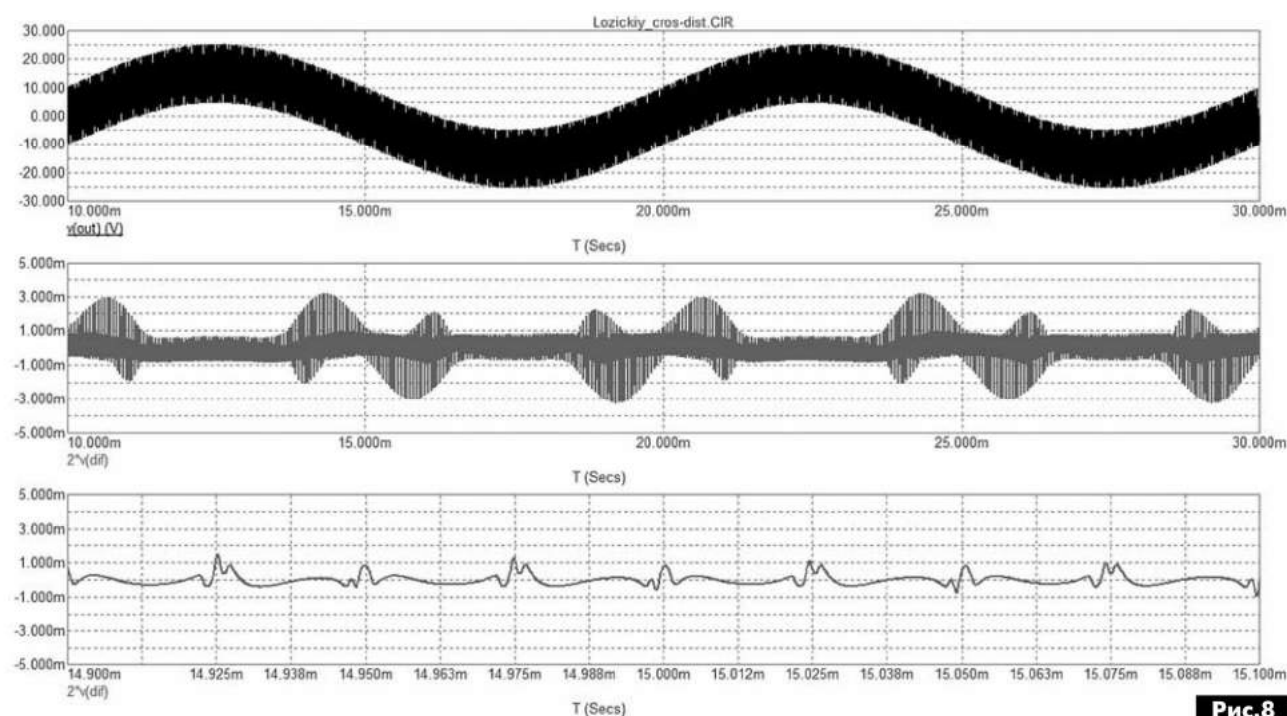


Рис.8

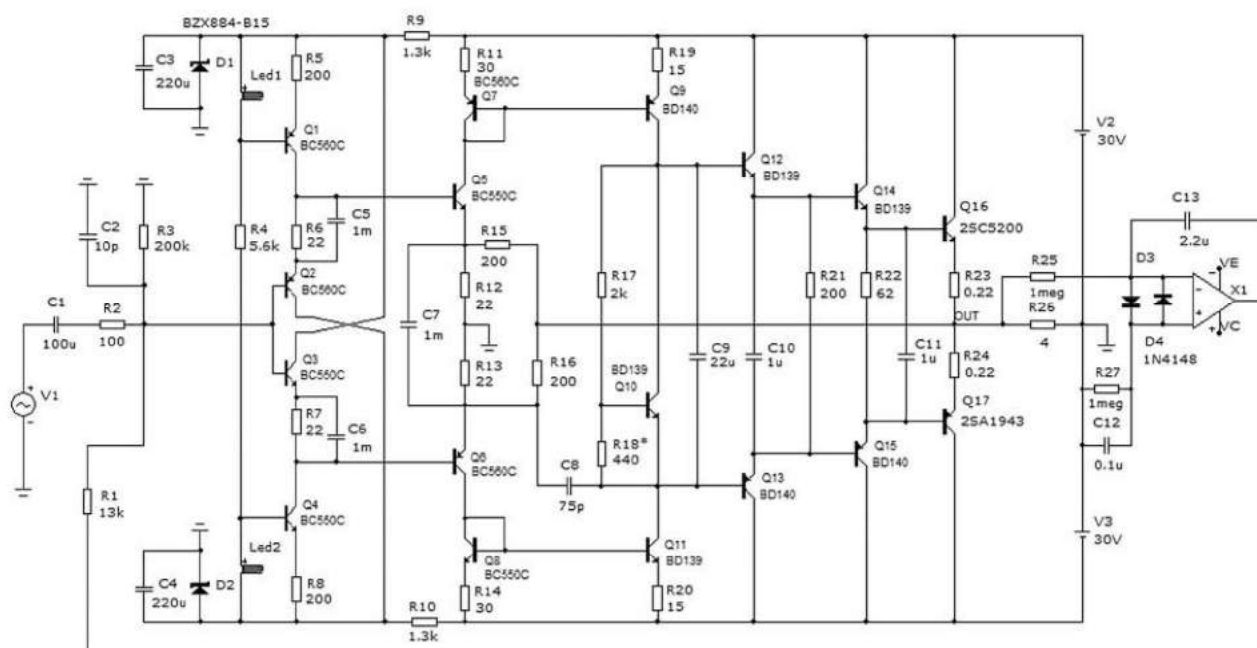


Рис.9

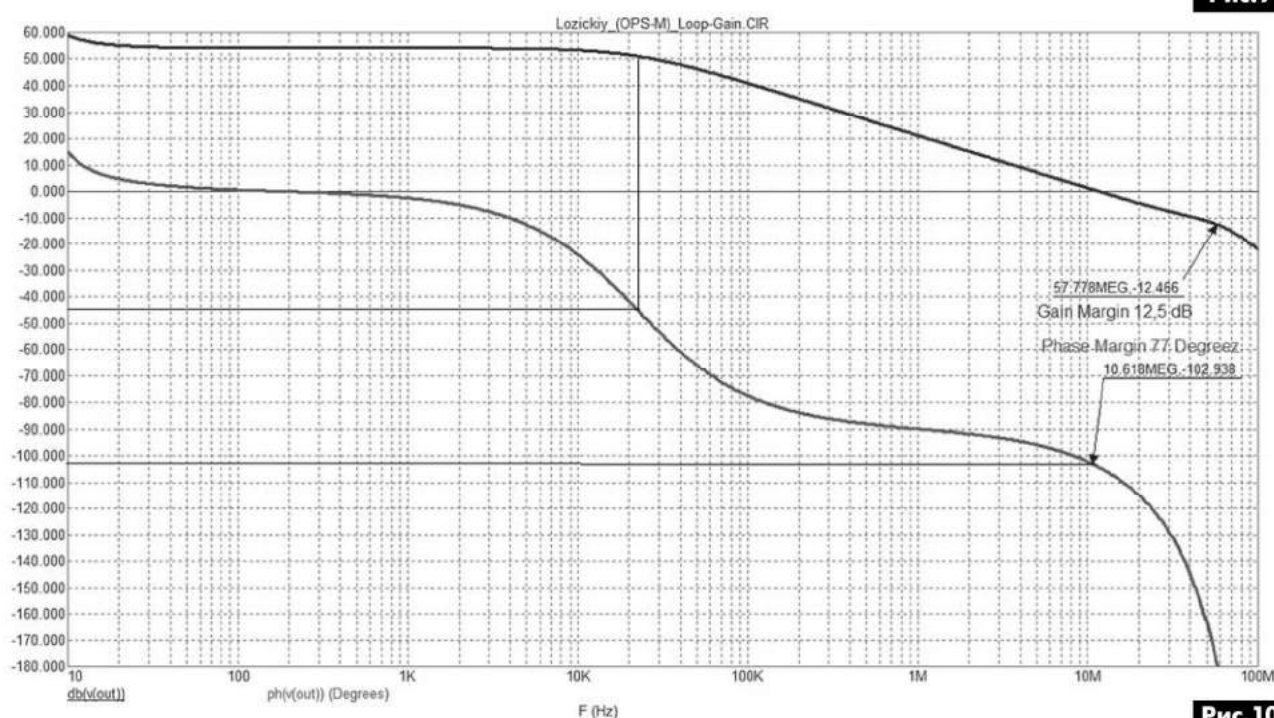


Рис.10

И здесь все в порядке, скорость нарастания выросла более чем в 2 раза, нет звона и выбросов сигнала на полках. Проверим модель УМЗЧ треугольным сигналом, **рис.13**.

Как видно из третьей осциллограммы амплитуда меандра существенно ниже благодаря малой задержке — всего 13 нс. Амплитуда продуктов искажений (четвертая осциллограмма) также существенно уменьшилась. Нет и намека на коммутационные искажения. Тест проведен при нулевой емкости конденсатора C2. При емкости конденсатора C2 равной 300...1000 пФ продукты искажений пилообразного сигнала практически равны нулю.

Проверим начало бурста сигнала частотой 20 кГц, **рис.14**.

Время задержки уменьшилось в 3 раза — с 39 нс до 13 нс. Площадь напряжения ошибки также существенно снизилась. Время выхода на установившийся режим не более 25 нс! Ну и наконец проверим коммутационные искажения, **рис.15**.

Осциллограммы коммутационных искажений сняты при токе покоя 100 мА, как видим и этот вид искажений существенно снизился. Для большей наглядности изменений все измерения проведены в одинаковых масштабах.

В заключение хочется отметить что такие низкие задержки сигнала практически нереали-

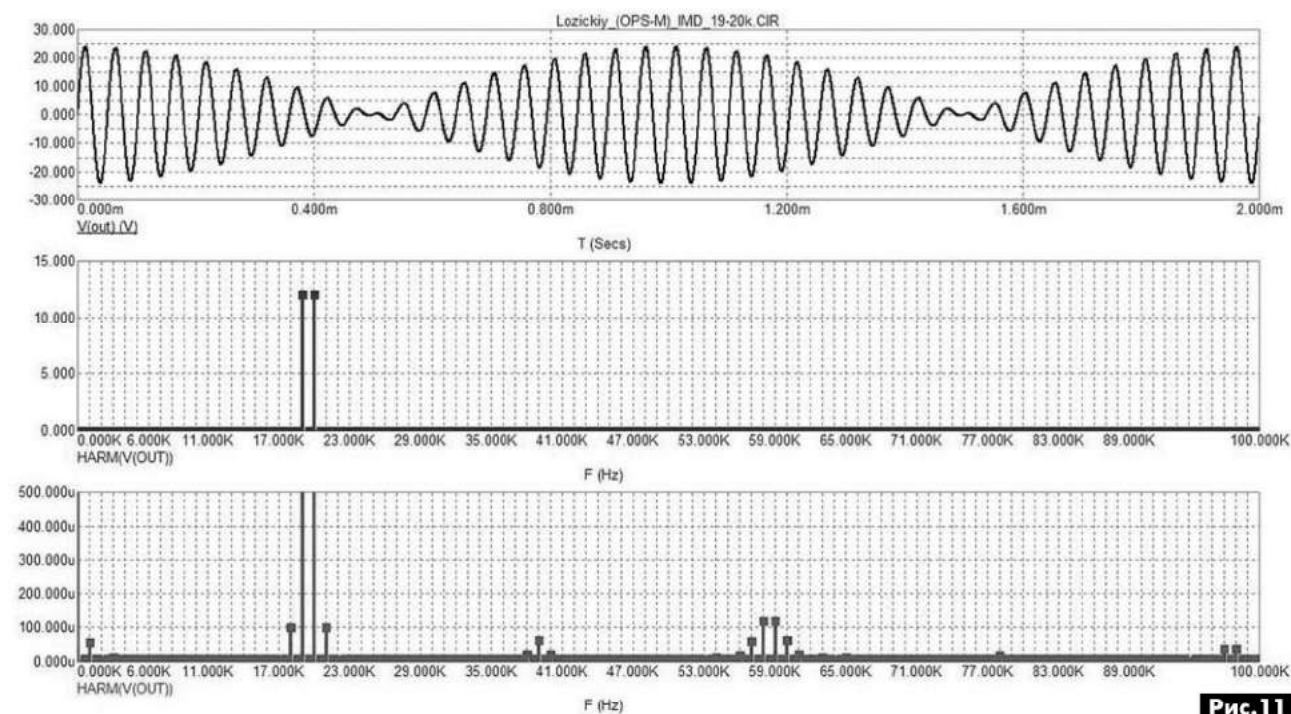


Рис.11

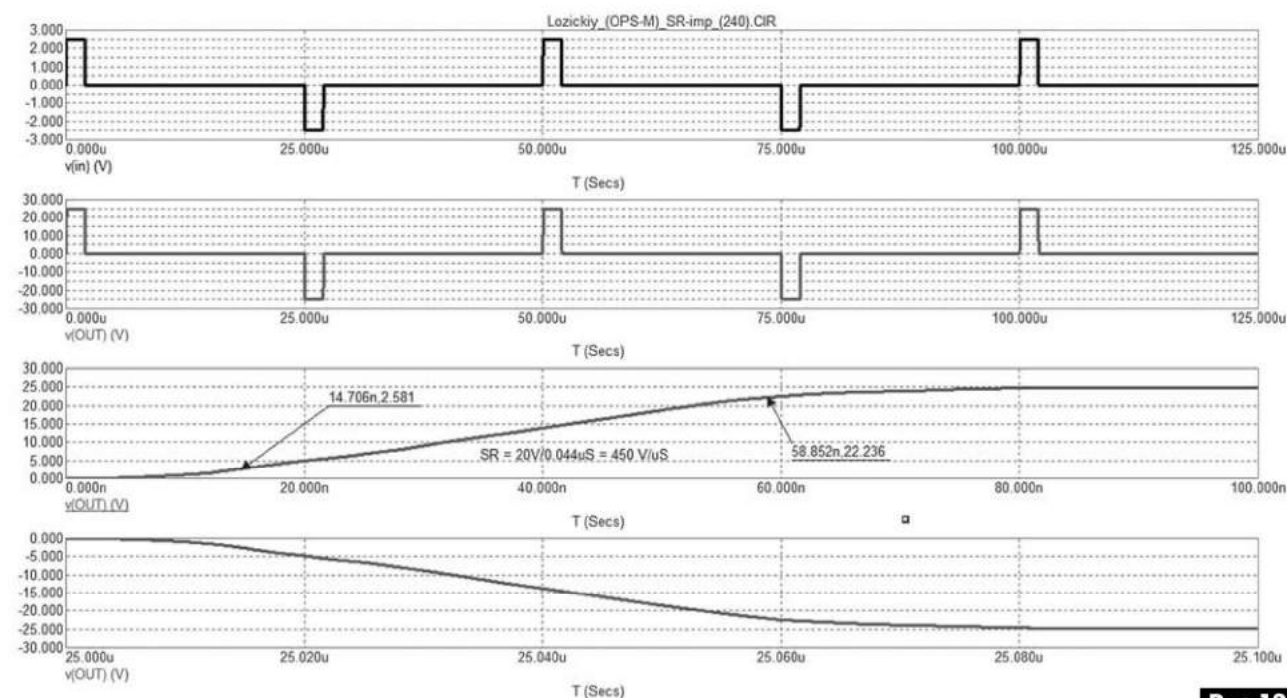
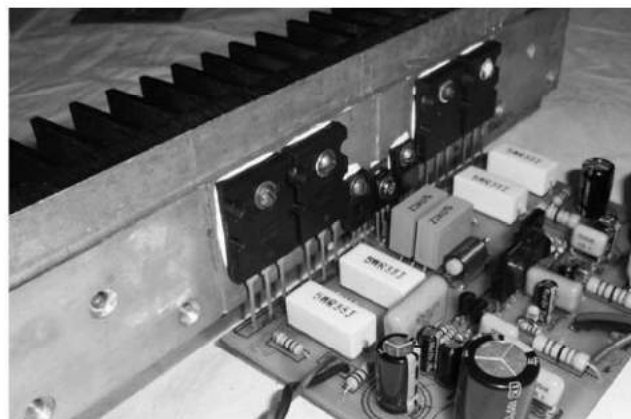


Рис.12



зумы в композитных усилителях, даже на самой современной элементной базе, которые имеют propagation delay 54 нс при $K_u = 20$, что эквивалентно 27 нс при $K_u = 10$ и в 2 раза выше чем у рассмотренного выше УМЗЧ. Когда речь идет о сверхбыстродействующей ООС я не совсем понимаю, о чем идет речь когда в некоторых композитах-интеграторах, например, в УМЗЧ Литаврина, задержка сигнала на выходе УМЗЧ составляет 1.5 мкс. Т.е раньше чем через 1.5 мкс сигнал ООС не поступит с выхода на вход в узел сравнения. Где же здесь сверхбыстродействующая ООС?

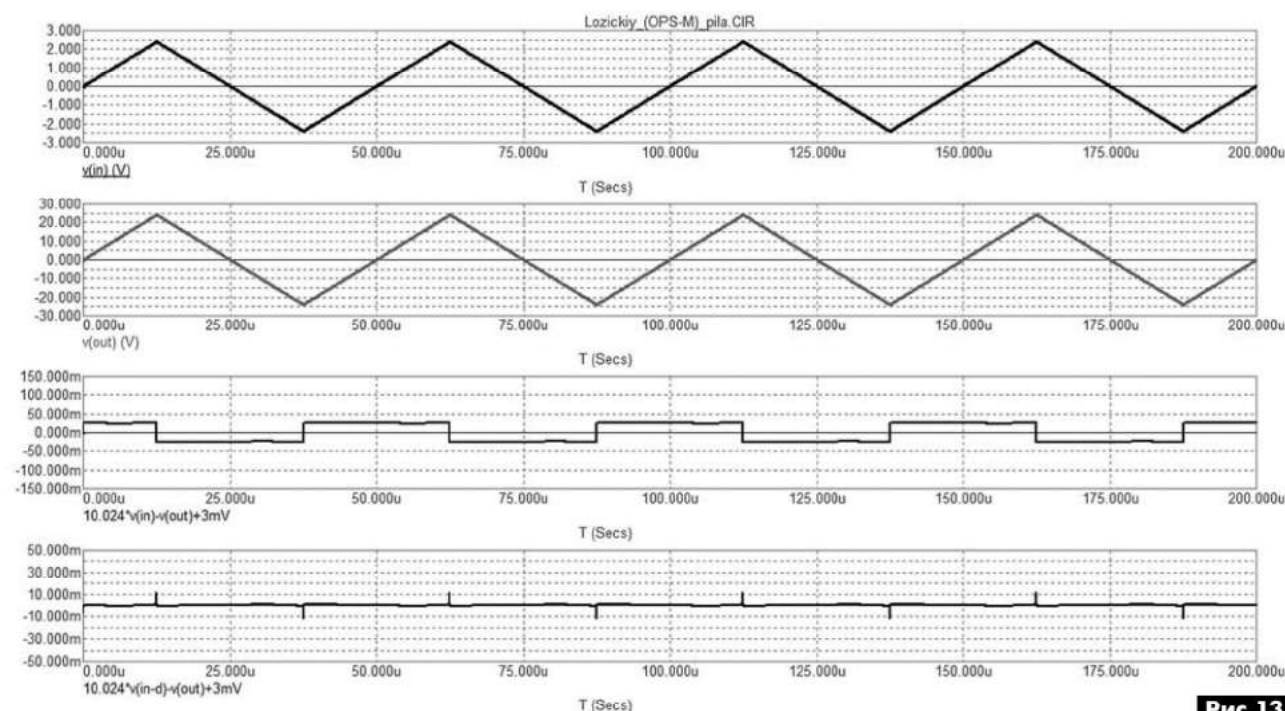


Рис.13

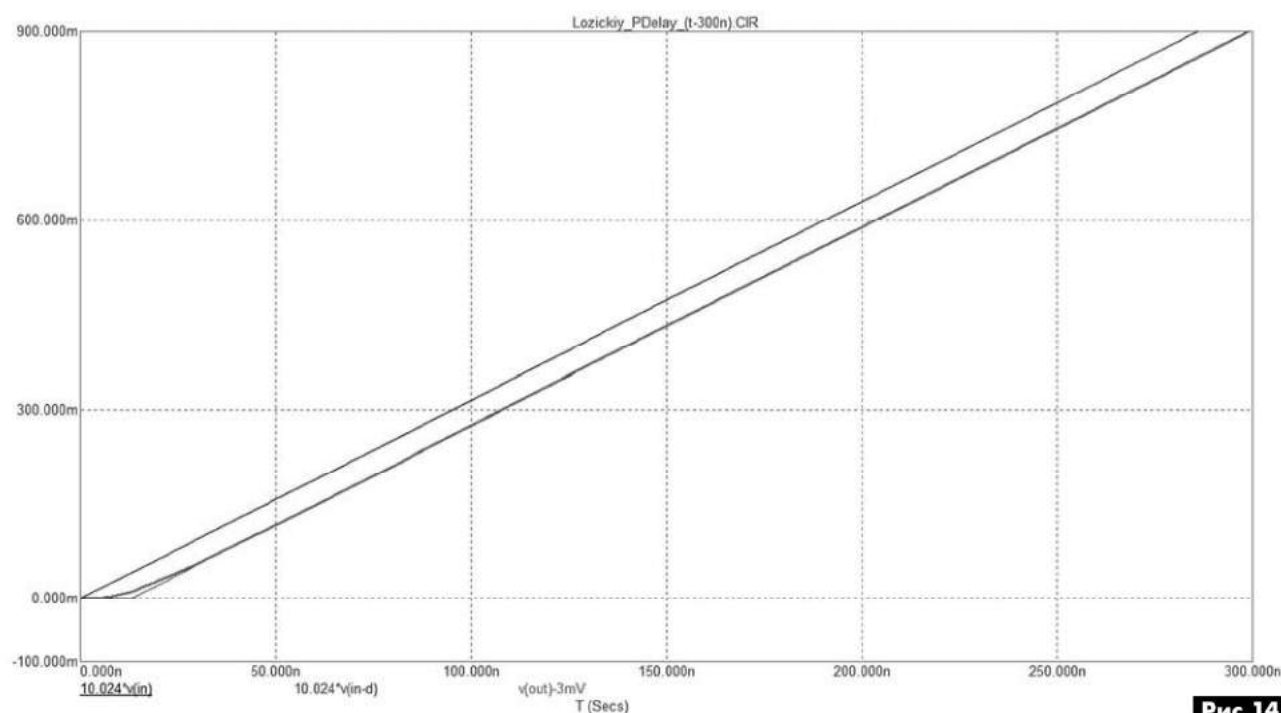


Рис.14

Как видим, благодаря несложной доработке удалось существенно улучшить параметры достаточно высококачественного УМЗЧ.

Несколько слов о практической реализации УМЗЧ

При практической реализации целесообразно разделить УН и питать его от отдельного двухполярного источника с напряжением на 5...10 В выше, чем напряжение питания ВК. При питании от одного источника необходимо между ВК и УН надо включить RC фильтр с резистором номиналом 20...30 Ом, и конденсатором емкостью 470...1000 мкФ.

Конденсаторы C5-C7 из УМЗЧ рис.9 можно исключить.

Резистор R1 определяет входное сопротивление и может быть увеличен до 20 кОм и более.

Для дальнейшего улучшения УМЗЧ рекомендуется использовать параллельное включение 2-х или более транзисторов в каждом плече выходного каскада УМЗЧ. Это снизит и стабилизирует выходное сопротивление усилителя и сделает его менее чувствительным к обратной ЭДС акустических систем. В этом же случае, для повышения выходной мощности, рекомендуется повысить напряжение питания до ± 40 В.

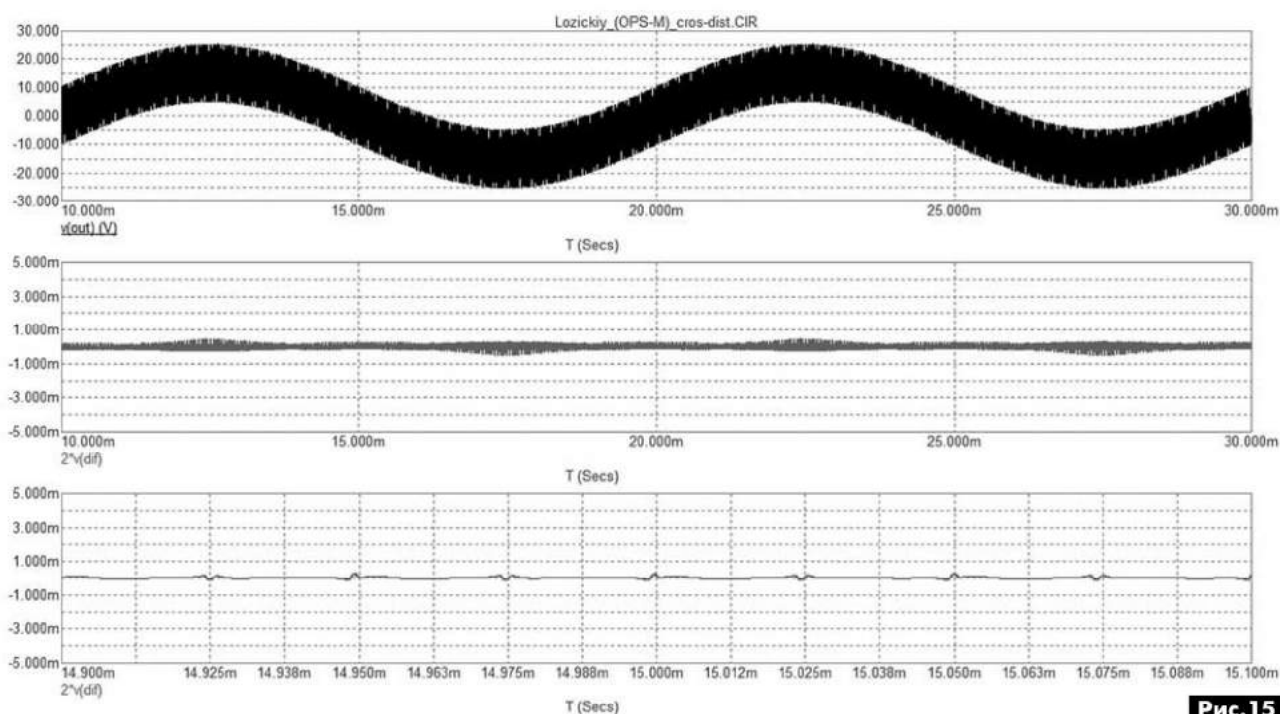


Рис.15

Литература:

1. С. Лоцкий, УМЗЧ с токовой обратной связью // Схемотехника. – 2003. - №2.
2. В. Король, УМЗЧ с компенсацией нелинейности амплитудной характеристики // Радио. – 1989. - №12.

3. Peter J. Baxandall, Audible amplifier distortion is not a mystery //Wireless World. - November 1977. - p.63.

4. А. Петров, Виртуальный прибор для измерения коммутационных искажений усилителей // Радиоаматор 2018, №1-2.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
промышленного оборудования, металлообработки, литья и энергетики



МАШПРОМ



ЛИТЭКС



ЭНЕРГОПРОМ

10-12 ОКТЯБРЯ 2018

Место проведения: ПР «ЛАВИНА» г. Днепр, ул. Космическая, 20

ООО Экспо-центр «Метеор», 49008, Украина, г. Днепр +38(067)639-86-79 litex@expometeor.com

