

От усилителя Гумели к усилителю Александра

И.ПУГАЧЕВ,
г.Минск.

Чем занимается аудиофил? Он — в постоянном поиске. Как известно, “нет предела совершенству!”. Первые о существовании усилителя М.Александра я узнал из статьи С.Агеева [1]. Там сказано следующее: “Еще один хороший усилитель — М.Александра из РМ!”. Кто такой этот Александр? Что за усилитель? Об этом — ни слова. Но дана ссылка на недоступный зарубежный источник 1990 г. Затем А.Зуев [2] посвятил усилителям с токовой обратной связью полстраницы и употребил ту же ссылку, а после этого перешел к описанию своего усилителя с обратной связью по напряжению.

А между тем, в журнале “Схемотехника” (№№11-12 за 2002 г.) был опубликован перевод статьи (репринта) М.Александра “Усилитель мощности с токовой обратной связью”. В том же журнале появилась еще одна статья [3] на эту тему с оригинальной схемой. Просматривая журналы “Радиолюбби”, в №2 за 2002 г. на стр.13 я недавно обнаружил переделанный К.Ясинским усилитель Александра без указаний на автора первоисточника и указаний на то, что это — УМЗЧ с токовой ОС. И, наконец, в журнале “Радиомир” — статья А.Петрова [4] с еще одной схемой.

Таким образом, за 21 год на просторах СНГ стали известны три схемы усилителей с токовой обратной связью. Из них одна собрана “в железе” — УМЗЧ Александра, а две другие — “плод досужего ума”, поскольку эмулированы на компьютере. Не густо! В то же время, фирма Marantz выпустила усилитель “Marantz PM-14”, в УМЗЧ которого использована токовая ОС. По сведениям из Интернета, некоторые аудиофилы используют этот усилитель как референсный (опорный) при слуховых испытаниях.

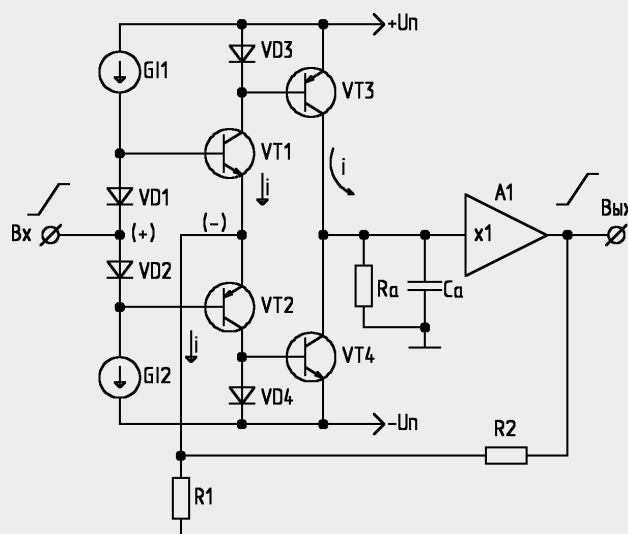
В вышеуказанных статьях перечислены преимущества усилителей с токовой ОС, и я их повторять не буду, но хочу отметить такое достоинство, как однополюсная диаграмма Боде при широкой полосе пропускания, что, по моему мнению, весьма полезно в УМЗЧ.

Операционные усилители с токовой ОС выпускаются многими фирмами и в широком ассортименте. Приведу некоторые данные по таким усилителям, взятые из [5]. Walt Kester в статье по высокоскоростным операционным усилителям дает две структуры ОУ с токовой ОС — одно- и двухкаскадную. В однокаскадной используются токовые зеркала (VT3 и VT4 вместе с диодами), как видно на упрощенной схеме (рис.1). Однокаскадным такой усилитель называют потому, что усиление напряжения в этой структуре осуществляется только в одном каскаде (VT3-VT4). Входные транзисторы VT1 и VT2 нагружены на низкоомные цепи (p-n-переходы) и по напряжению сигнал не усиливают. Выходной каскад (бустер тока)

является повторителем напряжения, выделившегося на R_a , и по напряжению не усиливает. Полагаю, радиолюбителям полезно разобраться в работе такой структуры, чтобы свободнее ориентироваться в выборе элементов при создании собственного усилителя.

Когда на вход, т.е. на базу VT1 (VT2), поступает открывающий (например, положительный) перепад входного сигнала, эти транзисторы, работая как эмиттерные повторители (ЭП), передают перепад с коэффициентом, близким к единице, на резистор R1. Обратная связь через R2 пока не включилась. Если резистор R1 достаточно низкоомный, то через него начинает протекать большой ток. Этот ток течет и в коллекторе VT1 и, отражаясь токовым зеркалом, заряжает конденсатор C_a . Выходной повторитель (A1) начинает увеличивать ток через резистор обратной связи R2 (с конечной скоростью). При этом ток i будет уменьшаться, и, наконец, установится баланс $U_+ = U_-$ при малом токе через VT1.

Рис. 1



На постоянном токе коэффициент усиления по напряжению при разомкнутой ОС равен отношению R_a/R_1 . R_a образуется из параллельного соединения выходных сопротивлений VT_3 и VT_4 , а также входного сопротивления бустера тока. При замкнутой обратной связи коэффициент передачи на постоянном токе и на низких частотах

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Частота, на которой усиление падает на 3 дБ, грубо можно оценить так:

$$F_3 \approx \frac{1}{2\pi \cdot C_a \cdot R_2},$$

при условии $R_0 \ll R_1$ и $R_0 \ll R_2$, где R_0 — входное сопротивление каскада на VT_1 и VT_2 (по входу “—”).

W.Kester дает точное выражение в виде:

$$F_3 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_a \left(1 + \frac{R_0}{R_2} + \frac{R_0}{R_1} \right)}.$$

А М.Александр (тоже, кстати, работавший в Analog Devices) для немного модифицированной структуры (рис.2) приводит такие выражения для K_u и F_3 :

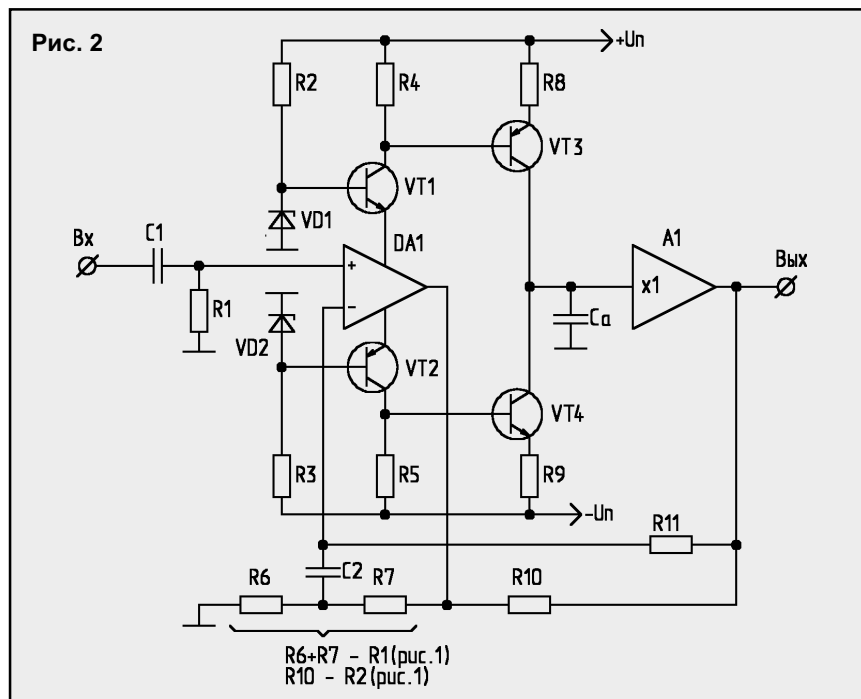
$$K_u = \left(1 + \frac{R_7}{R_6} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_{10}}{R_7 + R_6} \right);$$

$$F_3 = \frac{1}{2\pi \cdot \left(2R_{10} + \frac{R_{10} \cdot R_0}{R_7 + R_6} \right) \cdot C_a}.$$

Здесь R_{11} не учитывается, так как $R_{11} \gg R_{10}$. У М.Александра R_{11} вообще отсутствует, а конденсатор C_2 — закорочен.

Из этих выражений следует, что полоса усилителя при $R_0 \rightarrow 0$ не зависит от R_1 (рис.1). Но от R_1 зависит скорость нарастания выходного напряжения! Скорость нарастания зависит также и от $U_{\text{вх}}$, т.к. $i = U_{\text{вх}}/R_1$, и она будет максимальной при $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх. max}}$.

В таких структурах стабилизируется время установления, а не ско-



рость нарастания, как в усилителях с обратной связью по напряжению.

В двухкаскадных усилителях с токовой ОС вместо токовых зеркал используют каскады с общим эмиттером (рис.2), и входной каскад обладает некоторым усилением в коллекторной цепи.

У ОУ с токовой ОС ток потребления значительно уменьшен. Достаточно посмотреть параметры таких ОУ, как AD8009 (11 мкА, 1000 МГц, 7000 В/мкс) и AD8011 (1 мА, 300 МГц, 2000 В/мкс).

Однако вернемся к УМЗЧ. У Александра и Лозицкого это однокаскадный, у Петрова — двухкаскадный усилитель с токовой ОС, К тому же, у Александра ООС — двухпетлевая.

При выборе структуры и элементов схемы УМЗЧ нужно решить несколько проблем. Одна из них — это согласование падений напряжения $U_{\text{вб}}$ во входных ЭП. У Лозицкого таких переходов база-эмиттер четыре, и он вынужден включить последовательно с эмиттерами резисторы, которые значительно увеличивают R_0 . И даже это не исключает необходимости подбора транзисторов. А в схеме Алек-

сандера эта проблема решена разработчиками ОУ, который установлен на входе УМЗЧ. Но ОУ должен иметь большой выходной ток, т.к. этим током заряжается C_a через токовые зеркала в однокаскадной структуре (рис.1). В двухкаскадной структуре этот ток может быть меньше, т.к. каскады на VT_3 и VT_4 его усиливают.

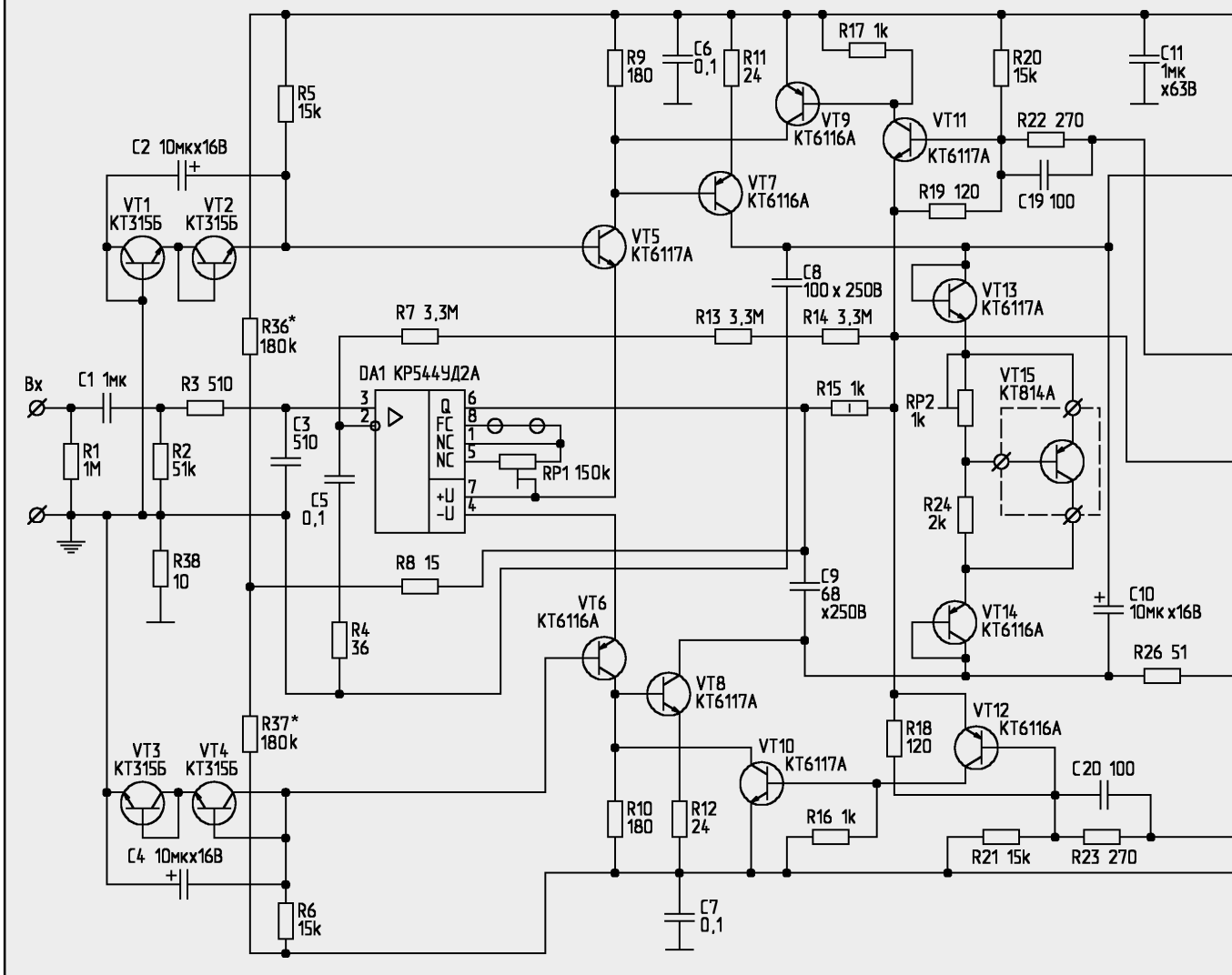
Как и всегда, четкого обоснования выбора нужной скорости нарастания выходного напряжения нет. Задавшись скоростью нарастания U/t и выбрав C_a , можно найти ток заряда емкости

$$i = \frac{C_a U}{t}$$

и выбрать соответствующий ОУ.

Вторая проблема — поддержание малого напряжения сдвига выходного напряжения УМЗЧ. И у Александра, и у Лозицкого она решается с помощью интегратора, причем в первом случае построен УПТ, а во втором на входе имеется делительный конденсатор. Единого мнения по поводу применения конденсатора в цепи сигнала не существует. Я выбираю вариант без интегратора, но с конденсаторами

Рис. 3



на входе и в цепи ООС (для упрощения схемы).

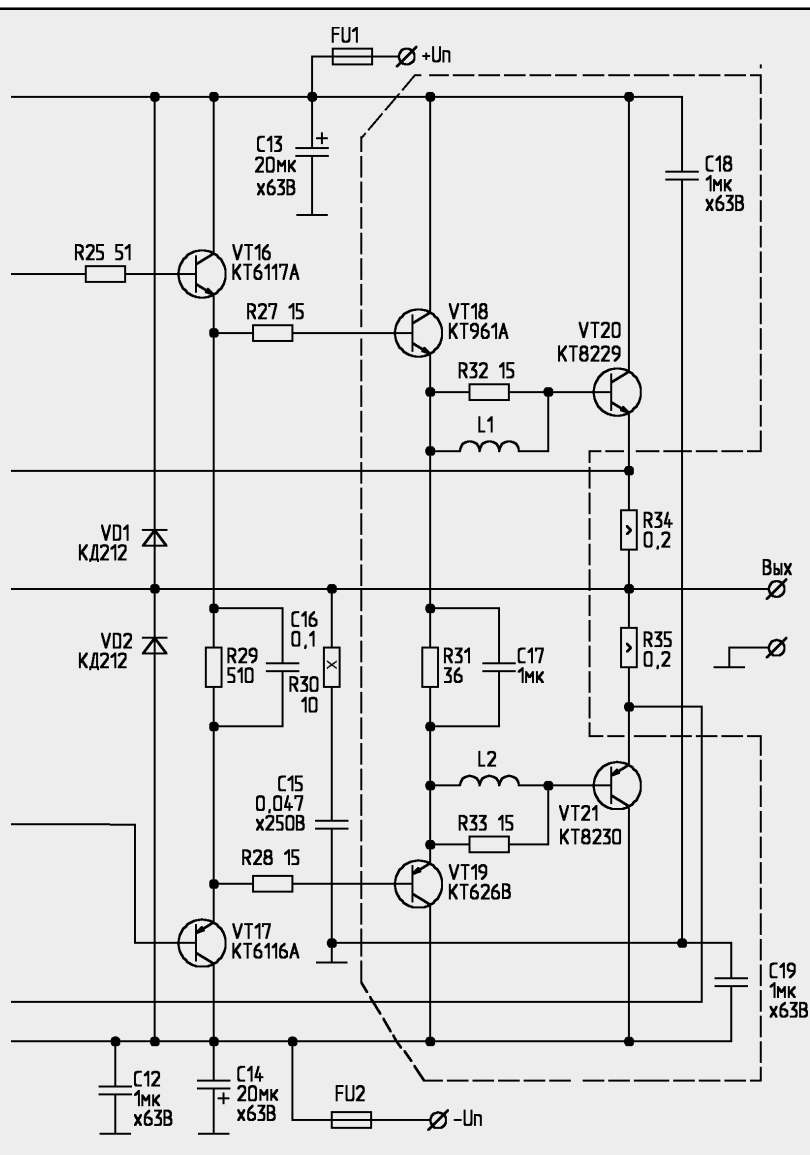
Третья проблема связана с ограничением больших токов (мощностей) в выходном ЭП, вызываемых разными причинами. В традиционной схеме защиты от КЗ шунтируется вход ЭП при превышении заданного порога, и почти весь ток от предыдущего каскада идет мимо ЭП. Но ведь в схеме с токовой ОС мы стараемся этот ток увеличить, чтобы повысить скорость нарастания. Налицо явное противоречие. Есть над чем подумать!

Итак, я выбираю схему М.Александера с некоторыми изменениями: ОУ, каскады с ОЭ, выходной тройной ЭП ($K=1$). В упрощенном виде она изображена на рис.2. Резисторы R_6+R_7 и R_{10} — это R_1 и R_2 на рис.1. Это — токовая ООС. R_6 , R_7 и C_2 образуют ООС по переменному напряжению для ОУ; R_{11} и C_2 — ООС по постоянному напряжению. Такая организация обратных связей применена и у “Marantz PM-14”.

А причем здесь усилитель Гумели? Е.Гумеля основательно поработал с УМЗЧ, построенным на ОУ [6],

и если сравнить его схему с рис.2, можно обнаружить много общего. А так как у меня по случаю оказались платы, “набитые” деталями от усилителя Гумели, то я их использовал при макетировании своей схемы.

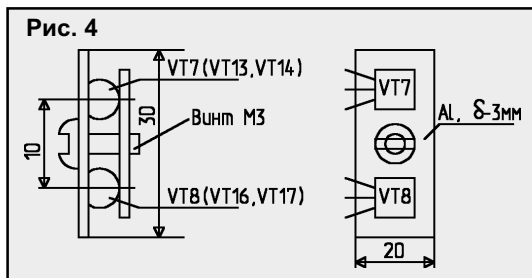
Разработанная схема УМЗЧ приведена на **рис.3**. Схема строилась на сугубо доступных отечественных элементах (недорогих и не требующих подбора). В ней есть элементы усилителя Александра, Гумели, “Marantz PM-14” и [7]. Имеется схема защиты выходных транзисторов от перегрузки и КЗ.



Выходные транзисторы могут быть KT818Г/819Г при 8-омной нагрузке. Время установления $t_{\text{у}} \leq 150$ нс (по уровням 0,1 и 0,9), полоса — 3 МГц. Мощность зависит от питающих напряжений и при ± 35 В составляет 50 Вт. Входное напряжение $U_{\text{вх}} = 0,8$ В.

Предвыходные и выходные транзисторы VT18-VT19 и VT20-VT21 размещаются на общем радиаторе через слюдяные прокладки (с помощью тепло-

проводящей пасты КПТ-8). Термостабилизирующий ток покоя УМЗЧ транзистор VT15 крепится возле них. Чтобы минимизировать термодрейф параметров УМЗЧ при рабо-



те, необходимо обеспечить тепловую связь между транзисторами VT7-VT8, VT13-VT16 и VT14-VT17 соответственно. Для этого их нужно попарно закрепить между пластинками-теплоотводами, как показано на рис.4.

Постоянные резисторы в схеме (кроме отмеченных) — МЛТ-0,25; R34, R35 — С5-16МВ-5 Вт; подстроечные RP1 — СП3-19А, RP2 — СП5-2ВБ. Конденсаторы C1, C11, C12, C18, C19 — К73-17, 1 мкФх63 В, C6, C7, C16, C17 — КМ-6; C8, C9 — КСО-1 68...100 пФх250 В. Дроссели L1, L2 — ДПМ-2,4 20 мкГн.

Если рассчитать полосу усилителя по приведенной Александром формуле, получим значение, в 6 раз меньшее, чем измеренное. Но эта формула годится для однокаскадных усилителей с токовой ОС, т.е. содержащих токовые зеркала. В двухкаскадной структуре все совпадает, если расчетную полосу умножить на отношение $R9/R11$ (рис.3). Указанные данные я получил, испытывая макет с объемным монтажом.

Теперь предстоит развести печатную плату, собрать стереовариант и сравнить звучание с уже проверенным усилителем [7] и ламповыми однотактниками.

Литература

1. С.Агеев. Сверхлинейный УМЗЧ с глубокой ООС. — Радио, 1999, №11, С.15.
2. А.Зуев. УМЗЧ с параллельной ООС. — Радио, 2005, №2, С.4.
3. С.Лозицкий. УМЗЧ с токовой обратной связью. — Схемотехника, 2003, №2, С.12.
4. А.Петров. УМЗЧ с токовой ОС. — Радиомир, 2010, №№11, 12.
5. High speed design techniques. — Analog Devices, 1996.
6. Е.Гумеля. Простой высококачественный УМЗЧ. — Радио, 1989, №1, С.44.
7. И.Пугачев. УМЗЧ по заветам Marantz'a. — Радиомир, 2010, №9, С.3.