

Моя хронология УМЗЧ

И.ПУГАЧЕВ,
г.Минск.

Свое знакомство с мощными усилителями я начал в 1958 году, когда учился в энергетическом техникуме, и мне поручили обслуживать радиоузел. Он состоял из трех частей: малогабаритной радиотрансляционной установки "ТУ-100", магнитофона "Днепр 9" и ЛАТРа на 2 А.

"ТУ-100" — громадный ящик из железа весом около 100 кг — содержал два блока выходных усилителей по 50 Вт на четырех лампах 6П3С каждый, шесть кенотронов 5Ц4С и пять двойных триодов 6Н9С в предварительном усилителе и фазоинверторах. Кроме того, в комплекте был радиоприемник "ТПС-54-С" (кстати, прекрасно работавший), а также электропроигрыватель грампластинок на 78 об/мин. Потребляемая мощность радиоузла доходила до 600 Вт. Вещь, весьма "достойная" по аудиофильским меркам.

Во время работы усилители страшно грелись, лампы нужно было подбирать, напряжение в сети доходило до 240 В, и его приходилось постоянно контролировать и

понижать ЛАТРом до 220 В. Однажды вечером, уходя домой после озвучивания очередных танцев, я забыл выключить усилитель, и он сгорел, распространяя ужасный запах. Меня тут же отстранили от "ТУ-100".

Еще работая с "ТУ-100" и магнитофоном, я познакомился с таким явлением, как "микрофонный эффект" у ламп. Методы борьбы с ним — амортизация ламповых панелек, одевание на лампы тяжелых колпачков (из металла) — мне не нравились, и я решил сделать микрофонный усилитель на транзисторах. Нужно сказать, что в это время уже появились первые транзисторы: П1 — маломощные и ПЗ — мощные, довольно оригинально выполненные заодно с радиатором, а затем П5 и, наконец, П6 — уже оформленные как потом широко известные П13 и П16.

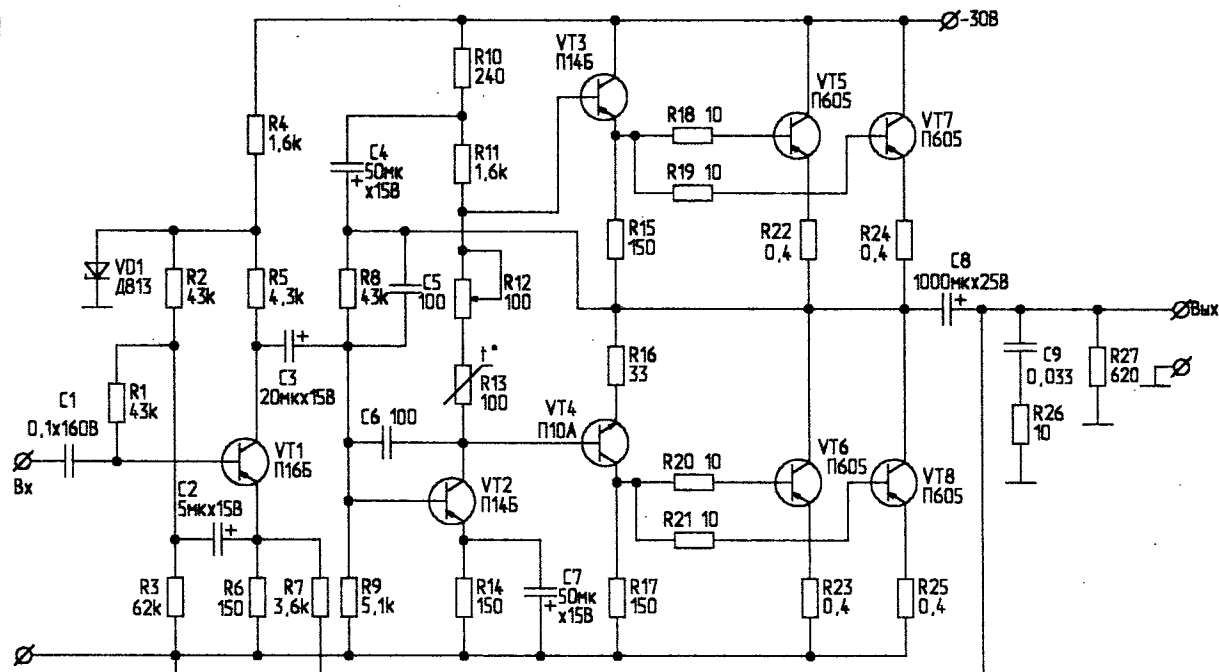
Я собрал усилитель на одном транзисторе П5Д в небольшой коробочке (меньше спичечной). Схему разработал, изучая публикации журнала "Радио". Электролитических конденсаторов малого размера

у меня не было, и я их делал сам, распиливая корпуса и "начинку" больших, а затем все заливая парафином. Усилитель прекрасно работал от батарейки 4,5 В, не чувствовал ударов, не "шипел", как многие лампы, и не "фонил". Я стал поборником транзисторов, и появилась мечта построить малогабаритный УНЧ ватт на 10.

И я его построил в 1962 году по схеме Х.Лина [1]. Выходные транзисторы выбирать было не из чего — в наличии были только П4. Заработавший усилитель не возбуждался, но на высоких частотах (после 10 кГц) ток потребления возрастал в 3 раза из-за плохих частотных свойств транзисторов П4. Звучание усилителя было не хуже, чем у тогдашних ламповых аппаратов (по крайней мере, при сравнении с радиолой "Дружба"), а мощность была больше, чем у всех выпущенных до той поры радиоприемников.

Выявился, правда, и другой недостаток: слабое подавление пульсаций напряжения выпрямителя

Рис. 1



ля при питании от сети. Но поскольку у него напряжение питания было около 30 В, ток потребления — не более 1...1,5 А, этот недостаток я легко преодолел с помощью транзисторного стабилизатора напряжения.

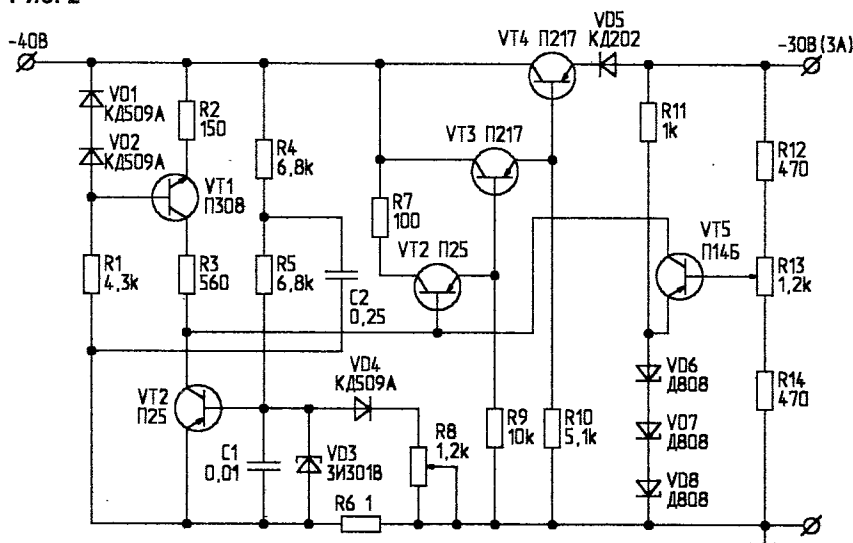
Затем стали появляться более совершенные транзисторы: П308, П605 и пр. Стала расти мощность усилителей, а вместе с ней и габариты радиаторов охлаждения выходных транзисторов УНЧ и стабилизатора. Возникли проблемы с самовозбуждением (транзисторы стали более высокочастотными), нередко приводившие к выжиганию мощных и дорогих транзисторов. Понадобилась быстродействующая защита от перегрузки по току.

Схема одного канала построенного мной в 1968 году двухканального усилителя приведена на **рис.1**. Усилитель на нагрузке 4 Ом отдавал 20 Вт и звучал отлично. Питался он от стабилизатора с электронной защитой на туннельном диоде (**рис.2**).

Наступил 1969 год. И тут я в журнале "Электроника" (был в СССР такой переводной американский журнал) на какой-то рекламной странице в номере, то ли 5, то ли 9, сейчас не помню, увидел схему УНЧ без всякого описания. Мощность — 50 Вт на 8-омной нагрузке, никаких стабилизаторов, двухполярное питание, нет громоздкого разделительного конденсатора и выходного трансформатора. Предел мечтаний!

Схема этого усилителя приведена на **рис.3**. Не правда ли, она знакома многим? Но кто же автор? Как можно узнать из [2], — все тот же Х.Лин! И предложил он ее, якобы, еще в 1956 году! Сомнительно, но не будем придирааться к автору работы [2], так как он посвятил анализу этой схе-

Рис. 2

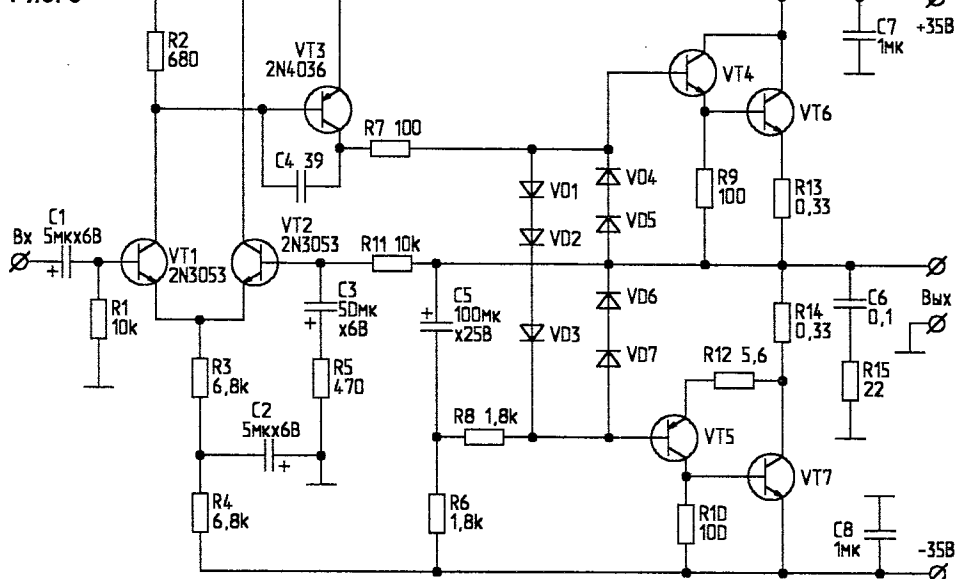


мы полкниги, описал и проанализировал работу многих усилителей мощности, привел массу полезных данных и указал на разработанную им в 1984 году схему УМЗЧ с параллельным высокочастотным каналом.

Но вернемся к схеме на **рис.3**. Я построил усилитель на ее основе в 1972 году. Некоторые решения позаимствовал из усилителя ES707 [4]. И этот макет стереоусилителя стоит у меня на полке до сих пор. Дорог как память! Схему усилите-

ля я дополнил защитой от больших токов в выходном каскаде собственной разработки. Схема окончательного варианта УМЗЧ показана на **рис.4**. Транзистор VT9 (МП25) контролирует ток через выходные транзисторы VT7 и VT8. При превышении его заданной величины срабатывает триггер на туннельном диоде VD5, и реле K1, K2 отключают питание усилителя. Кнопка SB1 сбрасывает триггер в исходное состояние.

Рис. 3

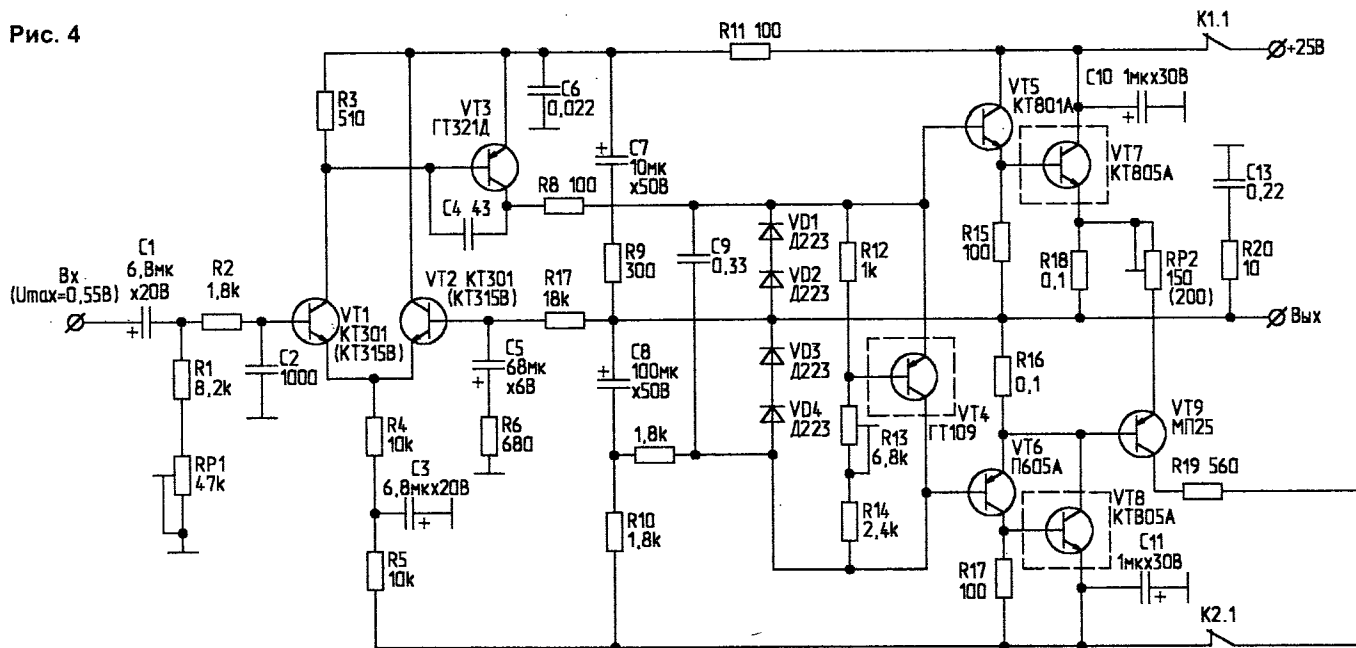


К сожалению, на выход “пролезают” заметные пульсации питающих напряжений, так что питать усилитель нужно от стабилизированного источника. Звучание и этого усилителя, и усилителя по рис.1 мне нравилось больше, чем лампового УНЧ радиолы “Симфония-2” — лучшего продукта советской промышленности в те годы.

ностью 50 Вт на канал, полагая, что таким путем я улучшу качество звуковоспроизведения. И это при объеме комнаты около 50 м³! Построенный усилитель имел двухполюсную коррекцию, не возбуждался, но его звук неожиданно оказался несколько “глуховат”, несмотря на достаточную скорость нарастания выходного напряжения.

призывал строить УМЗЧ только с однополюсной коррекцией, т.е. с наклоном АЧХ 6 дБ/октава. Без “волнистости”, “изломов”, “диполей” или “дублетов”. Цитирую: “Идеальный усилитель — один каскад усиления напряжения и бустер (оконечный усилитель) тока. Но, увы, это трудно осуществить”. Пример излишней сложности — усилитель

Рис. 4



А тут подоспели интегральные микросхемы, и я построил свой следующий усилитель — “Optronic-2475” [3]. Компактный и удобный, он работает до сих пор, с 1975 года! За все время ремонтировался три раза. Вышли из строя миниатюрная лампочка накаливания НСМ6,3-20 и фоторезистор СФЗ-1 в фотоэлектрическом тонкомпенсированном регуляторе громкости (узел оказался не очень надежным), а также транзистор ГТ310, да и то по недосмотру!

Эксплуатируя этот стереоусилитель долгое время, я заметил, что на большой мощности (24 Вт на канал на 8-омной нагрузке) звучание улучшается. Я стал подумывать о создании усилителя мощ-

В чем тут дело? Перечитывая замечательную книгу Д.Е.Полонникова [8], на стр.85 я обратил внимание на поведение операционного усилителя с изломами на АЧХ (диаграмме Боде). Другой автор, Н.Достал, в своей книге [9] на стр. 291 (в разделе “Частотный дублет”) подробно описывает вид переходного процесса ОУ с отрицательной обратной связью при наличии на АЧХ изломов (“диполей” или “дублетов”, как их называют разные авторы).

Что есть диполь? Это излом АЧХ, т.е. изменение ее наклона с 6 дБ/октава на 12 дБ/октава, и наоборот. Именно это наблюдается при двухполюсной коррекции! В статье [5] я

С.Агеева, там далеко не один каскад усиления напряжения, да и диаграмму Боде автор не приводит.

УМЗЧ должен хорошо усиливать звуковые сигналы. А в какой полосе? Еще в “дотранзисторную эру” (в 1947 году) знаменитый D.T.Williamson указал необходимую, по его мнению, полосу частот для высококачественного усилителя — 3,3 Гц...60 кГц (по уровню -3 дБ), которая дает минимальные фазовые сдвиги на краях слышимого диапазона. Фазовый набег не должен превышать 20° во всем диапазоне слышимых частот. Его усилитель — ламповый, трансформаторный, с отрицательной обратной связью.

Если мы зададимся полосой слышимых частот 20 Гц...20 кГц (это с запасом), то фильтр верхних частот (ФВЧ) первого порядка с частотой среза 2 Гц даст сдвиг фазы на 20 Гц примерно 5°. Соответственно, фильтр нижних частот (ФНЧ) первого порядка с частотой среза 200 кГц обеспечит фазовый сдвиг на 20 кГц те же 5°. Выскажу банальное предположение, что требования к однажды установленным границам с ростом качества воспроизведения могут неоднократно уточняться.

В УМЗЧ верхняя граница мало-сигнальной полосы пропускания может быть получена значитель-

Правда, современные электролитические конденсаторы не столь объемисты, как их недавние "предки", а вопрос об искажениях, которые возникают в конденсаторах, до сих пор не решен. Поэтому традиционное построение простых высококачественных усилителей по схеме Лина имеет право на жизнь [6].

В усилителях с ООС по напряжению полосу полной мощности, как известно из [7], можно определить из соотношения

$$U_{\text{вых. макс}} = \frac{V_u}{2\pi f_B},$$

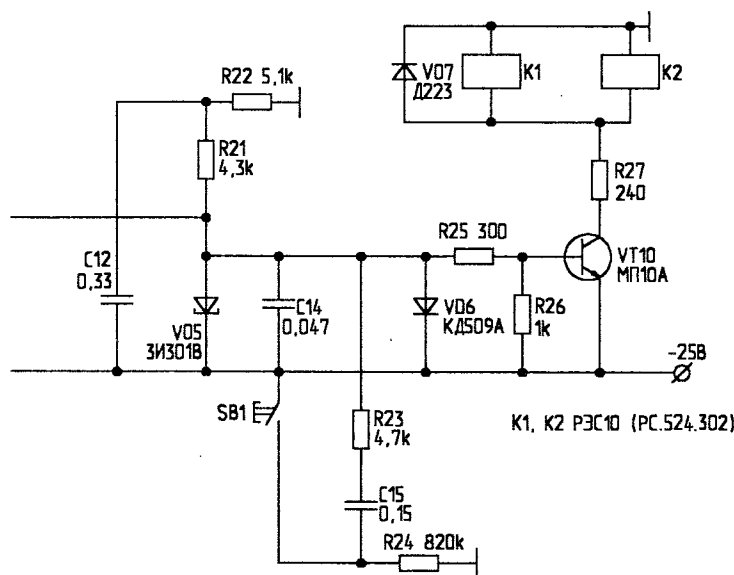
где V_u — скорость нарастания

скорости нарастания V_u :

$$\begin{aligned} V_u &= 2\pi f_B \cdot U_{\text{вых. макс}} = \\ &= 6,28 \cdot 19 \cdot 50 = \\ &= 596,6 \text{ (В/мкс)}. \end{aligned}$$

Для более "скромного" усилителя с $U_{\text{вых. макс}}=25$ В получаем $V_u=300$ В/мкс. Ограничив полосу входных сигналов значением 200 кГц, скорость нарастания можно существенно понизить — до 60 и 30 В/мкс.

В усилителях с токовой обратной связью V_u может быть очень большой, а полоса не связана с V_u . И диаграмма Бode у них однополюсная. Так, почти через 20 лет после появления усилителя М.Александера, я обратил на него свой взор. Захотелось сравнить звучание хороших усилителей с однополюсной диаграммой Бode и с двухполюсной, как у "Marantz PM-8". А где возьмешь?! Нет у меня усилителя с токовой ОС! Придется строить самому.



но выше 200 кГц, хотя это пока и не требуется. И нижняя граница может доходить практически до постоянного тока (т.е. $f_H=0$), что также, по-видимому, излишне. Хотя построение УМЗЧ по схеме усилителя постоянного тока (УПТ) заставляет обращаться к соответствующим схемам и методам, зато позволяет избавиться от громоздкого элемента — разделительного конденсатора большой емкости на выходе усилителя.

(отклика) выходного напряжения, В/мкс;

f_B — верхняя частота, МГц.

Глядя на это выражение, зададимся вопросом: что брать в качестве f_B — верхнюю границу полосы звуковых частот (20 кГц), полосу по контуру ООС или полосу единичного усиления f_1 ?

Автор работы [2] предлагает брать полосу по контуру ООС ($f_{\text{оос}}$). Тогда для усилителя с $U_{\text{макс}}=50$ В и $f_{\text{оос}}=1,9$ МГц он получает требуемую

Литература

1. И.Пугачев. 50 лет в строю УМЗЧ. — Радиомир, 2004, №8, С.9
2. Данилов А.А. Прецизионные усилители низкой частоты. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004.
3. И.Пугачев. Усилитель с "бородой", но... — Радиолюбитель, 2000, №11, С.3.
4. Hi-Fi Stereo Verstärker "ES 707". — Funk-Technik, 1971, №4, С.125.
5. И.Пугачев. Украдет ли усилитель "виртуальную глубину". — Радиолюбитель, 2000, №9, С.3.
6. И.Пугачев. УМЗЧ с "виртуальной глубиной" на трех транзисторах. — Радиомир, 2008, №10, С.3.
7. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы. — Сов.радио, 1974, С.109.
8. Полонников Д.Е. Операционные усилители. — М, 1983.
9. Достал Н. Операционные усилители. — М.: Мир, 1982.