

## ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

6

МОСКВА · 1988

### МОЩНЫЙ МАСШТАБНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ДАНИЛОВ А. А.

Описан масштабный усилитель с выходной мощностью 50 Вт при нагрузке 4 Ом, обеспечивающий уровень паразитных спектральных составляющих, обусловленных интермодуляцией, не более -80 дБ в полосе частот до 20 кГц, полосу пропускания 1 МГц, скорость нарастания выходного напряжения 100 В/мкс и векторную погрешность 0,1% на частоте 20 кГц при коэффициенте передачи 5 В/В.

Для проведения электроакустических, электромеханических и других экспериментальных исследований часто требуются мощные масштабные усилители постоянного тока, обеспечивающие максимально возможную линейность амплитудной, частотной и фазовой характеристик в диапазоне частот до 20 кГц, а также минимальный уровень паразитных спектральных составляющих при обработке сложных сигналов. Большое значение имеет и время установления выходного напряжения с заданой погрешностью от установившегося значения, если

ток нагрузки изменяется скачкообразно или входное напряжение усилителя носит импульсный характер.

На основании проведенных исследований [1, 2] можно утверждать, что основной проблемой, возникающей при построении мощных масштабных усилителей повышенной точности, является подавление интермодуляционных искажений, которые определяются присутствием в выходном сигнале усилителя паразитных спектральных составляющих — продуктов перемножения сигналов, а также их гармоник.

По природе возникновения интермодуляционные искажения можно условно подразделить на следующие: 1) тепловые; 2) обусловленные нелинейностью амплитудной характеристики разомкнутого (т. е. без отрицательной обратной связи (о.о.с.)) усилителя; 3) связанные с нарушением условия динамической линейности [3] замкнутого (т. е. охваченного о.о.с.) усилителя.

Если выполняется условие динамической линейности

$$V_m \geq 2\pi U_{\text{вых макс}} f_{\text{ср оос}}$$

где  $V_m$  — скорость нарастания выходного напряжения,  $U_{\text{вых макс}}$  — максимальное выходное напряжение,  $f_{\text{ср оос}}$  — частота среза усилителя по основному контуру о.о.с., то значение паразитной спектральной составляющей в выходном сигнале усилителя с выходным каскадом, работающим в классе В или АВ, можно оценить при помощи следующего выражения:

$$U_n \approx \frac{2\pi U_{\text{вых}} f (U_0 + 2I_n r_0)}{V_m (K_{f \text{ оос}} + 1)}$$

где  $U_{\text{вых}}$  — выходное напряжение,  $U_0$  — зона нечувствительности,  $f$  — частота входного синусоидального сигнала,  $K_{f \text{ оос}}$  — глубина о.о.с. на данной частоте,  $I_n$  — амплитуда тока нагрузки,  $r_0$  — эквивалентное сопротивление в цепи эмиттера мощного транзистора.

Если условие динамической линейности не выполняется, то при оценке глубины о.о.с. в знаменателе вышеприведенного выражения следует положить равной нулю.

Кроме того, интермодуляция второго типа возникает в следующих случаях: во входном дифференциальном каскаде усилителя, который (для биполярных транзисторов) имеет нелинейную передаточную характеристику кубического типа [1]; при реализации усилителя по схеме с последовательной о.о.с. из-за нелинейной зависимости коэффициента ослабления синфазного сигнала от синфазного напряжения и частоты сигнала; в любом каскаде усиления напряжения, так как модуляция тока коллектора при изменении напряжения на переходе имеет в первом приближении кубический характер, а емкость коллекторного перехода зависит от напряжения на нем в степени  $1/2$ .

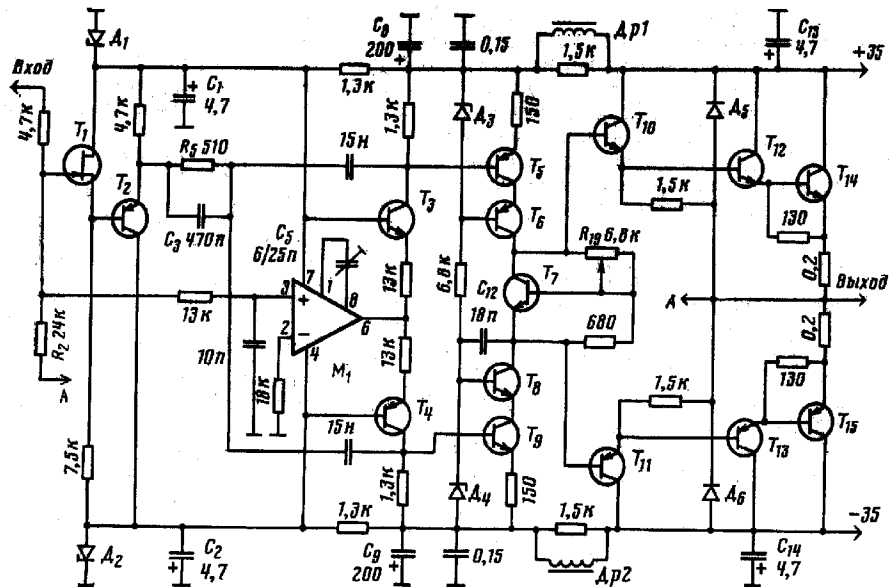
В высоковольтных (предокопных) каскадах усиления напряжения эти явления усугубляются тепловой инерционностью транзисторов [1, 2], а также появлением соответствующего ей дополнительного фазового сдвига на частотах 40 — 150 Гц.

Тепловые явления особенно ярко проявляются при исследовании переходных процессов в масштабных усилителях постоянного тока

(любой мощности), так как они вызывают значительное (в 5 — 10 раз по сравнению с расчетным значением) затягивание времени установления в зоне погрешностей менее 1% от установившегося значения выходного напряжения. Установлено, что при реализации оптимальной для мощного масштабного усилителя «двухполосной» амплитудно-частотной характеристики (а.ч.х.) время установления выходного напряжения с погрешностью 1% от установившегося значения не должно превышать  $5f_{\text{ср оос}}^{-1}$  при отсутствии колебательности и резких изломов переходной характеристики (перерегулирование определяется указанной формой а.ч.х.).

В результате исследований выработаны следующие практические рекомендации по построению мощных масштабных усилителей повышенной точности, позволяющие при их учете минимизировать уровень паразитных спектральных составляющих, обусловленных интермодуляцией, а также реализовать приемлемое значение времени установления усилителя в зоне малых погрешностей: для мощного масштабного усилителя наиболее целесообразной является инвертирующая структурная схема с параллельным высокочастотным каналом усиления [4]; так как любые изменения напряжения питания усилителя являются для каскадов усиления напряжения паразитным синфазным сигналом, следует максимально подавить их воздействие при помощи стабилизирующих и фильтрующих элементов во всех токозадающих цепях; все усилительные каскады и генераторы тока необходимо строить по каскадным схемам.

С учетом изложенных соображений и рекомендаций было реализовано несколько вариантов мощных масштабных усилителей. Параметры усилителя типа УМВТ50-84 следующие: номинальное выходное напряжение  $\pm 20$  В; номинальное активное сопротивление нагрузки 4 Ом; полоса пропускания 1 МГц; полоса пропускания при номинальной выходной мощности 100 кГц; скорость нарастания выходного напряжения (измеренная на импульсном сигнале со скважностью 5) 100 В/мкс; время установления выходного напряжения 10 В с погрешностью 1% от установившегося значения — 2 мкс; векторная погрешность на частоте 20 кГц при выходной мощности 27 Вт не более 0,1%; уровень паразитных спектральных составляющих всех видов не более -80 дБ (коэффициент гармонических и интермодуляционных искажений  $< 0,01\%$ ); коэффициент передачи  $\approx 5$  В/В; приведенное ко входу напряжение шума от пола до пика в полосе 0,01 — 10 кГц — 50 мкВ; статические параметры усилителя определяются микросхемой К153УД2.



Принципиальная схема усилителя.  $M_1$  — К153УД2;  $T_1$  — КП307А,  $T_2$  — КТ326Б,  $T_3, T_7, T_9$  — КТ315Г,  $T_4, T_5$  — КТ361Г,  $T_6$  — КТ639Д,  $T_8$  — КТ630А,  $T_{10}$  — КТ3102А,  $T_{11}$  — КТ313А,  $T_{12}$  — КТ602БМ,  $T_{13}$  — КТ626В,  $T_{14}$  — КТ8149ГМ,  $T_{15}$  — КТ8148ГМ;  $D_1, D_2$  — КС515А,  $D_3, D_4$  — КС139А,  $D_5, D_6$  — КД212А;  $C_1, C_2, C_{13}, C_{14}$  — К53-16,  $C_3, C_4$  — К50-16,  $C_5$  — КПК-М;  $R_{19}$  — СП5-2; дроссели — ДМ0, 5-500 мкГн

Усилитель УМВТ50-84, схема которого приведена на рисунке, реализован по схеме с параллельным высокочастотным каналом усиления. Высокочастотный канал выполнен с использованием двух последовательно включенных широкополосных повторителей напряжения: истокового ( $T_1$ ) и эмиттерного ( $T_2$ ). Низкое выходное сопротивление этого канала необходимо для обеспечения быстрого перезаряда емкостей в точках суммирования сигналов параллельных каналов (базы транзисторов  $T_5$  и  $T_9$ ), а следовательно, и высокой скорости нарастания. Конденсаторы  $C_6$  и  $C_7$  обеспечивают развязку параллельных каналов по постоянному току.

Низкочастотный канал реализован на операционном усилителе (о.у.)  $M_1$  и транзисторах  $T_3, T_4$ , включенных по схеме с общей базой. Подстроечным конденсатором в цепи коррекции о.у. устанавливается максимально возможная глубина о.е.е. всего усилителя на частоте 20 кГц, но при этом время установления должно удовлетворять приведенному выше соотношению. Размах выходного напряжения  $M_1$  не превышает 0,5 В на частоте 20 кГц при номинальной выходной мощности усилителя, поэтому ограничения по скорости нарастания выходного напряжения о.у. не происходит.

Стабилизация  $M_1$  по постоянному току обеспечивается общей параллельной о.о.с. усилителя через резистор  $R_2$ . Напряжение смещения и дрейф усилителя полностью определяются соответствующими параметрами  $M_1$ , так как ток затвора  $T_1$  более чем на порядок меньше входного тока данного о.у.

Фазовый сдвиг, вносимый  $M_1$  на высоких частотах, компенсируется высокочастотным каналом усиления, поэтому а.ч.х. усилителя в районе частоты среза определяется в основном параметрами единственного широкополосного каскада усиления напряжения ( $T_5, T_6, T_8, T_9$ ), что позволило реализовать необходимый запас устойчивости усилителя и высокое значение частоты среза по основной контуру о.о.с. Высокочастотный усилитель напряжения выполнен по каскодной схеме, что обеспечило значительный коэффициент усиления ( $>10^3$ ) в широкой полосе частот и подавление интермодуляции. Конденсатор  $C_{12}$  совместно с емкостями коллектор — база транзисторов  $T_6, T_8$ , входной емкостью усилителя тока, а также форсирующей цепью  $R_5, C_3$  в высокочастотном канале формирует а.ч.х. усилителя на высоких частотах.

В цепи питания каскадов усиления напряжения включены достаточно эффективные пас-

сивные фильтры и параметрические стабилизаторы напряжения для высокочастотного канала, о.у. и для фиксации напряжения на базах  $T_3, T_4$ . Низкочастотные пульсации в цепи питания высоковольтного каскада не подавляются фильтрами, но они не приводят к изменению рабочего тока (а следовательно, к появлению интермодуляции), так как режим работы каскада стабилизирован низкочастотным каналом усиления.

Выходной усилитель тока ( $T_{10} + T_{15}$ ) реализован по классической схеме. Начальный ток выходных транзисторов ( $< 50$  мА) устанавливается переменным резистором  $R_{19}$ . При работе на нагрузку с емкостной составляющей  $> 300$  пФ последовательно с выходом усилителя необходимо включать разделительный дроссель ( $10 + 30$  мкГн), зашунтированный резистором  $5 + 20$  Ом. Транзисторы  $T_{12}, T_{13}$  снабжены теплоотводами площадью 20 см<sup>2</sup>, а

$T_{14}, T_{15}$  — 800 см<sup>2</sup>. Усилитель выполнен на печатной плате из стеклотекстолита размером  $160 \times 100$  мм<sup>2</sup>. Применение гетинакса или текстолита недопустимо ввиду неудовлетворительных диэлектрических свойств этих материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов А. А., Полонников Д. Е. // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. М.: Радио и связь, 1983. Вып. 7. С. 401.
2. Лисницкий А. М. // Опыт, результаты, проблемы: повышение конкурентоспособности радиоэлектронной аппаратуры. Таллин: Валгус, 1985. Вып. 3. С. 66.
3. Данилов А. А., Полонников Д. Е. // Автоматика и телемеханика. 1982. № 10. С. 159.
4. Полонников Д. Е. Операционные усилители: принципы построения, теория, схемотехника. М.: Энергоатомиздат, 1983.

Институт проблем управления, Москва  
Поступила в редакцию 14.IX.1987