



ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Качество усилителей мощности ЗЧ оценивают обычно несколькими основными, наиболее важными параметрами: номинальным диапазоном частот (как правило, по уровню — 3 дБ), коэффициентом гармоник и скоростью нарастания выходного напряжения. Значительно реже пользуются коэффициентом интермодуляционных искажений, выходным сопротивлением и т. п. характеристиками.

Считается, что набор указанных параметров достаточно полно характеризует качество усилителей мощности. Что касается норм на эти параметры, то здесь в последнее время намечались два основных направления. Сторонники одного из них считают, что необходимо совершенствовать аппаратуру практически беспридельно, и создают, исходя из этого, ультранизкие усилители с коэффициентом гармоник порядка десятитысячных долей процента, усилители со скоростью нарастания выходного напряжения несколько сотен вольт в микросекунду. Сторонники другого направления вполне резонно отмечают, что качество звучания зависит от характеристик эсхз звена звуковоспроизводящего тракта и определяется тем из них, которое имеет наихудшие параметры [1]. Исходя из этой предпосылки, они считают допустимым коэффициент гармоник 0,3...1 %, а скорость нарастания выходного напряжения либо вовсе не нормируют, либо ограничивают не сравнительно невысоким значением 1...2 В/мкс. Основанием для таких норм являются стандартизированные параметры основных источников сигнала — проигрывателей и магнитофонов. Известно, например, что даже студийные магнитофоны могут иметь коэффициент гармоник до 1...2 % [1].

Практика работы со звуковоспроизводящими установками показывает, что усилители с примерно одинаковыми параметрами (полосой рабочих частот, коэффициентом гармоник, скоростью нарастания выходного напряжения) при субъективной оценке «звучат»

по-разному (естественно, при использовании одних и тех же источников сигнала и акустических систем). В некоторых случаях разницу в звучании обуславливают такие параметры, как коэффициент демпфирования, динамический диапазон и т. п., в других — «микронелинейность» амплитудной характеристики, вызванная, например, самовозбуждением на высоких частотах [2]. Во многих случаях разницы в звучании не находит удовлетворительного однозначного объяснения и не подтверждается объективными измерениями. Из этого можно сделать, по крайней мере, два вывода:

— на качество звуковоспроизводящего тракта влияет один или несколько еще малоизученных параметров усилителя мощности, поэтому судить о его качестве можно только по результатам субъективной (обязательно квалифицированной!) экспертизы, сопоставляя звучание вновь разработанного усилителя со звучанием некоего-либо хорошо изученного высококачественного, принятого за эталон;

— нет смысла беспридельно улучшать такие объективные показатели усилителя мощности, как полоса рабочих частот, скорость нарастания выходного напряжения и т. п. Эти параметры имеют вполне определенные пороговые значения, и дальнейшее их улучшение не влияет на субъективное восприятие фонограммы.

Каковы же пороговые значения основных параметров? Естественно, они зависят от характеристик акустической системы, источника сигнала и т. д. Оценим пороговые значения скорости нарастания выходного напряжения, коэффициента гармоник и рабочего диапазона частот для звуковоспроизводящего тракта, состоящего, например, из громкоговорителей 35АС-1 или им подобных, усилителя мощности и проигрывателя, реализующего характеристику грампластинки по ГОСТу 7893—72, или студийного магнитофона с параметрами, приведен-

ными в [1]. Для нормальной работы указанных громкоговорителей усилитель должен развивать мощность не менее 50 Вт на нагрузку сопротивления 4 Ом. При такой мощности выходное напряжение $U_{max} = \sqrt{P_{max} R_n} = \sqrt{50 \cdot 4} = 14,14$ В, что соответствует амплитудному значению 20 В. Будем считать, что спектр фонограммы, не спадая, простирается до частоты 20 кГц, что представляется вполне достаточным. Следовательно, верхняя частота полосы пропускания сигнала максимальной амплитуды для рассматриваемого усилителя может быть принята равной 20 кГц. (Малосигнальная полоса пропускания усилителя при этом может быть значительно шире). Минимальную скорость нарастания выходного напряжения, обеспечивающую требуемую полосу пропускания сигнала максимальной амплитуды 20 В можно определить как максимум производной от напряжения гармонического сигнала частотой 20 кГц:

$$\begin{aligned} v_{U_{min}} &= (dU_{max} / dt)_{max} = \\ &= [d(U_{max} \sin 2\pi f_{max} t) / dt]_{max} = \\ &= U_{max} 2\pi f_{max} = 20 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 10^3 = \\ &= 2,5 \text{ В/мкс.} \end{aligned}$$

При таком значении параметра v_U

выходное напряжение усилителя возрастает от нуля до максимальной амплитуды за 6 мкс. Для сравнения отметим, что в усилителе со скоростью нарастания выходного напряжения 100 В/мкс это время равно 0,2 мкс. Маловероятно, чтобы реальные источники сигналов (даже электронные синтезаторы) могли сформировать музыкальные переходы с такими фронтами, и еще менее вероятно, чтобы громкоговорители их воспроизвели.

Сложнее оценить пороговое значение коэффициента гармоник, который, как уже отмечалось, у основных источников сигнала может достигать 1...1,5 %. Однако, по мнению автора, это не вполне достаточное основание считать допустимым для высококачественного усилителя мощности коэффициент гармоник 0,2...0,6 %. Более логично установить норму на этот параметр усилителя исходя из того, что все побочные компоненты выходного сигнала, обусловленные нелинейностью его амплитудной характеристики (т. е. нелинейные и интермодуляционные искажения) либо вовсе не должны восприниматься на слух, либо должны лежать ниже нижней границы динамического диапазона, на уровне собственных шумов (фона) усилителя. Очевидно, что в этом случае пороговое значение коэффициента гармоник усилителей высокого класса должно составлять примерно

—70 дБ, т. е. около 0,03 %, что близ-
ко к норме, приведенной в [3].

Особо нужно подчеркнуть, что коэф-
фициент гармоник высококачественно-
го усилителя мощности не должен
превышать порогового значения на всем
диапазоне звуковых частот, т. е. по
крайней мере, до частоты 20 кГц.

Что касается малосигнальной поло-
сы пропускания усилителя мощности,
то ее влияние не столь существен-
но, как рассмотренных выше парамет-
ров. Действительно, задав полосу про-
пускания сигнала волной амплитуды,
мы тем самым устанавливаем диапа-
зон частот, за пределами которого
начинается спад АЧХ при больших
сигналах (как, иными словами, умень-
шается максимальная амплитуда не-
искаженного сигнала). Однако спектр
входного сигнала в этой области спада-
ет достаточно быстро, поэтому сколько-
нибудь заметные частотные искажения
отсутствуют.

Уже отмечалось, что многие нели-
нейные искажения и высокая скорость
роста выходного напряжения необхо-
димы, но еще недостаточны для
высококачественного звуковоспроизве-
дения. Что же требуется еще?

В обычном усилителе мощности
эффективность ООС, благодаря которой
обеспечиваются высокие значения ос-
новных параметров, падает с ростом
частоты. Графически это показано на
рис. 1, где заштрихованная область
характеризует эффективность ООС
(граничные частоты полосы пропус-
кания усилителя без ООС и с ООС обо-
значены соответственно f_1 и f_2). На
высших частотах полосы пропускания и
тем более за ее пределами парамет-
ры обычного усилителя мощности ухуд-
шаются, в частности, возрастает уро-
вень искажений. К тому же они в
этой области частот значительно ва-
риативнее, так как хуже маскируются
полезным сигналом (в реальных фо-
нограммах вблизи границы полосы про-
пускания спектр сигнала спадает).
В результате наблюдается явление,
которое разные авторы называют ко-
разному (хриплость, призвуки, отсутст-
вие прозрачности звучания, несчаст-
ствие звучание и т. д.), но снача-
ет она одно и то же: ухудшение
звучания на высших частотах. Чтобы
как-то поправить положение, часто
просто поднимают уровень высших ча-
стот регулятором тембра. При этом
амплитуды высокочастотных компонен-
тов полезного сигнала увеличивается,
а среднечастотных, которые порожда-
ют гармоники, лежащие вблизи верх-
ней границы полосы пропускания,
остается практически неизменной. В ре-
зультате гармоники в области высших
частот маскируются полезным сигна-
лом и субъективно звучание высших

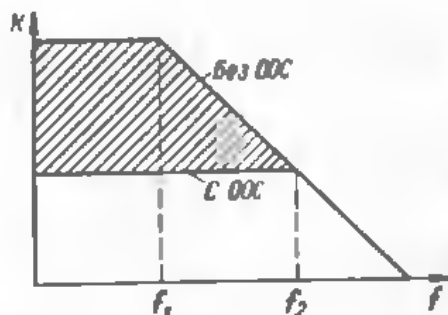


Рис. 1

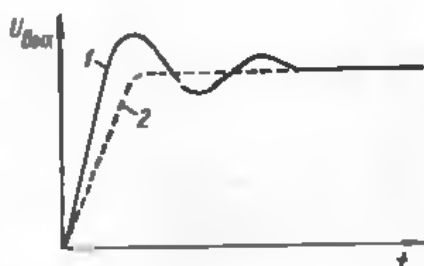


Рис. 2

частот улучшается. Гармоники высо-
кочастотных компонентов усиленного си-
гнала лежат за пределами звуково-
го диапазона, порожденные ими интер-
модуляционные продукты хорошо ма-
свируются более мощными среднечастот-
ными составляющими сигнала, поэто-
му подъем усиления на высших
частотах дает эффект улучшения каче-
ства звуковоспроизведения. В высоко-
качественном усилителе уровень гар-
моник меньше, и они могут маси-
роваться без подъема АЧХ в обла-
сти высших частот. Сказанное объяс-
няет тот факт, что одинаковое, субъ-
ективно сбалансированное по тембру
звучание в разных усилителях полу-
чается при различных положениях
регуляторов тембра.

Очевидно, что для снижения уровня
искажений на высших частотах необ-
ходимо увеличивать либо частоту f_1 ,
что чревато потерей устойчивости, ли-
бо общую глубину ООС, что, в свою
очередь, может вызвать динамические
искажения.

Однако существуют способы сниже-
ния искажений на высших частотах,
не связанные с использованием ООС.
Один из них, получивший название
«feedforward error correction» (коррек-
ция искажений с использованием пря-
мой связи), применен в промышлен-
ном усилителе «Кход 405» [4]. Этот
способ снижения искажений подробно
описан в [5], здесь же отметим толь-
ко, что его схема реализации
проста, а эффект компенсации иска-
жений на высших частотах хорошо
выражен.

Несомненно, что на качество зву-
ковоспроизведения влияет форма ФЧХ
тракта. В диапазоне звуковых частот
ФЧХ должна быть линейной, ее форма
не должна зависеть от амплитуды
входного сигнала. Этот вопрос изучен
пока недостаточно, поэтому установить
какие-либо нормы на ФЧХ не пред-
ставляется возможным, хотя очевидно,
что необходимо принимать меры по ее
линеаризации.

Одной из важнейших для любого
усилителя является переходная харак-
теристика, т. е. его реакция на ска-
чок входного напряжения. Два воз-
можных вида переходной характери-
стики изображены на рис. 2. Одна из
них (кривая 1) отличается большей
скоростью нарастания выходного на-
пряжения и колебательным характером
его установления, другая (кривая 2) —
меньшей скоростью нарастания, отсут-
ствием выброса на фронте и монотон-
ным характером установления на-
пряжения. Очевидно, что характеристика
1 нежелательна, так как любой
скачок входного напряжения в этом
случае сопровождается паразитными
колебаниями диффузора громкогово-
рителя.

При экспериментах с усилителями
мощности неожиданно выяснилось, что
качество звучания существенно зави-
сит от характеристик блока питания.
Если один и тот же усилитель пи-
тать вначале от нестабилизированно-
го источника с достаточно большой
емкостью фильтра, а затем — от ста-
билизированного, то по второму слу-
чае качество звучания, оцененное
субъективно, улучшается как на низ-
ших, так и на высших частотах.
Вероятно, «просадка» напряжения на
линиях сигнала, неизбежная в нестаби-
лизированном блоке питания, вносит
свою лепту в ухудшение качества
звучания, несмотря на большой по-
эффициент подавления флуктуаций пи-
тающих напряжений, свойственный
всем современным усилителям.

На качество звуковоспроизведения
в известной мере влияет и стабиль-
ность режимов транзисторов выходно-
го каскада, в частности, его тока
покоя. Поскольку стабилизация тока
покоя — довольно сложная зада-
ча [6], наиболее предпочтительными
для повторения следует считать усил-
тели с выходными каскадами, рабо-
тающими в режиме В.

Резюмируя все сказанное выше,
можно сформулировать следующие ос-
новные требования к усилителю мо-
щности современного высококачествен-
ного звуковоспроизводящего комплек-
са. Диапазон частот при выходном
напряжении, соответствующем номи-
нальной выходной мощности, должен
быть не уже 20...20 000 Гц, коэффи-
циент гармоник в этом диапазоне — не

более 0,03 %, скорость нарастания выходного напряжения — не менее 2,5 В/мкс. Переходная характеристика усилителя должна быть гладкой (без выбросов), а ФЧХ — линейной во всем звуковом диапазоне частот.

При проектировании описываемого ниже усилителя за основу был взят уже упоминавшийся «Кюд 405» [4, 5], удачно сочетающий в себе высокие технические характеристики и схемную простоту. Структурная схема усилителя в основном осталась неизменной, исключены лишь устройства защиты транзисторов выходного каскада от перегрузки. Практика показала, что устройства такого рода не исключают полностью отказов транзисторов, но вносят нелинейные искажения при максимальной выходной мощности. Ток же транзисторов можно ограничить иначе, например, используя защиту от перегрузки по току в стабилизаторах

напряжения. В то же время представляется целесообразной защита громкоговорителей при выходе из строя усилителя на источнике питания.

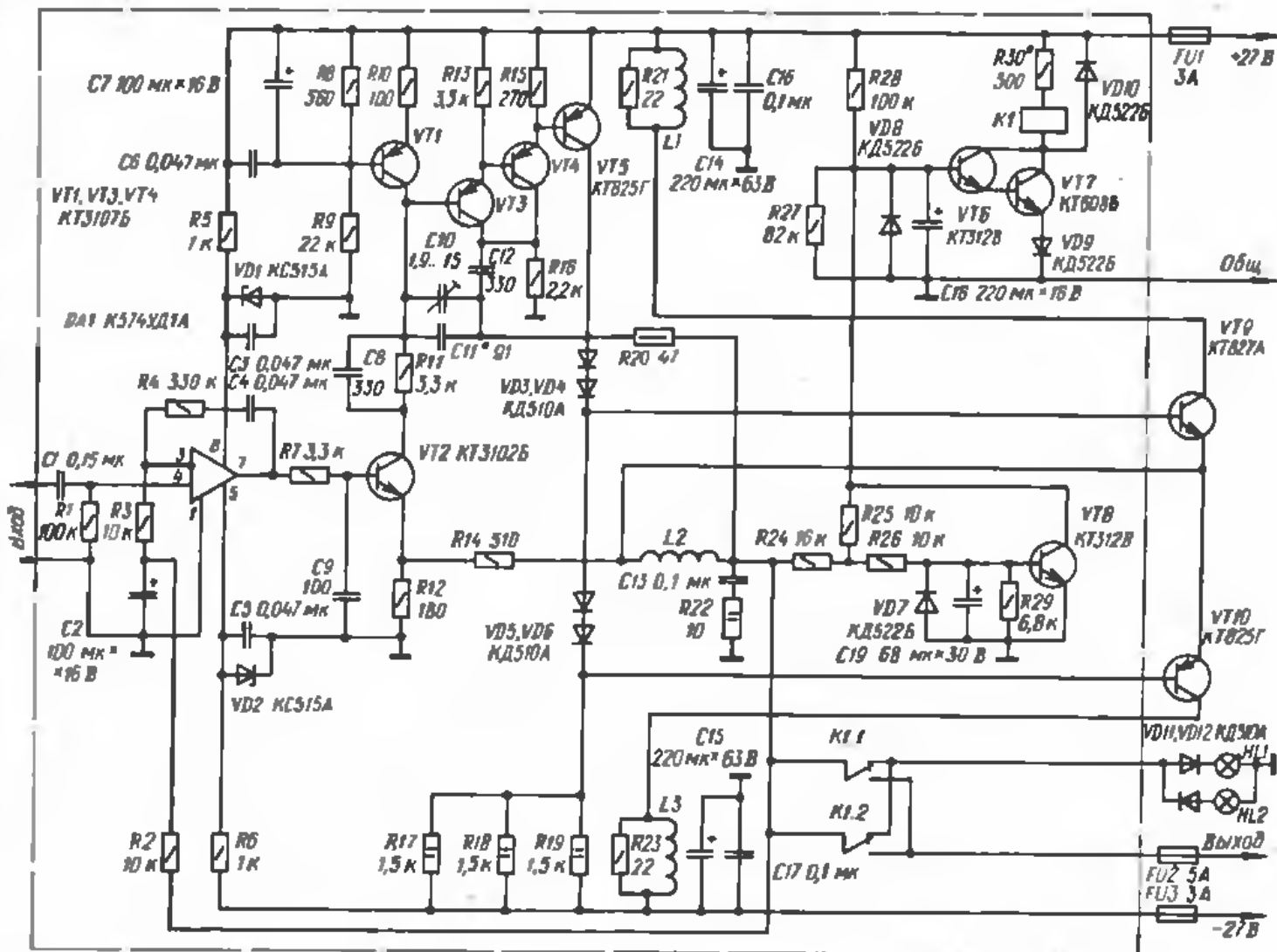
Для улучшения симметрии усилителя выходной каскад выполнен на комбинированной паре транзисторов (рис. 3). Учитывая, что основные параметры усилителя улучшаются с ростом коэффициента передачи тока $h_{21э}$, в выходном каскаде применены составные транзисторы КТ827А (VT9) и КТ825Г (VT10), в оконечном каскаде линейного усилителя (VT5) — составной транзистор КТ825Г. Для уменьшения нелинейных искажений типа «ступеньки» между базами транзисторов VT9, VT10 включены диоды VD5 и VD6. При этом обеспечивается достаточно надежное закрытие транзисторов выходного каскада в отсутствие сигнала.

Незначительно изменена входная

цепь. В качестве сигнального использован неинвертирующий вход ОУ DA1, что позволяло увеличить входное сопротивление усилителя (оно определяется сопротивлением резистора R1 и равно 100 кОм). Если большое входное сопротивление не требуется, входную цепь лучше выполнить в соответствии с [5]. Входное сопротивление при этом уменьшится до 22 кОм, но усилитель станет инвертирующим и менее склонным к самовозбуждению при возникновении обратной связи между его выходом и входом (эта связь будет отрицательной). Следует, однако, отметить, что и в неинвертирующем варианте устойчивость усилителя остается высокой.

Для предотвращения щелчков в громкоговорителях, обусловленных переходными процессами при включении питания, а также для защиты громкоговорителей от постоянного напряжения

Рис. 3



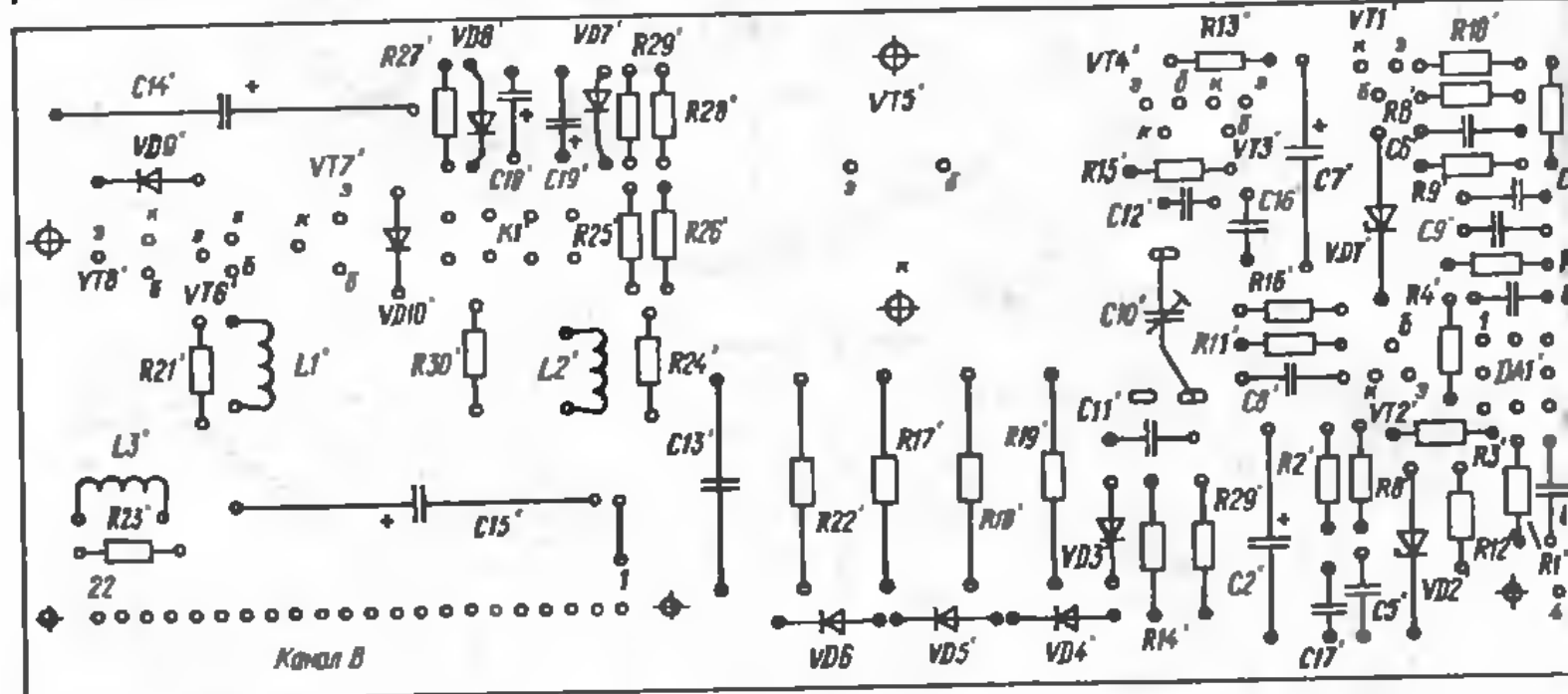
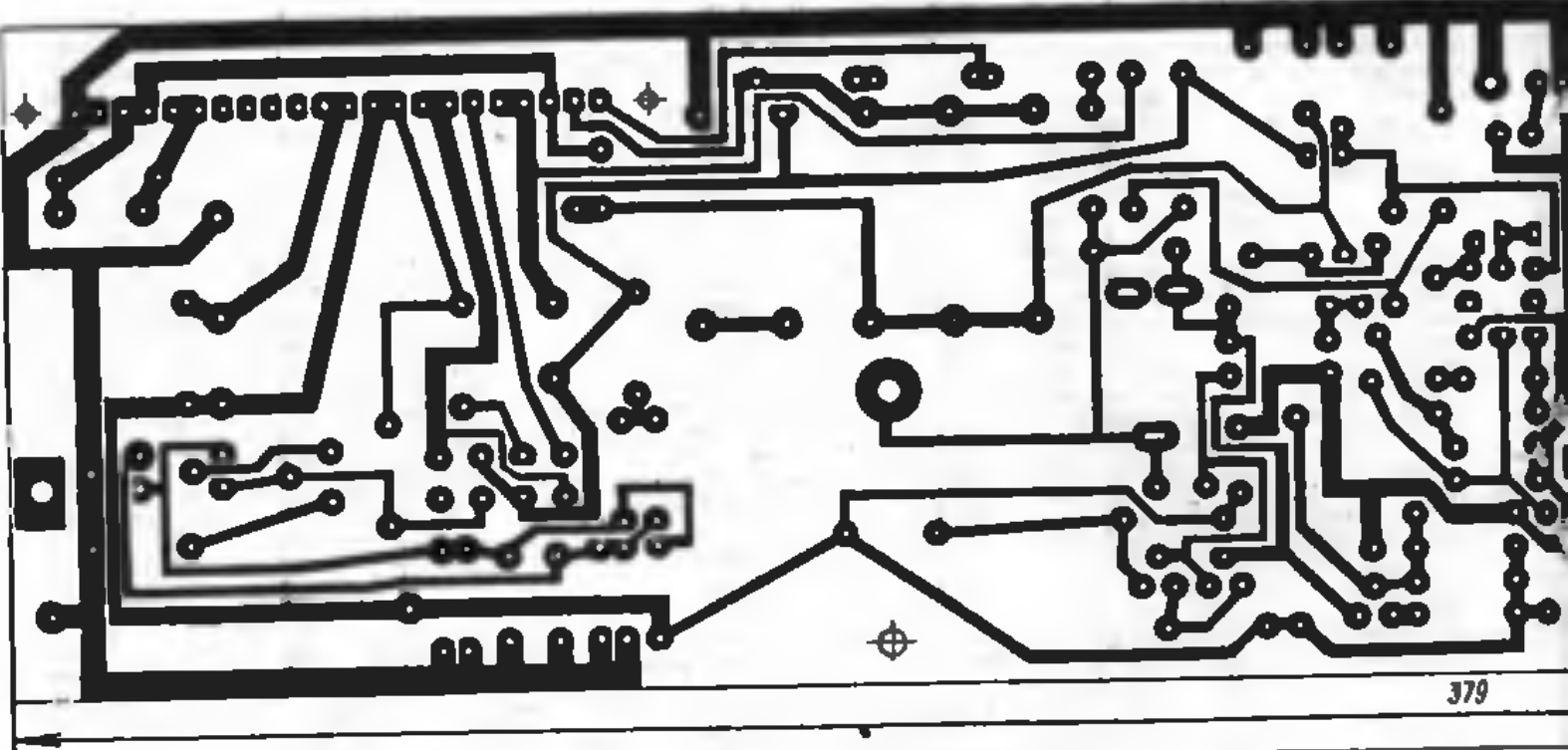
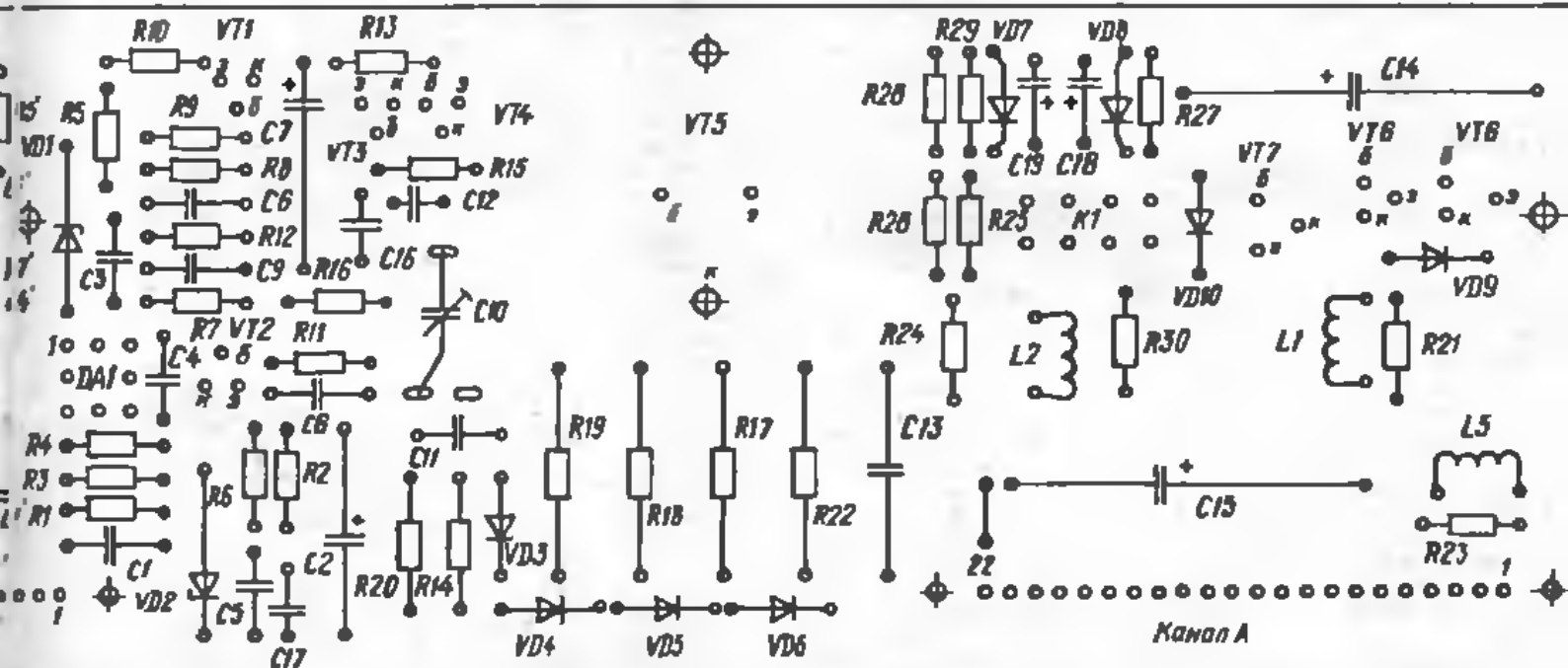
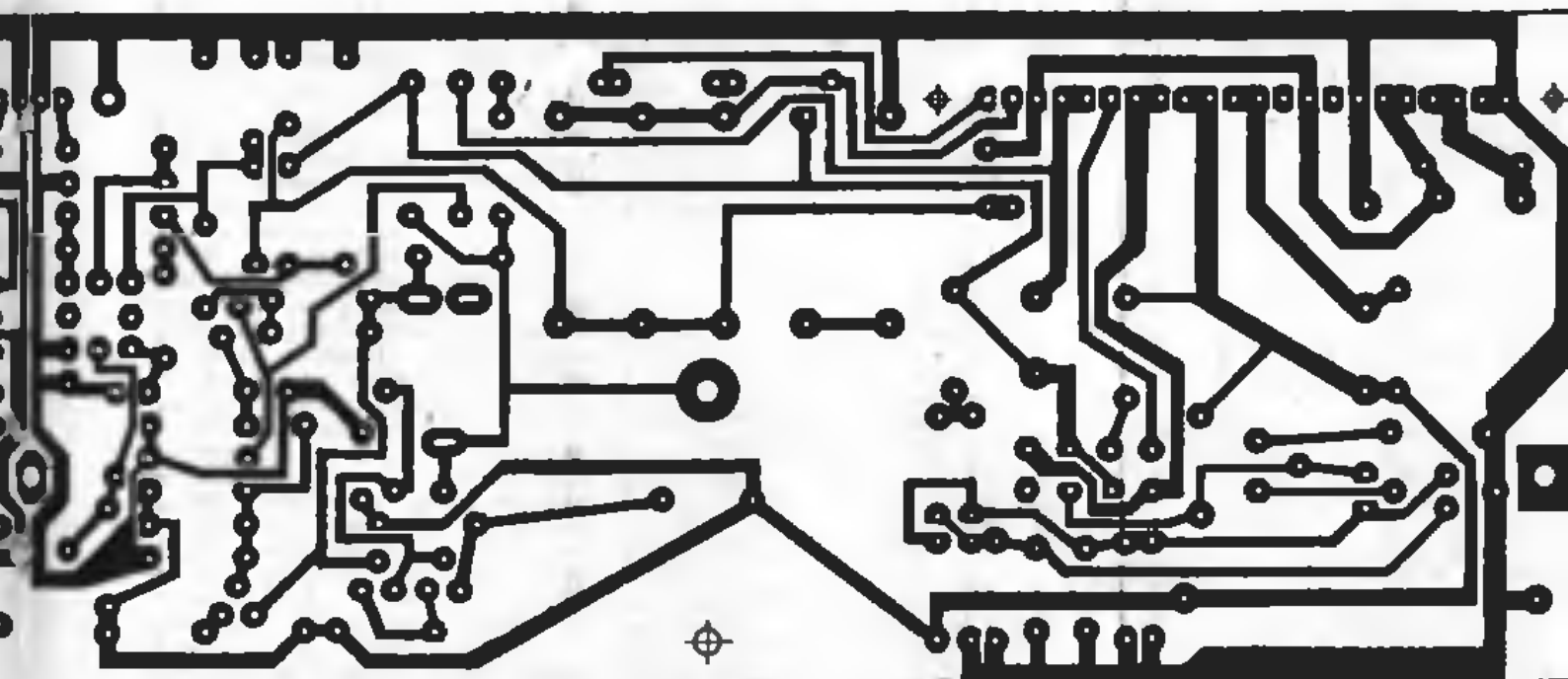


Рис. 4

ния при выходе из строя усилителя или источников питания применено простое, хорошо зарекомендовавшее себя устройство (VT6—VT8), используемое в промышленном усилителе «Бриг-001». При срабатывании этого устройства загорается одна из ламп HL1, HL2, сигнализируя о наличии

на выходе усилителя постоянного напряжения той или иной полярности. В остальном схема описываемого усилителя не отличается от схемы усилителя «Квод 405». Печатная плата усилителя (на рис. 4 приведен ее чертеж для стереофонического варианта) изготовлена из фоль-

гированного стеклотекстолита толщиной 2 мм. Все цепи каналов полностью разделены. Как показала проверка, это облегчает достижение низкого уровня фона, уменьшает проникание сигнала из канала в канал. Из этих же соображений рекомендуется каждый из каналов усилителя



питать от отдельного двуполярного стабилизированного источника.

Для соединения с внешними цепями применены два стандартных разъема МРН: через один из них (МРН4-1) поступают входные сигналы, через другой (МРН22-1) подключаются транзисторы выходных каскадов, источники

питания и громкоговорители. Разводка цепей по контактам разъемов приведена в таблице.

Остальные детали следующих типов: резисторы — МЛТ, конденсаторы — КМ-86 (C1, C3—C6, C8, C9, C11, C12, C16, C17), МБМ (C13), К50-29 (C14, C15), К53-16 (C18, C19), К53-18

(C2, C7), подстроечные конденсаторы КТ2-19, реле РЭС-48А [паспорт РС4.590.201 (К1)]. Катушки намотаны проводом ПЭВ-2 1,0 из керамики диаметром 10 мм и содержат L1 и L3 — по 50 витков (индуктивность — 5,7 мкГн), L2 — 30 витков (3 мкГн).