

## Усилитель мощности с токовой ООС LYNX9

Усилитель, упрощенный вариант которого рассмотрен ниже, был разработан мною для совместной работы с низкочувствительной акустикой (например, Dynaudio), как альтернатива ламповым усилителям с выходной мощностью более 30 Вт. Созданная в результате конструкция оказалась удачной как с точки зрения качества звучания, так и по отношению цена/качество. Многочисленные сравнения комплекта из двух моноблоков, выполненных по приведенным схемам с самодельными и промышленными ламповыми усилителями (источник сигнала - DAC "Lynx 7" + транспорт CEC 5100, акустические системы Dynaudio Contour 1.3) позволили сделать вывод, что принятая за основу идеология и схемотехника усилителей мощности позволяет создавать аппараты ни в чем не уступающие (в т.ч. субъективно) ламповым, и в то же время значительно меньшие по габаритам и тепловыделению. Звучание новых усилителей отличают свойственные лампам «деликатность» и «мягкость» и явно полупроводниковые «динамичность» и «точность». Кроме того, аппараты обладают «тихим» и «ненавязчивым» голосом, позволяя вести беседу на фоне музыки даже при 50 Вт выходной мощности. (Для сравнения скажу, что подобные свойства у усилителя на TDA 7294 (сделанного мною для дачи) сохранялись лишь до 3-5 Вт, а у Gryphon Tabu - до 15-20 Вт).

Изготовленный экземпляр усилителя обладал следующими техническими характеристиками:

1. Номинальная выходная мощность на нагрузке 8 Ом, Вт	84
2. Номинальная выходная мощность на нагрузке 4 Ома, Вт	160
3. Динамическая выходная мощность на нагрузке 2 Ома, Вт (в течение 5 с)	314
4. Номинальный диапазон частот при неравномерности АЧХ +0/-3 дБ (без входного фильтра ВЧ-помех), Гц	0 - 500000
5. Скорость нарастания выходного напряжения (с цепями коррекции АЧХ, без входного фильтра ВЧ-помех), В/мкс	265
6. Время установления выходного напряжения, нс	менее 70
7. Коэффициент нелинейных искажений при номинальной выходной мощности на нагрузке 4 Ома и частоте сигнала 10 кГц, %	0,036
8. Глубина общей ООС, дБ	14

Для измерения параметров усилителя использовалась следующая аппаратура:

1. Генератор сигналов ЗЧ	ГЗ-118
2. Генератор сигналов ЗЧ	ГЗ-120
3. Осциллограф двухканальный	С1-99
4. Осциллограф быстродействующий	С1-108
5. Генератор импульсных сигналов	Г5-83
6. Спектроанализатор	СК4-58

Комплект принципиальных электрических схем усилителя приведен на рис.1 (усилитель мощности), рис. 2 (источник питания) и рис.3 (система защиты) (нумерация элементов на каждом рисунке индивидуальная). В основу схемы собственно усилителя (рис.1) положена структура так называемых «усилителей с токовой ООС», широко применяемая в сверхбыстродействующих интегральных ОУ. Она позволяет получать приборы с полосой единичного усиления более 1 ГГц и скоростью нарастания более 3000...4000 В/мкс. Однако

попытки прямого повторения структуры подобных ОУ не принесли желаемых результатов, поскольку их схемотехника оптимизирована под особенности интегральной технологии и весьма далека от совершенства для дискретного исполнения. В частности, это относится к построению входного каскада и стабилизации температурных режимов.

Отправной точкой в моих исследованиях послужила схема ОУ EL400 фирмы Elantec (по сути типовая для рассматриваемого класса усилителей с токовой ООС), - см. рис.4.

В первую очередь изменения коснулись входного каскада. Четырехтранзисторный «параллельный» преобразователь напряжение-ток со входными эмиттерными повторителями, не охватываемыми цепью общей ООС, был заменен симметричным биполярно-полевым каскодом на комплементарных транзисторах. Входные полевики включены по два в параллель для увеличения эквивалентной крутизны характеристики каскода. В качестве биполярных использованы высоколинейные истинно комплементарные транзисторы с высокой граничной частотой и большим допустимым напряжением коллектор-база. Применение подобного решения позволило, во-первых, отказаться от дополнительных эмиттерных повторителей, находящихся вне цепи ООС, а во-вторых, получить высокое входное сопротивление и малую величину входной емкости, величина которой (без ООС) вместе с емкостью монтажа не превышает 70-80 пф. Точка соединения истоковых сопротивлений автоматического смещения транзисторов VT1 - VT4 является инвертирующим входом усилителя и служит для подачи сигнала ООС. Входное сопротивление в этой точке невелико, и сигнал ООС представляет собой ток, вычитаемый из тока стоков VT1 - VT4, реализует принцип токовой ООС.

Напряжение, пропорциональное току стоков указанных транзисторов, выделяется на резисторах R3 и R30 и поступает на базы входных транзисторов симметричного усилителя напряжения (транзисторы VT7 - VT12), нагрузкой которого являются резисторы R8 и R26. В принципе их можно заменить и одним резистором половинного сопротивления, но для сохранения полной симметрии схемы, нагрузка разделена по точкам подключения коллекторов VT9 и VT12. Рассмотренный каскад также существенно отличается от прототипа, где использовалось симметричное «токовое зеркало с усилением». Уровень искажений каскодного усилителя оказался ниже, а спектр искажений существенно «мягче», чем у «токового зеркала». Это же подтвердилось и субъективной оценкой звучания, в которой каскодный усилитель превосходил «токовое зеркало» во всех отношениях. Увы, за все приходится платить, и расплата за подобное решение весьма высока, - это необходимость повышенного напряжения источников питания.

Выходное сопротивление усилителя напряжения достаточно высокое, - практически равно параллельному соединению R8 и R26, поэтому для исключения влияния входной емкости оконечного каскада на усилитель напряжения применен дополнительный двухтактный эмиттерный повторитель на транзисторах VT13 и VT14. Оконечный каскад выполнен на комплементарных мощных полевых транзисторах VT27 - VT30, соединенных по два в параллель в каждом плече. В цепи их затворов включены индивидуальные антипаразитные резисторы R12, R17, R19, R23, а в цепи истоков - выравнивающие резисторы R10, R11, R24, R25. Транзисторы примененных типов, в отличие от многих других мощных полевииков, имеют положительный температурный коэффициент, связанный с высокой крутизной характеристики (до 5 А/В для одного прибора). С одной стороны, такая крутизна позволяет получить небольшое собственное выходное сопротивление повторителя (менее 0,3-0,4 Ом), но с другой стороны, требует применения систем термостабилизации режима выходного каскада. Датчиками температуры выходных транзисторов служат приборы VT25, VT26, размещенные на радиаторах в непосредственной близости от выходных транзисторов. Необходимую величину начального смещения составляет сумма напряжений на интегральном стабилизаторе DA1 и транзисторах VT25 и VT26, включенных диодами. Номинальный ток покоя выходного каскада может быть установлен в пределах 1мА - 5А, определяя тем самым режим работы выходного каскада. Следует помнить, что при токе покоя более 1,5-2 А необходимо применять принудительное воздушное охлаждение выходного каскада, независимо от площади радиаторов, поскольку

теплоемкость и теплопроводность алюминия недостаточны для необходимой скорости отвода тепла от кристалла к охлаждающим плоскостям при естественной конвекции.

Все каскады усилителя, кроме выходного, работают в режиме класса А, с минимально трехкратным превышением тока покоя над максимальной амплитудой тока сигнала. Токи покоя всех предварительных каскадов выбраны из условия наилучшей линейности характеристик транзисторов.

Усилитель с токовой ООС, выполненный на дискретных элементах, даже при тщательном подборе всех компонентов, имеет существенно большее напряжение смещения и температурный дрейф, чем его интегральный аналог. Объясняется это явление тем, что существует значительный температурный градиент по площади, занимаемой схемой, тепловые постоянные времени весьма велики, а элементы, выполненные на разных кристаллах, не так хорошо температурно-согласованы по дрейфу характеристик, как выполненные в едином технологическом цикле. Для устранения этих явлений в усилителе применена система поддержания нулевого потенциала на выходе с помощью интегратора на ОУ DA2. Постоянная времени интегрирования выбрана примерно 1 с, что соответствует инерционности тепловых процессов. Поддержание нулевого потенциала на выходе усилителя производится с точностью до напряжения смещения ОУ. Конденсаторы в интегрирующих цепях должны обладать минимальными токами утечки и диэлектрической абсорбцией. Этим условиям в полной мере удовлетворяют полипропиленовые емкости Epcos.

Коротко о деталях и конструкции. Все транзисторы, примененные в усилителе, - производства фирмы Toshiba. Выбор обусловлен тем, что в производственной программе этой фирмы имеется значительное количество истинно комплементарных транзисторов, в т.ч. полевых. Кроме того, биполярные транзисторы этой фирмы отличаются очень высокой линейностью. Так, например, замена транзисторов 2SA1015 и 2SC1815 в усилителе напряжения на такие же, но производства Philips, увеличивала собственный (без ООС) уровень искажений усилителя в 1,8 раза. Все транзисторы должны быть попарно подобраны с точностью не хуже 2,5% по значению  $h_{21Э}$  (для биполярников) и  $I_{с0}$  и  $S_0$  (для полевиков). Стабилитроны в стабилизаторах питания предварительных каскадов также должны быть подобраны до получения разницы абсолютных величин положительного и отрицательного питаний не более 0,5 В.

Пассивные элементы. Резисторы R10, R11, R22, R24, R25 - мощные измерительные толсто пленочные фирмы Caddock, типа MP930. Остальные резисторы - металлопленочные, мощностью 0,5Вт (кроме дополнительно указанной) фирмы BC Components, с 1%-допуском. Электролитические конденсаторы – Elna, емкостью и напряжением не менее указанных, серии RJH. Конденсаторы C11 и C14 - керамические, типа КТ1 или КТ2; C6 и C21 - фирмы Multicap, серии PPFХ. Остальные емкости - металлизированные полипропиленовые фирмы Epcos.

Выходные транзисторы смонтированы на алюминиевых охладителях с тепловым сопротивлением не более 0,85 С/Вт на каждую пару транзисторов. Очень хорошо подходят охладители для таблеточных силовых диодов (тиристоров) типов OA020 и OA026. При монтаже следует принимать все возможные меры по снижению теплового сопротивления переход-среда, в частности, не следует ставить изолирующие прокладки между транзисторами и охладителями, лучше изолировать теплоотводы от корпуса усилителя.

Большинство элементов схемы смонтировано на печатной плате из фольгированного материала типа FR4 с толщиной фольги не менее 70 мкм. Транзисторы VT13, VT14, VT15, VT20 устанавливаются на индивидуальные охладители площадью по 30-40 см<sup>2</sup>, размещаемые на печатной плате.

Схема, собранная без ошибок из заведомо исправных деталей, практически не требует настройки. Ток покоя выходного каскада устанавливается потенциометром R9. Емкости C11 и C14 подбирают при замкнутой цепи ООС по критерию получения гладкой переходной характеристики при сохранении максимально возможной скорости нарастания выходного напряжения.

В принципе, благодаря высокой собственной линейности, усилитель может работать и без общей ООС. В этом случае первый полюс его АЧХ находится на частоте около 350 кГц, а

коэффициент усиления составляет 45дБ. Введение неглубокой ООС, причем постоянной глубины в полосе частот, охватывающей все гармоники любой звуковой частоты вплоть до 16-го порядка для 20 кГц, позволяет увеличить коэффициент демпфирования и уменьшить искажения, сохранив монотонно убывающий характер их спектра. При этом усилитель с замкнутой цепью ООС стабилен при работе на нагрузку любого характера, в т. ч. чисто емкостную.

Схемы источника питания и устройства защиты АС от постоянного напряжения приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно. Ввиду очевидности принципа их работы, остановлюсь лишь на конструктивных особенностях. Силовой трансформатор TR1 - тороидальный, габаритной мощностью 1 кВт, причем числа витков всех обмоток увеличены против расчетных в 1,8 раза для снижения индукции в магнитопроводе до значений, исключающих насыщение его материала. Все выпрямители выполнены на диодах Шоттки фирмы International Rectifier. У этих приборов отсутствует эффект обратного восстановления, что позволяет существенно снизить искажения сигнала, связанные с интермодуляцией самого сигнала и широкого спектра помех, вызванных короткими, но мощными импульсами токов восстановления при закрывании диодов. Конденсаторы фильтров питания - фирмы Rifa, серии РЕН169. Они отличаются очень низким значением внутреннего сопротивления и индуктивности, малыми утечками и абсорбцией, длительным сроком службы. Субъективные сравнения звучания позволили установить их небольшое превосходство над электролитами ВНС Aerovox.

В устройстве защиты АС единственным элементом, к которому предъявляются жесткие требования, является реле К1. Его контакты должны обладать высокой линейностью и малым значением термо-ЭДС. Наилучшие результаты показывают реле с контактами из чистого серебра (с золотым покрытием или без него), из палладия (с золотым покрытием или без), из сплава серебро-никель (с золотым покрытием) или из рения (без покрытия). Недопустимо применять реле с контактами на основе оксидных компонентов (например, AgSnO или AgCdO) из-за значительной нелинейности при малых токах. В моем варианте роль К1 выполняет реле типа RT315 фирмы Schrack.

Типы транзисторов, диодов и оптронов не принципиальны. ОУ, используемый в качестве компаратора должен быть Rail-to-rail - типа. Контакты реле К2 и К3 должны быть рассчитаны на коммутацию сетевого напряжения при токе до 10 А.

При монтаже усилителя для сильноточных цепей использовался литцендрат ЛЭПШД 1000 х 0.05, помещенный в термоусадочную трубку. Входные гнезда RCA и зажимы для подключения АС - фирмы Thunderbolt. Сетевые фильтры - FN329-6 фирмы Schaffner.

Общие затраты на сборку стереокомплекта усилителей не превышают 1000\$, при этом результирующая конструкция по моим прослушиваниям практически не имеет конкурентов среди промышленных аппаратов ценовой категории до 10000\$.

Дмитрий Андронников  
Санкт-Петербург, 2000-2002

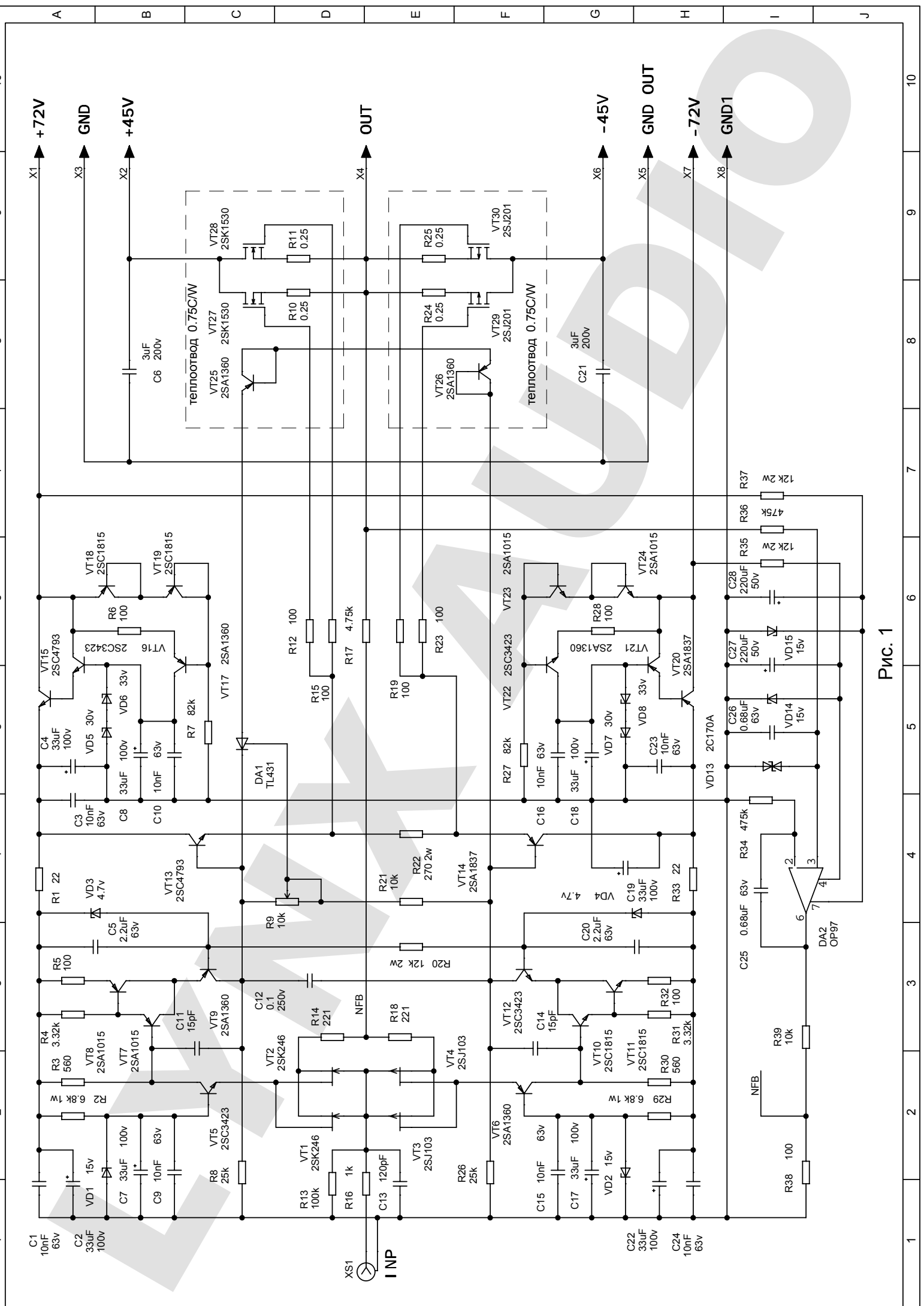


Рис. 1

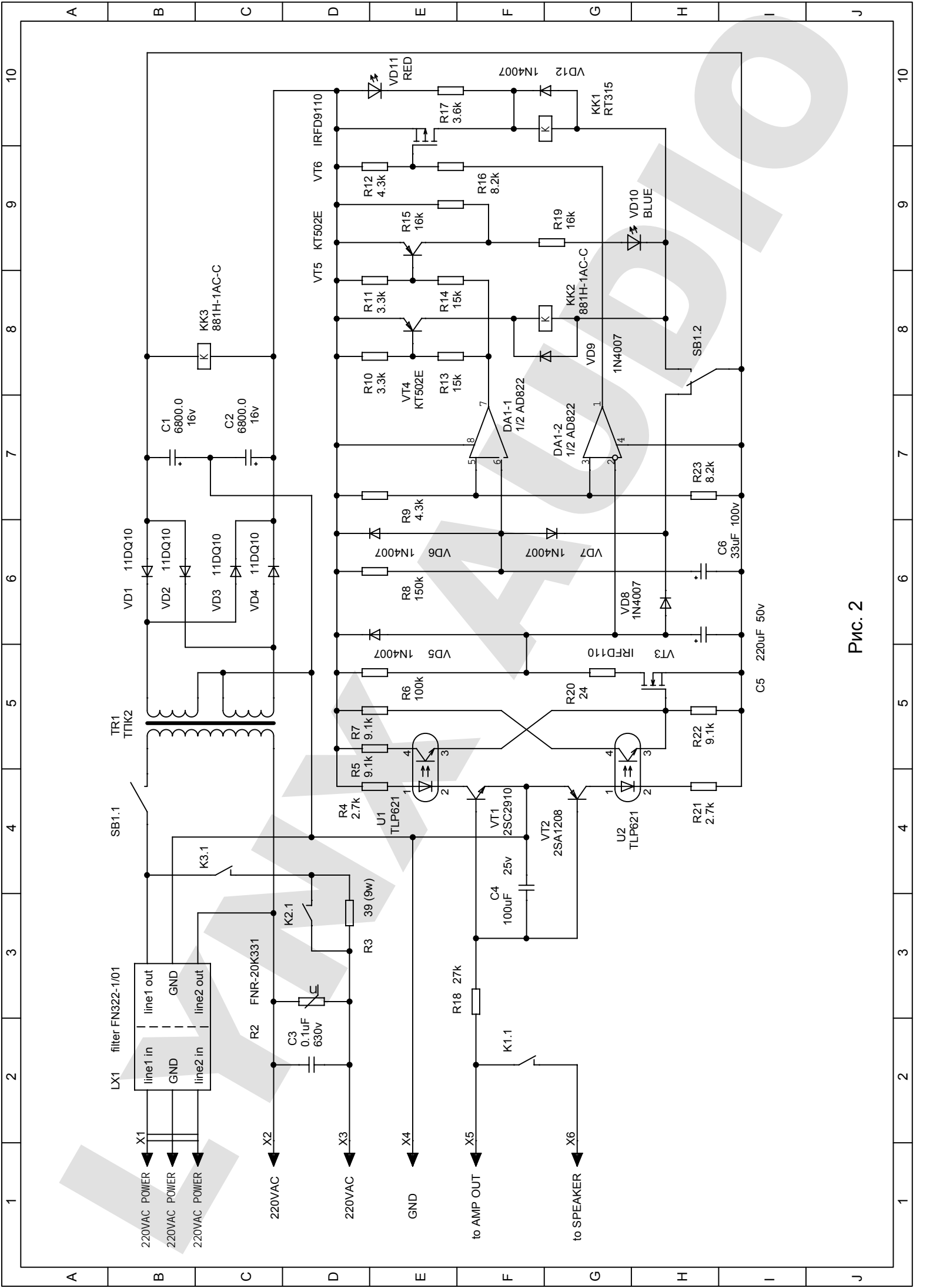


Рис. 2

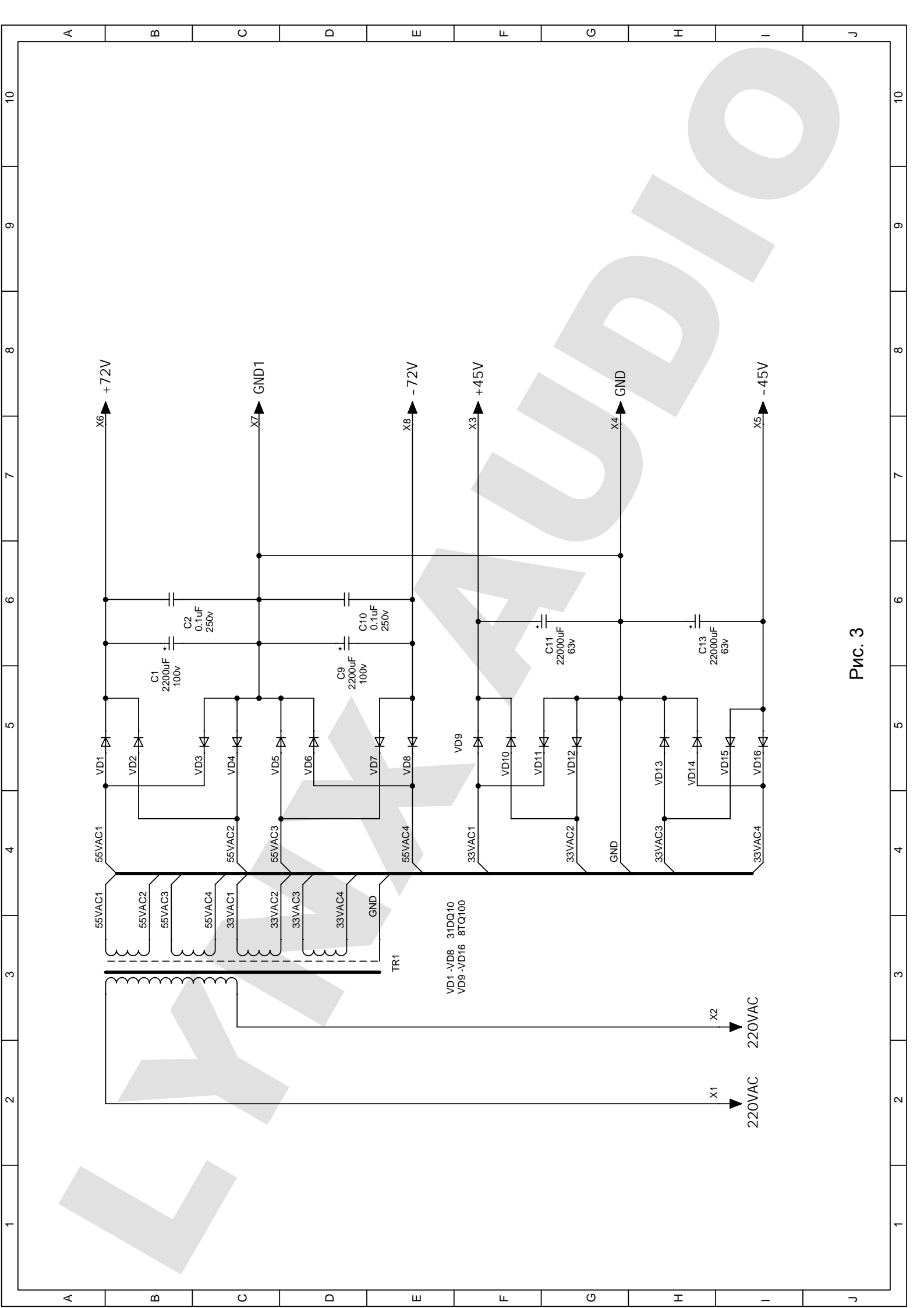
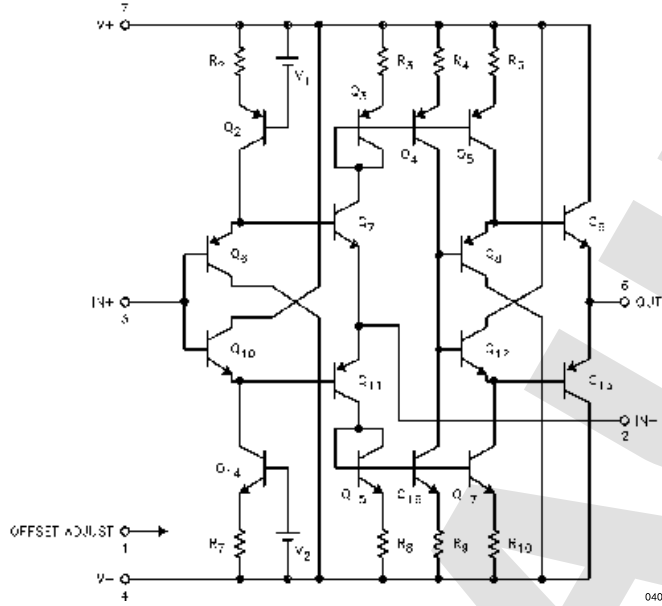


Рис. 3

# EL400C

## 200 MHz Current Feedback Amplifier

### Equivalent Circuit



### Burn-In Circuit

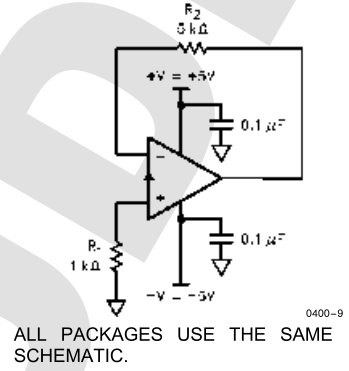


Рис. 4

EL400 The nominal value for the feedback resis-