

## Регуляторы громкости высококачественной аудиоаппаратуры.

© Александр Торрес, г. Нетания.  
(часть 1, 2004г., переработанная 2007г.)

### Предисловие к переработанной части.

С момента написания этой статьи прошло почти 3 года, и опубликована была только 1-я часть. К сожалению, постоянная нехватка времени не давала возможности никак закончить 2-ю (управление "никитинским") и 3-ю (управление многоканальным усилителем для ДК) части. Но может быть оно получилось и к лучшему - за прошедшие 3 года появились новые варианты, а старые были несколько изменены, на основании опыта по их изготовлению и работе с ними.

Поскольку сейчас нашлось немного времени, и мне уже очень неудобно "кормить завтраками" (т.е. обещать - "вот завтра, точно все будет!") тех, кто с нетерпением ждет публикаций остальных частей, я и сделал переработку 1-й части и опубликовать 2-ю часть. Вместе с тем, имеющуюся 3-ю часть я решил сделать 4-й. А вместо нее, место 3-й части займет описание более расширенной (чем во 2-й части) версии для управления "никитинским" регулятором - полного контроллера высококачественного лампового или транзисторного усилителя. Таким образом, если мне ничего не придет еще более нового в голову, в окончательном варианте будет довольно большая 1-я часть, небольшая по размеру 2-я часть, и чуть побольше 3- и 4-я.

**Внимание! Вся информация по "никитинскому" регулятору, перенесена во 2-ю часть!**

---

### Проблематика регулировки громкости.

Регулировка громкости в действительно высококачественной аудиоаппаратуре, несмотря на кажущуюся простоту, представляет некоторую проблему. С одной стороны - минималистски настроенные любители "высокого конца" иногда считают вообще ненужными регуляторы громкости (а тем более баланса), музыка должна звучать с определенным, заранее настроенным уровнем, считают они.

С другой стороны - в реальных условиях, согласитесь, не иметь регулировки громкости несколько неудобно. Что должен обеспечивать регулятор громкости? Линейную зависимость громкости от поворота ручки регулятора (или иного управляющего устройства) для чего сам регулятор должен быть логарифмическим. Само по себе это требование выполнить не так сложно, но регулятор желательно должен быть сдвоенным, а обеспечить синхронность регулировки (т.е. зависимость сопротивления от угла поворота), тем более в логарифмическом потенциометре - не так просто, всегда существует технологический разброс. Естественно, регулятор не должен вносить никаких "шорохов и тресков" и вообще как можно меньше воздействовать на сам сигнал. Неплохо также иметь возможность дистанционного управления (причем с беспроводным пультом, а не дергать за "вожжи").

Для решения всех этих вопросов существует много решений - "аудиофильские" регуляторы громкости ALPS, для дистанционного управление - моторизированные, (причем совершенно непонятно - почему именно "Альпс"? Боурнс и Хонивелл делают ничуть не хуже, скорее даже лучше. Правда, дороже, особенно Хонивелл - учитывая аэрокосмическую направленность этой фирмы).). Золотые переключатели с наборами "аудиофильских" резисторов, еще более "аудиофильские" - входные трансформаторы с отводами (например английской фирмы Sowter, замечу что трансформаторы от Александра Воробьева - ничем не хуже. Саша - большой респект.) и "золотыми переключателями", а также порой незаслуженно презираемые "высококонечниками" ©Н.Сухов, электронные

регуляторы. Последние и впрямь весьма неоднозначны, поскольку очень разнообразны в спектре выпускаемой продукции - от действительно качественных по звуку, до пригодных разве что в "бумбоксах", звуковых картах компьютеров и в автомагнитолах.

В данном цикле мы рассмотрим несколько вариантов регулировки громкости - на микросхемах и на реле, варианты управления на микроконтроллерах - от самых простейших до более сложных.

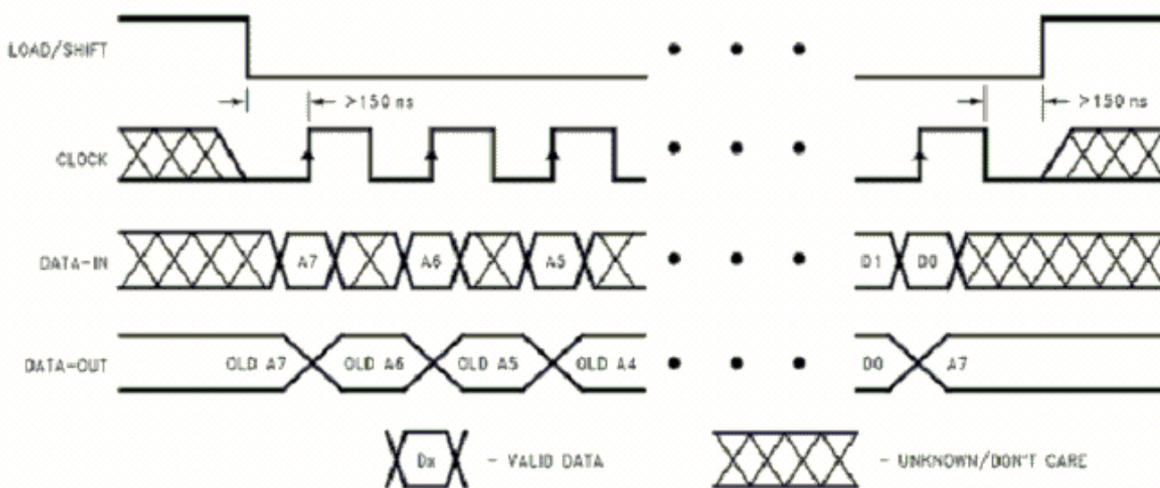
### Небольшой обзор микросхем регуляторов громкости.

Электронная регулировка громкости обычно выполняется или на усилителях с переменным коэффициентом усиления (VGA - Variable Gain Amplifier), например на SSM2160, или на переключаемых делителях на резисторах, различных исполнений. Наиболее популярны - цифровые потенциометры (например DS1802 от Dallas-Maxim), регулятор CS3310 фирмы Cirrus Logic (Crystal Semiconductors), совместимая с ней PGA2310 фирмы Burr-Brown (сейчас - Texas Instruments), LM1972 фирмы National Semiconductors. Последние - несколько дешевле и более доставаемые, кроме того - несмотря на лучшие "объективные характеристики" CS3310, многие отмечают более приятное звучание у LM1972, хотя она и имеет несколько более высокое проникновение сигналов управления в звуковой канал во время регулировки. Хочу предупредить - многочисленные попытки использовать 3-х канальную микросхему LM1973 закончились полным провалом. При том, что внутри LM1972 и LM1973 наверняка одно и то же, с последней звук получается существенно хуже. Почему - не знаю, принял как экспериментальный факт. В последнее время появились более новые микросхемы от TI - PGA4311, которые мало того что 4-х канальные, но по утверждениям разработчиков обеспечивают более высокие параметры чем PGA2310. (Есть также 2-х канальная версия PGA2311). Микросхема от analog Devices SSM2160 хотя и обеспечивает все требуемые регулировки по 6 каналам, по качеству звука сильно уступает PGA.

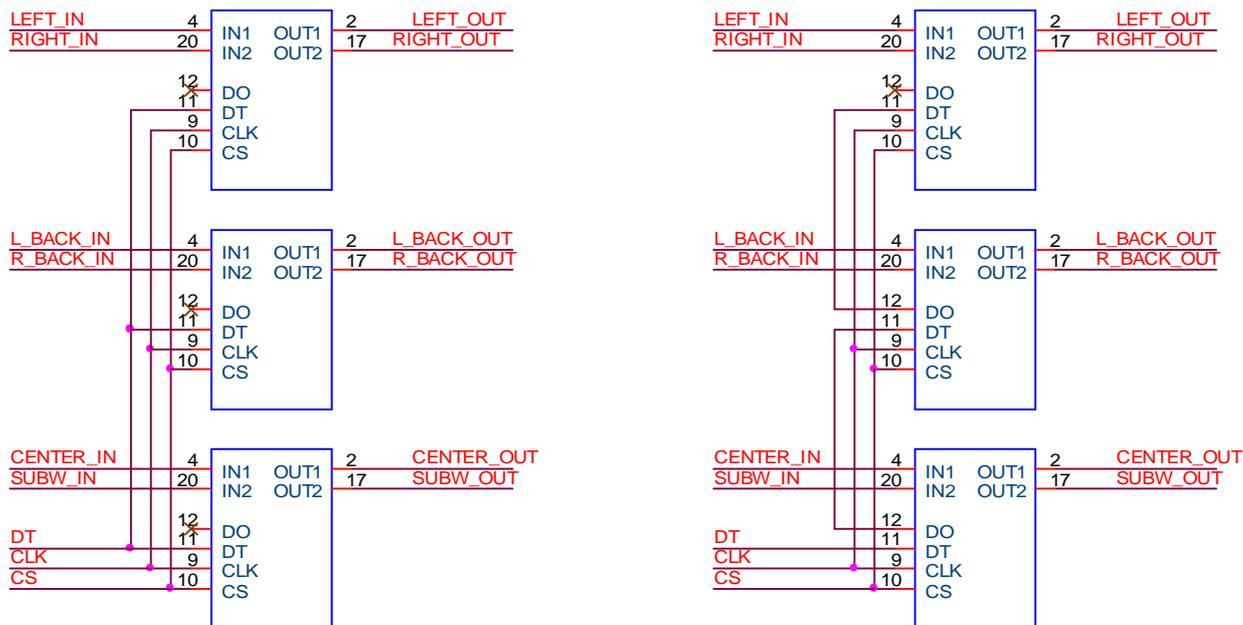
Различные микросхемы типа LM1036 (а также 174УН10/12) не обеспечивают надлежащего качества звучания, поэтому не рассматриваются вовсе. Разумеется, в данном кратком обзоре приведены не все существующие варианты электронных регуляторов, а только несколько типичных представителей.

### Простой регулятор громкости и баланса на LM1972.

LM1972 обеспечивает отдельную регулировку громкости по двум каналам в диапазоне от 0 до -78dB, с шагом 0.5dB в диапазоне 0 - -48dB и с шагом 1dB в диапазоне -48 - -78dB. Управление осуществляется простым 3-х проводным интерфейсом (SPI) как показано на рисунке ниже.



При необходимости управления более чем двумя каналами (т.е. более чем одной микросхемой) существует две возможности. В простейшем случае, когда нужно управлять всеми каналами синхронно, например два канала фронта и два канала тыла, т.е. не требуется регулировка баланса "фронт-тыл" - можно просто объединить сигналы управления двух микросхем (возможность регулировки баланса "лево-право" при этом сохраняется). Разумеется - таким образом можно запараллелить не только две, но и больше микросхем (получив управление громкостью синхронно по  $2*N$  каналам) - на рисунке ниже, слева. Если же требуется полностью раздельное управление по все каналам - следуют включить микросхемы в цепочку, т.е. подав выход данных (DO) одной на вход данных (DI) другой, как показано на рисунке ниже, справа.



Сигналы тактирования (clock) и загрузки/сдвига (load/shift) при этом подаются параллельно на все микросхемы. Более подробные сведения приведены в даташите на микросхему на сайте производителя

Самый простейший регулятор громкости для стереоусилителя показан на рисунке ниже. Он не имеет никакой индикации (она просто не нужна). Регулировка осуществляется двумя ОБЫЧНЫМИ потенциометрами - громкость и баланс, причем среднее положение баланса индицируется светодиодом, и кнопкой "MUTE", также с индикацией.

Может возникнуть вопрос - если все равно используются обычные потенциометры, для чего нужно все это? Дело в том, что в данной схеме не нужны сдвоенные потенциометры определенного номинала с логарифмической характеристикой - используются более простые, с линейной. К тому же нет никаких жестких требований к номиналу сопротивления - можно использовать от единиц до десятков килоом, и самое главное - качество звука вообще никак не зависит от качества потенциометров, через них не проходит сигнал, они только регулируют напряжение, которое измеряется АЦП микроконтроллера и преобразуется последним в сигналы управления LM1972. Так как использован весьма дешевый и малогабаритный 8-ногий микроконтроллер, возникает некоторый "дефицит" его выводов (об одновременном использовании выводов микроконтроллеров в разных целях - читайте в статье "Аппаратные хитрости использования PIC-контроллеров" в PX 3,4/1999 или [на сайте](#) поэтому в данной схеме применено следующее подключение светодиодов - они подключены к сигналам DATA и CLOCK, и слегка "мерцают" во время регулировки (что можно также считать "фичей"). Использована та особенность 3-х проводного интерфейса, что при неактивном состоянии линии load/shift (часто обозначаемой также как CS - Chip Select) сигналы данных и тактирования могут иметь любые значения.

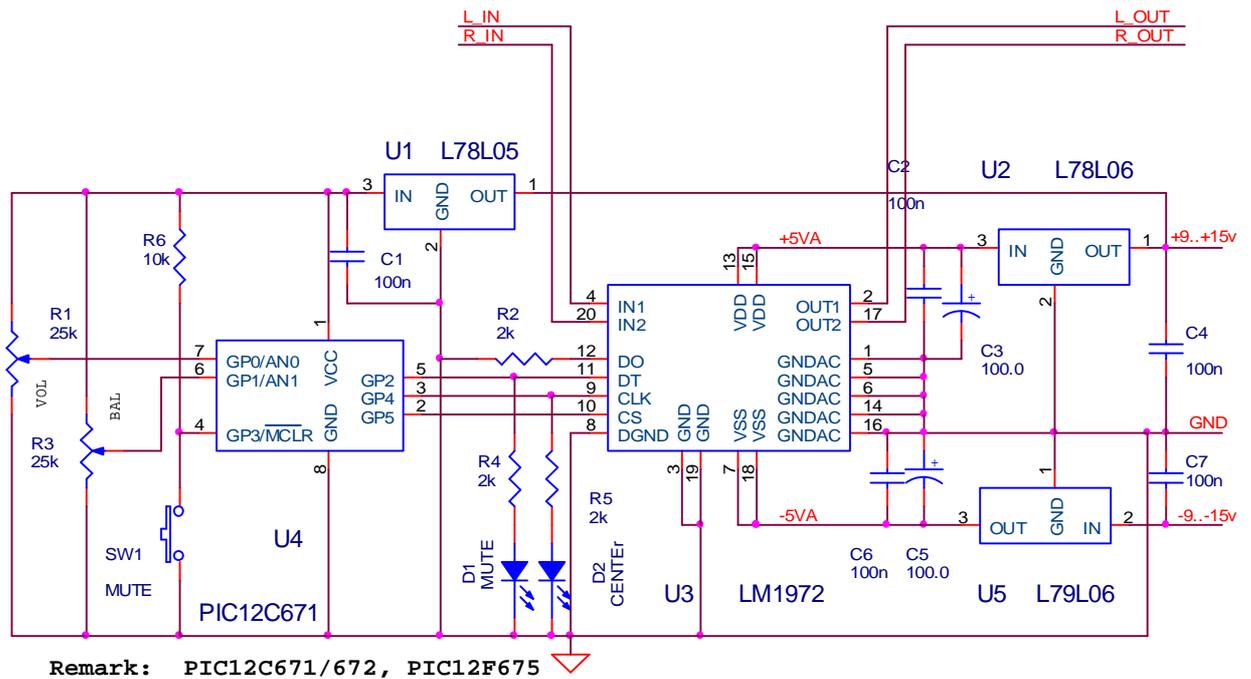


Схема может на первый взгляд показаться несколько громоздкой, но присмотритесь внимательно - стабилизаторы питания и блокировочные конденсаторы составляют чуть ли не больше половины схемы! Ведь собственно сама схема - это регулятор LM1972 и микроконтроллер PIC12C671. Плюс одна кнопка, два потенциометра и два светодиода с балластными резисторами.

Для обеспечения нормальной работы регулятора требуется большое входное сопротивление последующего усилителя, если это не так - рекомендуется включить между регулятором и усилителем буферный каскад на лампе или хорошем операционном усилителе (ОРА2132, ОРА2134 и т.п.). Особое внимание следует обратить на разводку земляного провода - LM1972 имеет выходы, как для аналоговой, так и для цифровой "земли", а также "защитные выходы" вокруг аналоговых входов и выходов. Входной сигнал не должен превышать 3в (RMS), входное сопротивление регулятора 40 кОм. Для питания пригоден любой двухполярный источник, с напряжением +9-15в. "прошивку" микроконтроллера вместе с исходным текстом можно взять на сайте редакции и на сайте автора [на сайте автора](#).

Примечание: я получил несколько сообщений, что микроконтроллер PIC12C671 не везде доступен, хотя и дешев. Да и для любителей - проще иметь дело с микроконтроллером, у которого многократно перешиваемая память программ ("F"), а не однократная ("C"). Поэтому для этой и других схем, где упоминается PIC12C671, я выкладываю также прошивку под легче доставаемый PIC12C672, и под "многократный" PIC12F675

### Регуляторы громкости на PGA2310

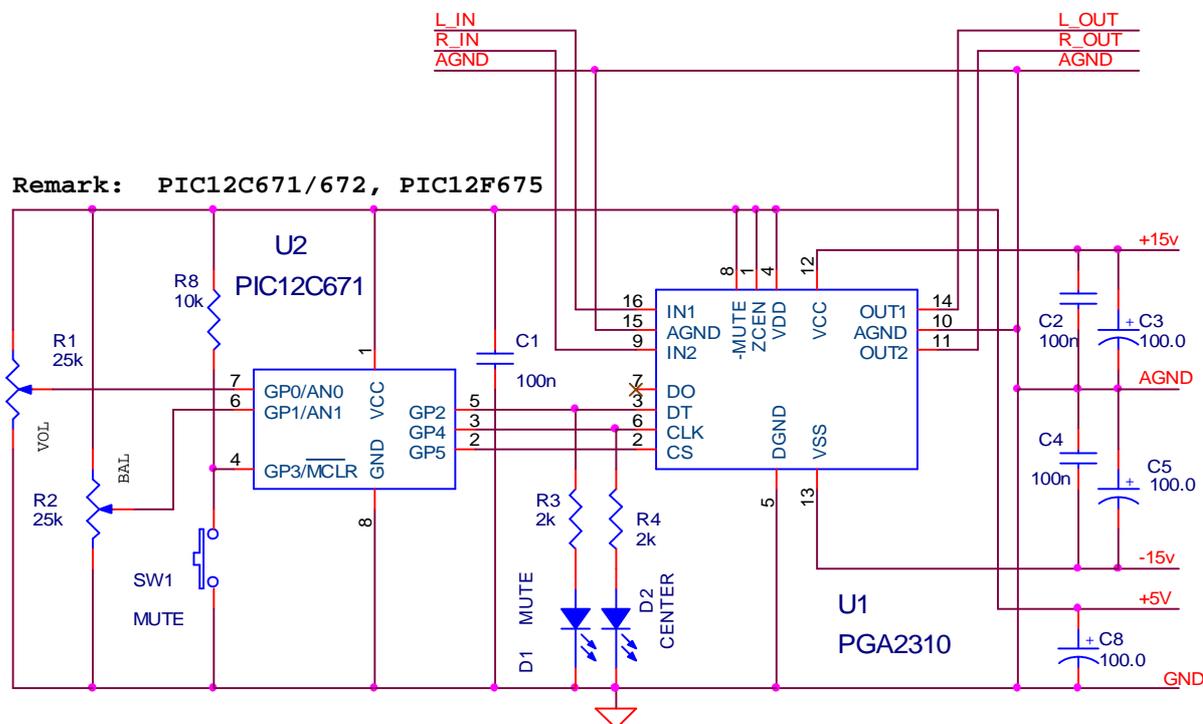
Эта часть добавлена "по просьбе публики" для тех, кто не смог самостоятельно адаптировать прошивку. Схема представляет собой вариант предыдущей схемы и программы, т.е. микросхемы LM1972 и PGA2310 управляются одинаково - через последовательную шину SPI, но отличаются внутренней структурой.

Прежде всего, в отличие от LM1972, регулирующей громкость от 0дБ до -78дБ (т.е. "на ослабление") и требующих высокого входного сопротивления последующего каскада (буфера), микросхема от Тексас Инструмент "умеют" и усиливать сигнал - их диапазон регулировки от +31.5 до -95.5 дБ (т.е. полный диапазон - 128дБ), с шагом 0.5дБ. Также микросхема не нуждается в буфере, и может работать на нагрузку 600 Ом.

Использование всего диапазона регулировки PGA2310 представляется мне сильно избыточным, поэтому было принято такое решение: делаем 3 варианта программы:

1. Full – полный диапазон, от -95.5дБ до +31.5дБ с шагом 1дБ
2. No Gain – без усиления, т -63дБ до 0дБ с шагом 0.5дБ
3. Gain3 – с усилением, от -53дБ до +10дБ с шагом 0.5дБ

Регулировка баланса во всех вариантах -  $\pm 8$ дБ с шагом 0.5дБ. В варианте “Full” возможна также аппаратная настройка границ, о чем будет сказано ниже.



Как видите, схема практически не изменилась (для простоты – на схеме не показаны стабилизаторы питания), основные отличия – в программе. Как и в схемах на LM1972, можно поставить несколько (n) PGA2310 параллельно (т.е. соединив у них у всех одноименные выводы между собой, кроме аналоговых входов и выходов, конечно), и тем самым получить синхронную регулировку громкости по 2n каналов. Например – 3 микросхемы, первая на фронт, вторая на б/л, третья – на центр и саб. Регулятор баланса правда, будет кроме баланса левая сторона/правая сторона, еще и изменять соотношение центр/саб. Поэтому его лучше не использовать (установив вместо переменного резистора два одинаковых постоянных резистора 10-20к). Более сложная и более «правильная» схема регулятора для Домашнего Кинотеатра будет описана позднее.

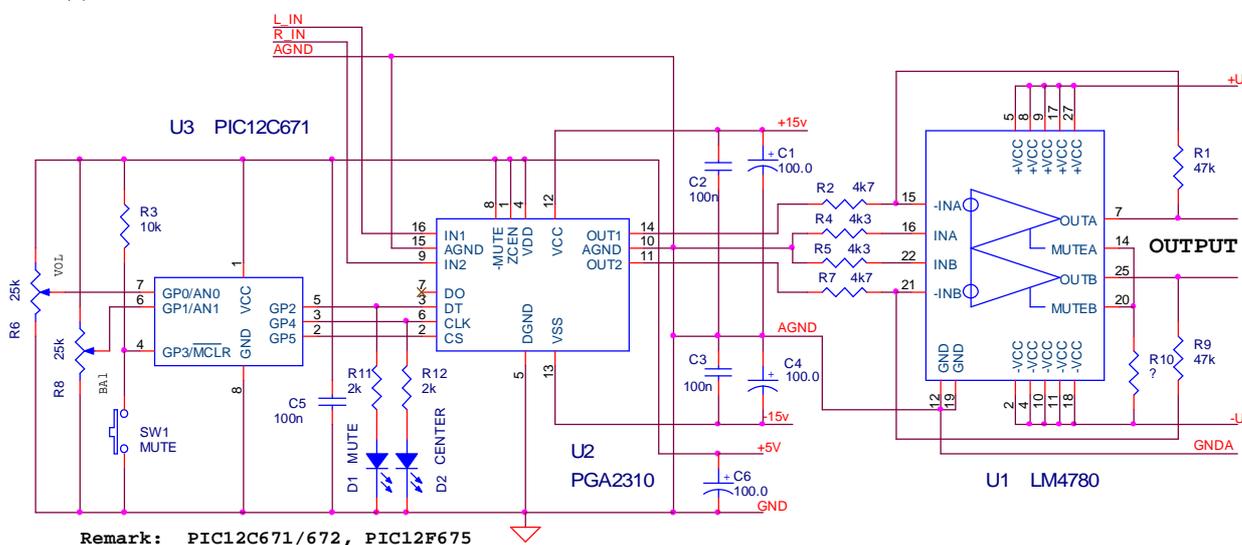
Возможность работы на низкоомную (600ом, 1нФ) нагрузку (выходной ток PGA2310 – до 35мА, а 2311 – до 50мА) дают прекрасную возможность использовать эту микросхему как готовый предусилитель, или буфер для усилителя мощности с низкоомным входом. Далее представлены примеры такого использования.

### LM4780 (LM3886) в инвертирующем включении

В инвертирующем включении, усилитель LM3886 (и ее двоянный вариант – LM4780, представляющие собой физически два кристалла 3886 в одном корпусе) обладает лучшим звучанием, по сравнению с «обычным» неинвертирующим, но для обеспечения устойчивости, в любом ее включении ее коэффициент усиления не должен быть меньше 10 (некоторые рекомендуют даже 20-30), а резистор обратной связи – желательно должен не превышать 50кОм. Это определяет входной резистор ) а следовательно, и входное сопротивление усилителя) не более 3-5кОм, что весьма мало и требует использования различного вида буферов. Низкое выходное сопротивление PGA2310/2311 позволяет ей быть таким буфером, но не следует забывать, что ее собственное входное сопротивление

составляет 10кОм, что в отдельных случаях может потребовать установки буфера для нее самой!

При установке  $K_{ус}=10$  в выходном усилителе и максимальном усилении в регуляторе громкости-буфере 30 (вариант Full), при максимально допустимой мощности  $60W@8\Omega$ , чувствительность получается около 70мВ, что очень избыточно. Поэтому целесообразнее использовать вариант Gain3 (общее усиление 30 и чувствительность 0.7в). При меньшей мощности – может более полезным окажется вариант “NoGain”, с одновременным увеличением усиления выходного каскада до 15-20 (зависит от того, какую чувствительность хочется получить – старую стандартную 0.7в, или же 2 в, соответствующие 0дБ на выходе ЦАПа). Или же использовать вариант “Full” с аппаратной регулировкой границ. В любом случае, следует руководствоваться следующим правилом – если чувствительность надо увеличить, и усиление в оконечном каскаде (LM3886/4780) достаточно для обеспечения устойчивости (отсутствия самовозбуждения), то лучше увеличивать чувствительность усилением в регуляторе громкости, чем в выходном каскаде. Это связано как в шумовыми характеристиками, так и с постоянной составляющей на выходе.



Как видите на схеме, между регулятором громкости и выходным усилителем отсутствует разделительный конденсатор, и напряжение смещения регулятора, будет в  $K_{ус}$  выходного каскада приложено к динамику. Поэтому этот  $K_{ус}$  и желательно иметь поменьше (лишь бы обеспечивалась устойчивость!). По той же причине, лучше использовать PGA2311 вместо 2310, т.к. она обладает вдвое меньшим напряжением смещения. Поскольку сама LM4780 (LM3886) не является предметом данного повествования, на схеме не показаны ее блокировочные конденсаторы по питанию и цепочки Бушера на выходе. Величина резистора R10 зависит от напряжения питания выходного каскада. Для более полной информации – не поленитесь посмотреть в даташит и многочисленные FAQ’и по этим микросхемам, я не думаю что в статье про регуляторы громкости стои их дублировать **J**

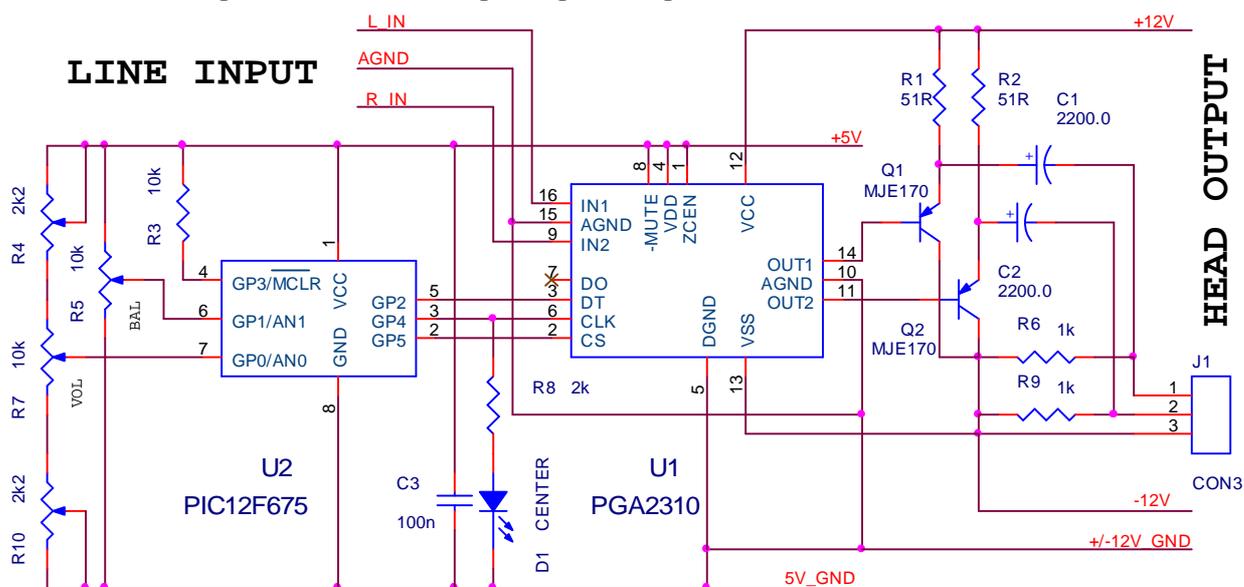
### Однотактный телефонный усилитель с регулятором громкости.

На базе регулятора громкости PGA2310 легко можно построить усилитель для наушников (головных телефонов), добавив к нему просто усилитель тока (эмиттерный или истоковый повторитель). В отличие от предыдущей схемы, здесь выгоднее применять 2310 а не 2311, из-за ограничения напряжения питания последней на уровне  $\pm 5в$ . С учетом Output Drop Voltage = 1.5в, это не позволит получить на выходе напряжение больше 2.2-2.4в (RMS), чего для высокоомных наушников может не хватить. PGA2310 имеет диапазон питающих напряжений до  $\pm 15в$ , при указанном на схеме питании  $\pm 12в$ , усилитель в целом обеспечивает 3.2в на 32 ома нагрузку, и 6.5 в на 300 ом, чего более чем достаточно.

В данной схеме использован вариант “Full” с аппаратной регулировкой границ. Введено два подстроечных резистора, на краях потенциометра регулятора громкости. Это позволяет выставить диапазон регулировки громкости (и максимальное усиление схемы!) применительно к конкретным условиям (напряжению выхода источника, чувствительности наушников).

Измеренный КНИ при воспроизведении сигнала 1кГц с уровнем 0дб с ЦД-проигрывателя составил 0.12%. (Хочу заметить, что измерение было проведено USB-аудиокартой для акустических измерений, которая не очень пригодна для измерения малых КНИ, о чем написано в ее описании), что включает в себя все погрешности не только телефонного усилителя с регулятором, но и ЦАП+фильтр+буфер плеера. Помоему неплохо J

Замечания по схеме: р-п-р транзисторы MJE170 можно заменить на BD140 и т.п., или же на n-p-n транзисторы MJE180, BD139 и т.п., «перевернув» схему, т.е соединив коллектор с +12, а резистор с -12в. Также следует поменять полярность выходных конденсаторов, и общий провод наушников подключать не к 12в а к +12в. От типа транзистора (кстати, желательно подобрать пару с одинаковыми  $\beta$ ) и его производителя - довольно сильно зависит качество звучания усилителя. Так к примеру, транзисторы MJE170 от Моторолы и BD140 от Филипса звучали примерно одинаково хорошо, а вот MJE170 от ST – звучали хуже. Хотя ни в спектре, ни в цифре КНИ разницы замечено небыло. Ток через транзисторы в авторском варианте – 220мА. Подстроить этот ток можно изменением сопротивления эмиттерных резисторов.



Следует помнить, что как и все усилители, работающие в классе «А» - этот усилитель имеет КПД как у паровоза (а точнее - еще ниже), и является некоторым подобием нагревательного прибора. При токе 220мА, на двух транзисторах и двух резисторах выходного каскада выделяется почти 11Вт. На двух стабилизаторах также выделиться не менее 2.2-2.5Вт. Поэтому собирая усилитель в корпусе, нужно обеспечить условия охлаждения (отвода тепла). Резисторы лучше использовать керамические, не менее 5Вт. Еще лучше – набрать их из нескольких 3-5 ваттных параллельно или последовательно. Транзисторы и стабилизаторы – установлены на радиаторах достаточного размера (в зависимости от конструкции, роль радиатора может выполнять и металлический корпус). Если Вы планируете использовать только низкоомные (32 ома) наушники, то целесообразно снизить напряжение питания с  $\pm 12$ в до  $\pm 9$ в или даже до  $\pm 5$ в (используя стабилизаторы 7809/7909 или 7805/7905), в последнем случае можно также использовать PGA2311. Если же наоборот, Вы планируете использовать только высокоомные (300, 600 ом) наушники – целесообразно уменьшить ток, увеличением эмиттерных резисторов.

----- конец 1 части -----