

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ СХЕМОТЕХНИКА

РЕГУЛЯТОРЫ ГРОМКОСТИ В HI-FI АППАРАТУРЕ

Алексей Никитин, г. Лондон

Задача регулировки уровня сигнала - проще говоря «громкости», является одной из непростых проблем в схемотехнике звуковой аппаратуры. И, как всегда с непростыми проблемами, - решений множество. В книге Бена Дункана [1] этой теме отведены несколько страниц. Я попытаюсь вкратце описать основные варианты регуляторов, применяемых в домашней и профессиональной аппаратуре, а также расскажу о новом техническом решении, созданном и применяемом мной в последних разработках Creek Audio.

① **Виды и подвиды регуляторов и их свойства.**

A1) Ручной (механической) регулировки.

A11) Непрерывные - то что называется движковые потенциометры - одинарные, вдвоенные, многоканальные, различных конструкций и с разнообразными резистивными элементами - графитовые, керметовые, проволоочные, пластиковые.

Достоинства: дешевизна (относительная - у высокого качества потенциометра цена может быть несколько сотен долларов, у дешевого массового - меньше одного доллара), простота применения, возможность плавной бесступенчатой регулировки, возможность моторизации.

Недостатки: очень низкая точность, особенно у многоканальных видов - согласование между каналами обычно гарантируется только в пределах 3 дБ. Низкое качество, особенно у дешёвых видов, недолговечность и низкая надёжность, могут заметно влиять на звук.

A2) Ступенчатые - с использованием различных видов переключателей и постоянных резисторов.

Достоинства: высокое качество и точность, определяемые в основном качеством использованных резисторов, т.е. может быть до 0,1% и даже лучше; как побочный результат - прекрасное согласование каналов в многоканальных вариантах.

Недостатки: дороговизна, даже самые дешёвые варианты стоят десятки долларов, лучшего же качества - сотни. Невозможность получить большое количество позиций (обычно 12-20, максимум, по-видимому, 32) и соответственно относительная грубость регулировки. Моторизованные варианты стоят ещё дороже.

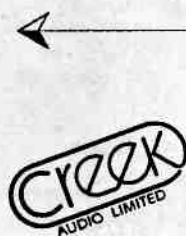
B) Электронно-управляемые, как ручкой на панели, так и дистанционно - на суть дела это не влияет.

B1) Основанные на движковых потенциометрах, но с мотором. Самый распространённый вариант.

Достоинства такие же, как у немоторизованных вариантов - дешевизна и т.д. Кроме того, при сравнении с некоторыми другими видами, описанными ниже, могут вполне выигрывать в качестве звука - по крайней мере не хуже, чем у простого переменника, хотя, разумеется, и не лучше.

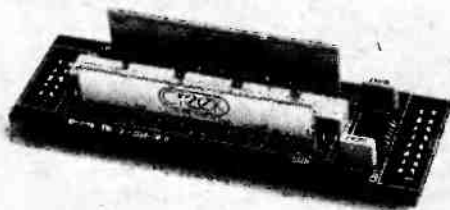
Недостатки те же плюс наличие не очень надёжных механического редуктора и электромотора ещё больше понижает надёжность.

B2) На моторизованных механических переключателях - редкий зверь, очень до-



Creek V-80D

REFERENCE VOLUME CONTROL MODULE



рогое удовольствие. Достоинства и недостатки такие же, как и у их родственников без мотора.

B3) На аналоговых полупроводниковых регуляторах: варианты - аналоговые перемножители, полевые и биполярные транзисторы, используемые как переменные резистивные элементы, фоторезисторы.

Достоинства: бесступенчатая регулировка, простота управления, дешевизна.

Недостатки: очень низкая точность, линейность и стабильность, ограниченный диапазон регулировки, шумы, практическая невозможность точной многоканальной регулировки, заметное ухудшение качества звука. Применяются, как правило, только там, где либо на качество наплевать (автомобильная/носимая аппаратура и т.д.), или где без них не обойтись (APU, ограничители и т.п.).

B4) На полупроводниковых ключах. Варианты - перемножающие ЦАПы, переключение внешних постоянных резисторов, специальные микросхемы регуляторов громкости (например, CS3310 от Crystal Semiconductors, включающая в себя ещё и усилитель-буфер).

Достоинства - относительная дешевизна, простота управления и высокая точность, даже в многоканальных системах. Высокая скорость переключения.

Недостатки - портят звук, как правило, больше, чем простые потенциометры, весьма ограничены по уровню входного сигнала - не больше чем 2-3 вольта эфф. При перегрузке сильно нелинейны и могут быть повреждены проще, чем большинство остальных типов. Невозможность гальванической развязки управляемого и управляющего сигнала. Ограниченная полоса пропускания и заметное возрастание искажений на высоких частотах. У многих сильная зависимость полосы пропускания от коэффициента передачи.

Несмотря на эти недостатки, часто применяются даже в очень дорогой аппаратуре - в основном поскольку возможные варианты стоят в десятки раз дороже.

B5) На реле и постоянных резисторах.

Достоинства: при условии применения «правильных» реле - очень высокое качество (определяемое в основном резисторами), линейность и высочайшая надёжность (реле рассчитаны на миллионы переключений и как правило герметизиро-

ваны). По-видимому лучшее достижимое качество звука при использовании качественных компонентов. Относительная простота управления и хорошая развязка между управляемым и управляющим сигналами.

Недостатки: самое лучшее оно же и самое дорогое решение. Высокого качества реле стоят дорого (порядка 2-5 долларов каждое), а высокого качества резисторы могут стоить от 0,5 до 10 долларов каждый. И тех и других надо много. Применяя обычную схему линейного перемножающего ЦАПа, на 120 дБ диапазона регулировки нужно 20 двоичных разрядов. Логарифмических вариантов мало и они, как правило, требуют тоже много реле. Описаны варианты с 8 реле, обеспечивающие диапазон регулировки в 60 дБ.

Вариант B5, несмотря на сложность и дороговизну, применяется во многих аппаратах HI-End, например фирм BAT (Balanced Audio Technology), Sim Audio и других. Как правило, применяется схема, названная шунтирующей, когда последовательно с сигналом включается только один сравнительно высокоомный резистор (порядка 20-100 кОм), а реле коммутируют шунтирующие резисторы между выходом и землёй. При этом считается, что применение только одного резистора в цепи сигнала сказывается положительно на качестве звука. К сожалению, подобная конфигурация сильно страдает от следующего: входное и в особенности выходное сопротивления сильно меняются при изменении уровня, плюс следующий за регулятором каскад должен иметь высокое входное сопротивление и возможно меньшую входную ёмкость, в противном случае полоса пропускания может быть (и как правило бывает) сильно сужена в положении регулятора с малым ослаблением сигнала.

② Моё решение

Когда примерно год назад передо мной встал задача разработки нового предварительного усилителя, вопрос о том, какой тип регулятора громкости применить, встал весьма остро. Надо было найти вариант лучший по звуку, способный работать в балансном тракте и доступный по деньгам. Простые переменники отпали сразу, остались только специализированные микросхемы и вариант с реле и резисторами. Не найдя ничего подходящего в литературе кроме одного предло-

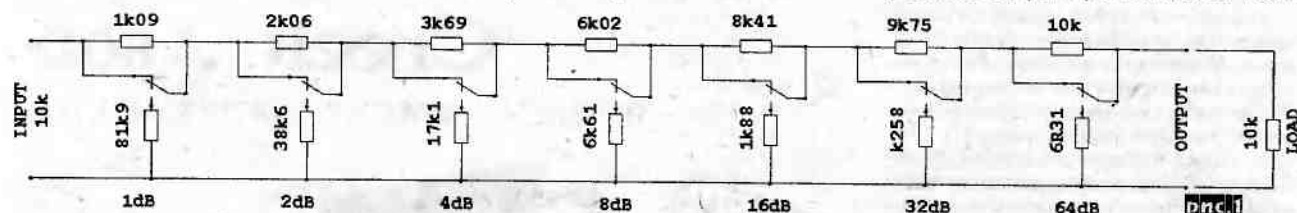
ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ СХЕМОТЕХНИКА

жения в уже упомянутой книге Бена Дункана, я решил позвонить ему и спросить, кто и как применяет релейные регуляторы. Он не смог мне сказать практически ничего сверх написанного в книге, - что

сопротивлением. Просто копирование этого решения на звуковых частотах получается довольно дорогим - каждое звено это три резистора и одно реле с двумя переключающими контактами.

дать такое напряжение на CS3310...

В результате весь регулятор выглядит как один резистор с отводами, последовательно с сигналом, части которого переключаются реле (Omron G6K 5V поля-



лет так десять назад был аппарат с применением 8 реле для достижения 60 дБ глубины регулировки с шагом в 1 дБ. Как конкретно это было сделано, он не знал, хотя и дал мне координаты дизайнеров того аппарата. После разговора с ним я немного подумал логически, чего со мной давно не случилось, затем набрал снова номер Бена (прошло минут 15) и сказал ему, что я нашёл возможное решение для регулятора на 60 дБ, но только с 6 реле. Он сначала не поверил...

Основная проблема при разработке такого многоступенчатого регулятора - это взаимовлияние между каскадами-ступеньками. Сопротивление нагрузки каждого каскада будет меняться в зависимости от положений реле в последующих каскадах. Моё решение простое до безобразия, и даже странно, что до сих пор никто не применил ничего похожего в аудио аппаратуре, хотя подозрительно близкое решение известно и применяется на радиочастотах, когда в согласованном тракте включаются звенья-ослабители с согласованным входным и выходным

Короче, я это слегка упростил и получилась схема, показанная на **рис. 1**. Каждое звено рассчитано на определённое ослабление в дБ - 1, 2, 4, 8, 16, 32 для максимального ослабления в 63 дБ. Если добавить ещё одно реле со звеном на 64 дБ, то максимальное ослабление составит 127 дБ - значительно больше, чем нужно в реальной жизни.

Поскольку нагрузка каждого звена всегда постоянна, то и ослабление каждого каскада не зависит от статуса остальных звеньев. Просто и очень полезно - это приводит к тому, что входное сопротивление всего регулятора не зависит от ослабления - оно постоянно! Поскольку значения сопротивления применённых резисторов далеки от стандартного ряда, мы решили сделать на заказ резисторную матрицу, которая изготавливается по плёночной технологии и лазерно подгоняется до 0,1% точности. Мощность рассеивания матрицы на подложке из керамики такая, что регулятор прекрасно выдерживает 50 вольт на входе одновременно и до 100 вольт в импульсе. Попробуй по-

ризованные, с золотыми контактами; потребление 0,1 Вт, время срабатывания/отпускания 2 мс). Мы используем сейчас PIC микропроцессор для управления реле, хотя в первом прототипе всё управлялось простой логической схемой.

Цена регулятора получилась тоже приемлемой - модуль на два канала с реле, двумя плёночными матрицами и драйверами для реле (как на фотографии на с.63) стоит порядка 100 долларов. Не дешево, но с другой стороны за такие деньги ничего близкого по параметрам купить нельзя.

Наши тесты на прослушивание тоже показали прекрасные результаты - очень нейтральный регулятор громкости, не добавляет и не отнимает ничего у оригинального звука.

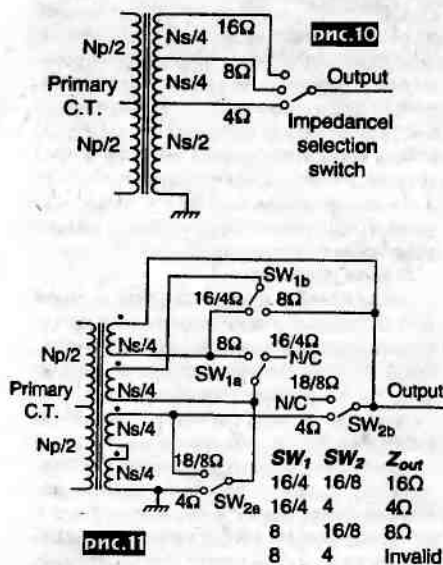
Алексей Никитин,
Лондон, март 2002

Литература

1. Ben Duncan
High Performance Audio Power Amplifiers
Newnes 1996. ISBN 0750626291

Поправка. В «Дайджесте» предыдущего номера «РХ» обнаружена ошибка а рис. 10. Ниже приводим исправленные рисунок и сопроводительный текст.

Малкольм Ваттс обратил внимание на тот факт, что при стандартной *схеме* *намотки* и коммутации *выходного трансформатора* *лампового УМЗЧ* под разные нагрузки (*рис. 10*) в режиме 4 Ома половина витков вторичной обмотки «болтается без пользы», и по крайней мере эта ра-



ботающая часть (а на практике чаще всего вся вторичная обмотка) должна быть намотана толстым проводом, рассчитанным на максимальный ток 4-омной нагрузки. Это приводит к неоправданно большому расходу меди и габаритам. В предложенном Малкольмом варианте коммутации с двумя спаренными переключателями (рис. 11) все части вторичной обмотки могут быть намотаны более тонким проводом, рассчитанным на ток 8-омной нагрузки, что дает значительную (до 30%) экономию массы медного провода обмотки. В показанном на схеме (рис. 11) положении 4-омной нагрузки две верхних четвертьобмотки (каждая из которых имеет число витков, соответствующее $N_s/4$) включены друг с другом последовательно (т.е. вместе соответствуют $N_s/2$), а с нижней полуобмоткой ($N_s/4 + N_s/4 = N_s/2$) - параллельно, поэтому во всех частях протекают равные токи, эквивалентные току в 8-омной нагрузке. И две параллельно включенные $N_s/2$ части в сумме создают удвоенный ток на выходе Output, который нагружен на 4 Ома. В противоположном положении переключателя SW2 все части обмотки оказываются соединенными последовательно, это режим нагрузки 16 Ом, и опять через все части обмотки течет равный ток. Наконец, в 8-омном положении SW1 и 16/8-омном SW2 верхние четвертьобмотки соединены друг с другом параллельно (и соответствуют $N_s/4$, намотанной более толстым проводом), а с нижней $N_s/2$ - последовательно, поэтому таким режим соответствует нагрузке 8 Ом. (Примечание редакции. Автор

здесь несколько ошибся, обозначая такой режим 8-омным. На самом деле он теоретически соответствует нагрузке 9 Ом, поскольку число витков в 1,5 раз больше, чем $N_s/2$. Для действительно 8-омного режима число витков должно быть в $\sqrt{2} = 1,41$ раз больше, чем у 4-омной части ($N_s/2$) или во столько же раз меньше, чем у всей 16-омной обмотки (N_s). К недостаткам способа следует отнести необходимость соблюдения точного равенства числа витков в соединяемых параллельно обмотках, а также «защиты от дурака» - комбинация SW1 - 8 Ом и SW2 - 4 Ома недопустима, т.к. параллельно оказываются включенными верхние четвертинки и нижняя половинка, а это эквивалентно короткому замыканию витков обмотки («Electronics World» №1/2002, с.38).

Объявления

Внимание подписчиков. Если вы не получили по подписке к какой-либо из номеров журнала «РХ», вам необходимо выслать в адрес редакции вашу подписную квитанцию и справку вашего почтового отделения, заверенную печатью и разборчивой подписью его начальника, в том, что этот номер «РХ» по подписке в почтовое отделение не поступил. Мы немедленно и бесплатно вышлем вам недостающий номер индивидуальной заказной бандеролью.

❷ Не забудьте продлить подписку на второе полугодие, она уже началась.