

И.ПУГАЧЕВ,
г.Минск.

УМЗЧ с ТОС “Pure note”

Сложное дело — описать словами звучание усилителя. Но бумага все стерпит! И “упругое мясо под соусом” — это пишет о НЧ А.Петров, и “гуляющие туда-сюда форманты” — это о ВЧ В.Шушурин (Лэмм), и “сибилянты с транзиентами” — это о ВЧ сами знаете кто (М.И.Чумаков, к.т.н.). А ведь можно и так: “...Звучание усилителя очень точное, при этом спокойное и деликатное. Отлично передаются самые тонкие тембральные оттенки как голосов исполнителей, так и инструментов и естественных звуков. Даже при маленькой громкости... прекрас-

Рис. 1

но слышны все нюансы исполнения и записи фонограммы...” Это пишет Дмитрий Андронников об одном из своих усилителей.

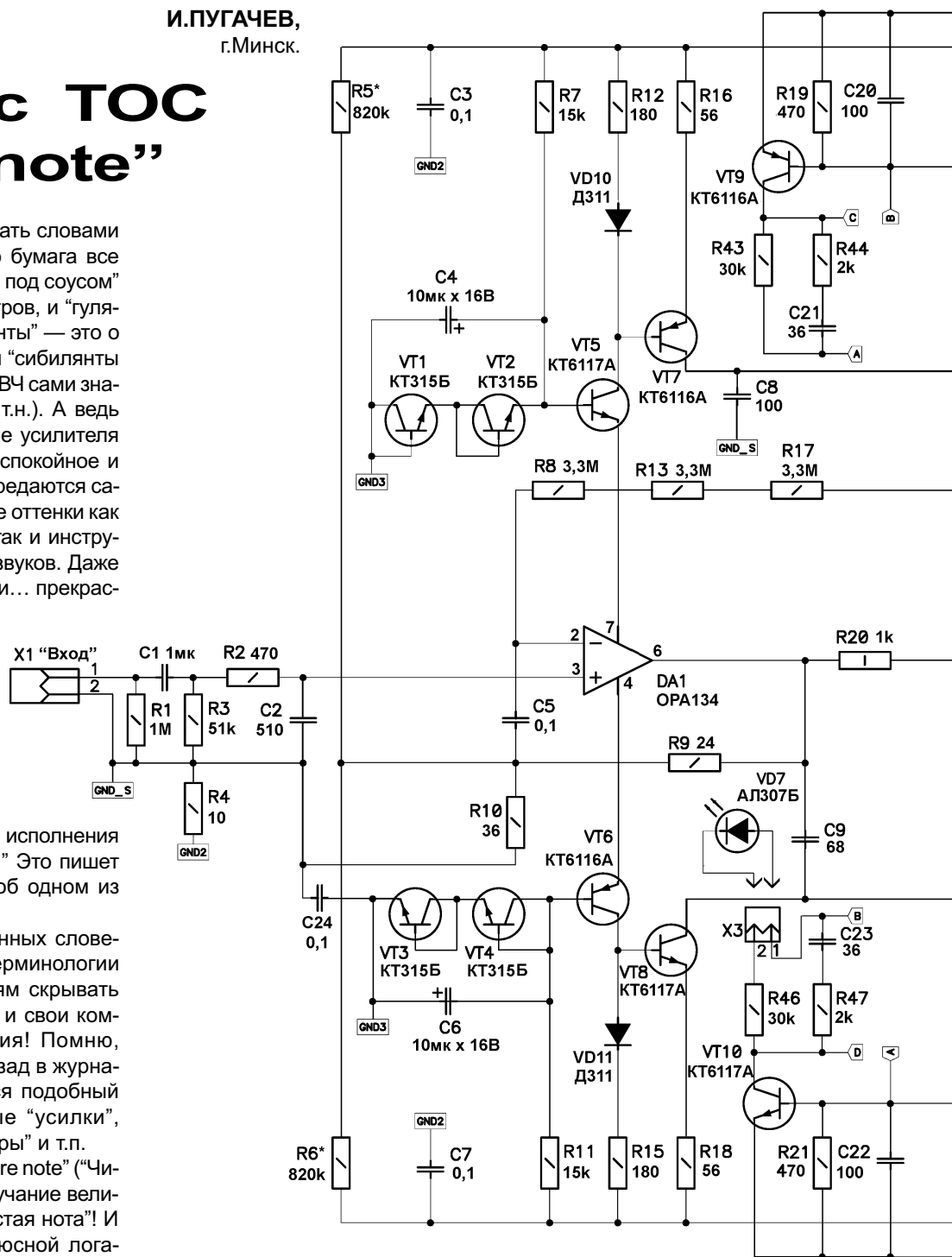
Использование жаргонных словечек и наукообразной терминологии позволяет многим людям скрывать свою некомпетентность и свои комплексы. Вечная история! Помню, еще лет 40...50 тому назад в журнале “Радио” критиковался подобный стиль — всевозможные “усилки”, “кондеры”, “напряжетомеры” и т.п.

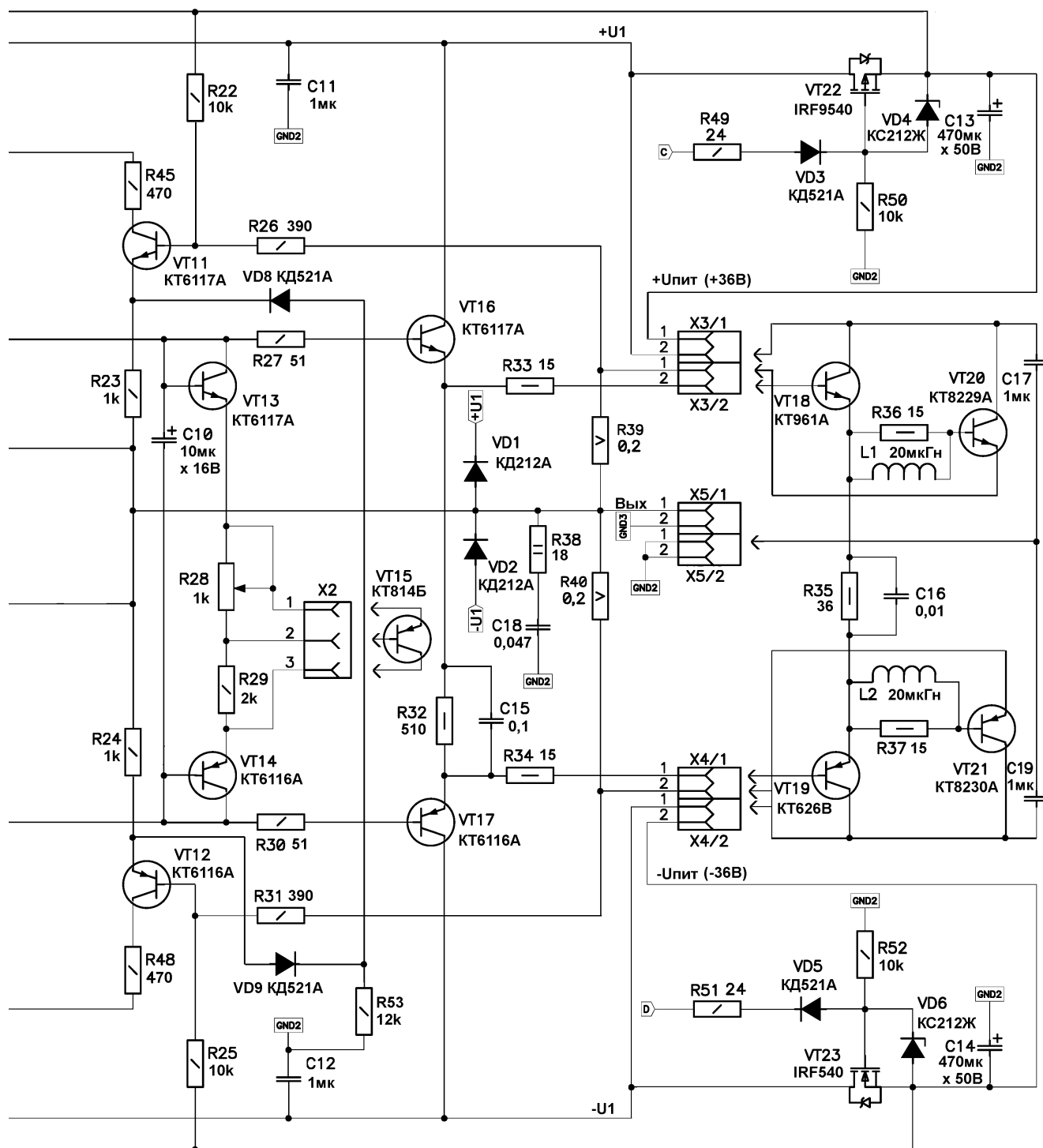
О своем усилителе “Pure note” (“Чистая нота”) скажу так: звучание великолепное! Воистину, “чистая нота”! И это благодаря однополюсной логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ), или однополюсной “диаграмме Боде”, как ее чаще всего называют, поскольку он ее придумал [1]. Усилители с двухполюсной диаграммой Боде звучат

похуже. Кстати, усилитель Д.Андронникова — с однополюсной диаграммой Боде.

Теория и практика операционных усилителей (ОУ) недвусмысленно

показывают области применения “двухполюсных” ОУ: в усилителях синусоидальных сигналов, в звуковых генераторах, ГСС. А там, где сигналы импульсные, т.е. наши “род-





ные”, музыкальные, требуются “однополюсные” ОУ.

Однополюсность сама по себе еще не гарантирует высокого качества. Множество ОУ (почти все) име-

ют однополюсную диаграмму Боде, но для звуковых применений годятся только те, которые обеспечивают высокую линейность передаточной характеристики в реальных ус-

ловиях. Что это за условия? Все достаточно просто: малый коэффициент гармоник или коэффициент интермодуляции при широкой полосе воспроизводимых частот, реальных

сопротивления на входах и на выходе. Малый и стабильный коэффициент гармоник сравнительно легко получить за счет глубокой отрицательной обратной связи и высокой скорости нарастания (V_u). Но здесь — свои проблемы!

Многие разработчики УМЗЧ сбалансировались двухполюсной диаграммой Боде. Оно и понятно: с ней линейность выше, усилитель устойчив. Но они или забыли, или не знали о том, что страдает переходная характеристика, а вместе с ней и звук. Он становится «бледным» и невыразительным — «неживым».

В последнее время чаще стали появляться (сужу по Интернету) усилители с однополюсной диаграммой Боде и, к тому же, достаточно линейные в широкой полосе: «ASR», «Prophet-master Amp», «MBL», «Lynx PA21». А ведь усилитель Александра — из той же когорты, и он известен с 1990 г. Возможно, к ним относится и «Yamaha M-2» — еще более ранний. Все эти усилители очень хорошо звучат.

Мне удалось сравнить звучание своего усилителя со звучанием «Yamaha M-2». Объем комнаты прослушивания был около 150 м³, время реверберации — примерно 0,5 с. Это близко к оптимальному [2]. Акустические системы — мониторы дальнего поля фирмы JBL (4 Ом, 800 Вт) — трехполосные, высоколинейные. Источник аудиосигнала — CD-проигрыватель, диски — отобранные: классика, джаз, вокал. Подводимая к АС мощность для комфортного прослушивания составляла не более 10 Вт. В этих условиях три искушенных слушателя со своими CD не выявили разницы в звучании усилителей.

Затем были прослушаны дорогие однотактные моноблоки на лампах 300В (без ОС, разумеется), тщательно отлаженные перед испытанием. Как и следовало ожидать, классики и джаза с большими составами оркестров, моноблоки «не тянули» (особенно на форте), хотя отдельно гитара и хай-хэт звучали прекрасно. Выяснять Z-характеристику АС я не стал, и мы освободили помещение.

Теперь о моем усилителе (рис.1). Опубликованная в [3] схема УМЗЧ с токовой обратной связью (ТОС, англ. — CFB) была доработана и снабжена другой, более эффективной схемой защиты выходного каскада от перегрузок и КЗ [4]. Она незначительно модернизирована, как видно из рисунка.

Получился усилитель с таким прекрасным звучанием, что я решил дать ему имя «Pure note». А чем же мне не угодил схема усилителя Александра? Бери и собирай! Приведена даже печатная плата. Так ведь нет у меня таких комплектующих. Выходные транзисторы — IGBT, операционные усилители — OP97 и SSM2131, где их возьмешь? Правда, недавно я обнаружил, что SSM2131 — это точная копия OP42, но и его у меня нет. А вот 544УД2 и ОРА134 — есть. Кроме того, нужны 11 высокостабильных резисторов с допусками 0,05...1%. Стоимость таких резисторов может доходить до \$10 за одну штуку. Такова цена усилителя постоянного тока (УПТ), т.е. усилителя без разделительных конденсаторов.

Я ставил перед собой задачу применить в УМЗЧ токовую обратную связь при максимальной простоте схемы, и структура усилителя Александра для ее решения вполне подходит.

Оценим возможности усилителя «Pure note» по привычной для всех скорости нарастания выходного напряжения. Как я уже отмечал в предыдущей статье [3], быстродействие усилителей с ТОС характеризуется временем нарастания выходного сигнала, и оно почти не зависит от величины этого сигнала. А стоящий на входе усилителя Александра операционный усилитель характеризуется именно скоростью нарастания.

Коэффициент усиления по напряжению каскада на DA1 от входа 3 до выхода 6 равен:

$$K_1 = \frac{R_9}{R_{10}} + 1 = \frac{24}{36} + 1 = 0,667 + 1 = 1,667.$$

Коэффициент усиления от выхода ОУ (или со входа его внутреннего эмиттерного повторителя) до выхода УМЗЧ равен:

$$K_2 = \frac{R_{20}}{R_9 + R_{10}} + 1 = \frac{1000}{24 + 36} + 1 = 16,667 + 1 = 17,667.$$

Коэффициент усиления от входа 3 ОУ до выхода УМЗЧ равен:

$$K_0 = K_1 \cdot K_2 = 1,667 \cdot 17,667 = 29,45.$$

При питании УМЗЧ от двухполярного источника ± 36 В выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ может доходить до ± 30 В, тогда напряжение на входе ОУ составит:

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{K_0} = \frac{30}{29,45} = 1,02 \text{ (В)}.$$

А напряжение на выходе ОУ будет равно:

$$U_{\text{вых DA1}} = U_{\text{вх}} \cdot K_1 = 1,02 \cdot 1,667 = 1,7 \text{ (В)}.$$

Так как V_u для примененных ОУ составляет не менее 20 В/мкс, то для достижения $U_{\text{вых DA1}} = \pm 1,7$ В понадобится время:

$$t_1 = \frac{U_{\text{вых DA1}}}{V_u} = \frac{1,7}{20} = 0,085 \text{ (мкс)} = 85 \text{ (нс)},$$

если на входе ОУ действует перепад напряжения в 1,02 В с бесконечно малым временем нарастания.

Стоящие на выходе ОУ внутренние эмиттерные повторители (ЭП ОУ) входят во вторую часть УМЗЧ, охваченную ТОС. Когда напряжение на выходе 6 ОУ достигнет 1,7 В, то через последовательно включенные резисторы R9 и R10 составит по закону Ома:

$$I_R = \frac{1,7}{24 + 36} = 0,0283 \text{ (А)} = 28,3 \text{ (мА)}.$$

Весь этот ток обеспечивают выходные ЭП ОУ. Через каскады с общей базой VT5, VT6 I_R поступает в следующий каскад на VT7, VT8. Коэффициент усиления по току этого следующего каскада равен:

$$K_i = \frac{R_{12}}{R_{16}} = 3,2.$$

Ток заряда суммарной емкости C_p
 $C_p = C_8 + C_9 + 4C_{кб} = 100 + 68 + 30 \approx 200$ (пФ)
 составит

$$I_3 = I_R \cdot K_1 = 28,3 \cdot 3,2 = 91 \text{ (мА)}.$$

Время заряда C_p найдем из формулы $C_p \cdot U_{\text{вых}} = I_3 \cdot t_3$.

Тогда

$$t_3 = \frac{C_p \cdot U_{\text{вых}}}{I_3} = \frac{200 \cdot 10^{-12} \cdot 30}{91 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 65,9 \cdot 10^{-9} \text{ (с)} = 65,9 \text{ (нс)}.$$

Это при условии, что на вход каскада на VT7, VT8 поступает перепад тока с бесконечно коротким фронтом. А так как фронт сигнала от первого каскада усилителя с ТОС (ЭП ОУ) составляет $t_1 = 85$ нс, то общее время нарастания составит [5]:

$$t_n = \sqrt{t_1^2 + t_2^2} = \sqrt{85^2 + 65,9^2} \approx$$

$$\approx 107 \text{ (нс)} = 0,107 \text{ (мкс)}.$$

Скорость нарастания напряжения на C_p (на входе бустера-усилителя тока на транзисторах VT16...VT21) составит:

$$V_u = \frac{U_{\text{вых}}}{t_n} = \frac{30}{0,107} = 280 \text{ (В/мкс)}.$$

Бустер вносит свою лепту в уменьшение скорости, и реально измеренное время нарастания на выходе УМЗЧ и активной нагрузке 8 Ом (4 последовательно включенных резистора МЛТ-2) при выходном напряжении ± 10 В составило не более 150 нс. Таким образом, реальная скорость нарастания УМЗЧ составляет:

$$V_u = \frac{30}{0,15} = 200 \text{ (В/мкс)}.$$

В структуре усилителя Александра фактором, ограничивающим скорость нарастания УМЗЧ, является быстроедействие ОУ, а не его часть с ТОС. Скорость V_u этой части можно повышать до бесконечности, но, как сказал поэт: "...Где ж предел, где, извините, грань?".

Я пока остановился на полученной скорости. Она такая же, как и у Александра. Но в моем усилителе C_p почти в два раза больше при та-

ких же транзисторах и таких же емкостях $C_{кб}$, а это значит, что влияние нелинейности $C_{кб}$ будет меньше. Структура усилителя Александра позволяет заниматься оптимизацией УМЗЧ по критерию наилучшего звучания, но сейчас самое время рассмотреть схему на рис.1.

Транзисторы VT1...VT4 — это стабилизаторы напряжения на их обратносмещенных переходах э-б, примерно по 8 В на один переход. Транзисторы VT9...VT12, VT22, VT23 входят в схему защиты выходного каскада на VT20, VT21. Операционный усилитель DA1 заменен на ОРА134, что позволило исключить подстроечный резистор установки нуля УМЗЧ (место на плате для него осталось). Цоколевка усилителей 544УД2 и ОРА134 одинаковая, можно применить любой из имеющихся.

Элементы VD8, VD9 и R53 добавлены в схему защиты для исключения ложных срабатываний. На печатной плате они не были предусмотрены и монтируются навесным монтажом, как и конденсатор C24, который убирает ВЧ-возбуждение ОУ. Дроссели L1 и L2 можно не устанавливать, они просто увеличивают выходную мощность, но незначительно. Диоды VD10, VD11 добавлены для уменьшения колебаний начального тока через VT7 и VT8, следовательно, и колебаний тока через VT20, VT21 при изменении температуры окружающего воздуха.

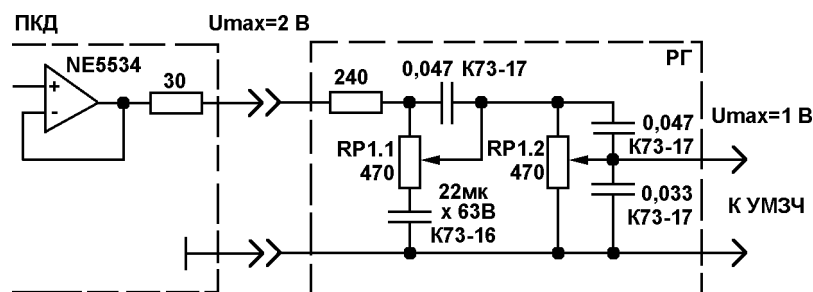
100 Ом. Если же на входе УМЗЧ установить регулятор уровня с резистором 2 кОм, то частота среза будет переменной, но не ниже 300 кГц.

Я изменял номиналы и типы переменных резисторов в регуляторах, и наилучшее звучание было получено, когда в качестве потенциометров были установлены резисторы СП5-21А сопротивлением 470 Ом, а сопротивление R2 было уменьшено до 100 Ом. И это еще не предел.

Все объясняется нелинейностью входных емкостей ОУ. Когда резисторы на обоих входах ОУ одинаковы, тогда искажения сигнала минимальны. Это отчетливо слышно, если акустика и проигрыватель компакт-дисков (грампластинок с корректором) достаточно высокого качества. Если ПКД не дает на выходе ЦАП заметной постоянной составляющей, то, как правильно подметил А.Петров, входной конденсатор C1 можно замкнуть и послушать разницу в звучании. Можно заменить тип этого конденсатора с K73-17 на K73-16 или что-либо еще. Конденсатор C5 нагружен на резистор около 10 МОм и на звук влиять не должен.

Так как я обычно слушаю музыку с громкостью 60...70 фон и менее, то требуется тонкоррекция АЧХ тракта, и в схеме необходим регулятор громкости (не уровня!) на входе УМЗЧ. Его я выполнил по схеме на рис.2. Переменные резисторы (470 Ом) — двойные в каждом канале, типа

Рис. 2



Входной фильтр ВЧ R2-C2 рассчитывался на частоту среза 600 кГц при условии, что выходное сопротивление источника сигнала (предварительного усилителя) не более

СП5-21А-2. Диапазон регулировки — 60 дБ, тонкомпенсация вполне удовлетворительная.

(Окончание следует)