

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НИЗКИХ ЧАСТОТ С ТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВЫХОДОМ

Кармышаков Аскарбек Камалдинович, к.т.н., доцент кафедры «Радиоэлектроника» института электроники и телекоммуникаций КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: a.karmyshakov@kstu.kg

Канаев Болот Бакаевич, зав. лабораториями кафедры «Радиоэлектроника» института электроники и телекоммуникаций КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова 66, e-mail: tech-astra-kg@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена проблема оптимального согласования многокаскадных усилителей с трансформаторной связью и повышения их полосы пропускания. Данная проблема решена с использованием усилителя с трансформаторной связью. Для этого авторами разработан и изготовлен высококачественный усилитель низкой частоты с применением трансформаторов с согласованным по отношению к нагрузке волновым сопротивлением. Усилитель представляет собой два дифференциальных усилительных каскада с непосредственной связью. Экспериментально для удобства визуальной оценки полосы пропускания усилителя на вход подавался прямоугольный сигнал с различными значениями частот с генератора и получены осциллограммы на входе и выходе усилителя. По осциллограммам видно, что разработанный усилитель широкополосный, ограничение полосы дают выходные транзисторы с граничной частотой 30 МГц.

Ключевые слова: трансформатор, усилитель низкой частоты, волновое сопротивление, широкополосный усилитель, длинные линии, дискретизация, дифференциальный каскад.

ТРАНСФОРМАТОРЛУК ЧЫГУУСУ МЕНЕН КЕҢ ТИЛКЕЛҮҮ ТӨМӨНКҮ ЖЫШТЫКТАГЫ КҮЧӨТКҮЧ

Кармышаков Аскарбек Камалдинович, И.Раззаков атындагы КМТУнун электроника жана телекоммуникациялар институтунун «Радиоэлектроника» кафедрасынын доценти, т.и.к., Кыргыз Республикасы, 720044, Бишкек шаары, Ч. Айтматов пр. 66, e-mail: a.karmyshakov@kstu.kg

Канаев Болот Бакаевич, И.Раззаков атындагы КМТУнун электроника жана телекоммуникациялар институтунун «Радиоэлектроника» кафедрасынын лабораториялар башчысы, Кыргыз Республикасы, 720044, Бишкек шаары, Ч. Айтматов пр. 66, e-mail: tech-astra-kg@mail.ru.

Аннотация. Макалада көп баскычтуу күчөткүчтөрдү трансформатордук кошуу менен оптималдуу дал келтирүү жана алардын өткөрүү жөндөмдүүлүгүн жогорулатуу көйгөйү каралган. Бул көйгөй трансформаторго кошулган күчөткүч аркылуу чечилди. Бул үчүн авторлор жүккө карата мүнөздүү импеданска ээ трансформаторлорду колдонуп, жогорку сапаттагы төмөнкү жыштыктагы күчөткүчтү иштеп чыгышкан жана жасашкан. Күчөткүч эки түз байланышкан дифференциалдык күчөтүүчү этаптан турат. Эксперименталдык түрдө, күчөткүчтүн өткөрмө тилкесин визуалдык баалоонун ыңгайлуулугу үчүн, генератордун ар кандай жыштыктары бар тик бурчтуу сигнал киргизилген, ал эми күчөткүчтүн кириш жана чыгышында осциллограммалар алынган. Осциллограммалар иштелип чыккан күчөткүч кең тилкелүү экенин көрсөтөт, өткөрүү

жөндөмдүүлүгүн 30 МГц жыштык менен чыгуу транзисторлору тарабынан чектелген.

Өзөктүү сөздөр: трансформатор, төмөнкү жыштыктагы күчөткүч, толкун каршылыгы, кең тилкелүү күчөткүч, узун линиялар, дискреттөө, дифференциалдык каскад.

BROADBAND LOW FREQUENCY AMPLIFIER WITH TRANSFORMER OUTPUT

Karmyshakov Askarbek Kamaldinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronics, Institute of Electronics and Telecommunications, KSTU named after I. Razzakova, Kyrgyz Republic, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave. 66, e-mail: a.karmyshakov@kstu.kg

Kanaev Bolot Bakaevich, Head laboratories of the department "Radioelectronics" of the Institute of Electronics and Telecommunications, KSTU named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, 720044, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave. 66, e-mail: tech-astra-kg@mail.ru.

Annotation. The article deals with the problem of optimal matching of multistage amplifiers with transformer coupling and increasing their bandwidth. This problem was solved by using a transformer-coupled amplifier. For this, the authors have developed and manufactured a high-quality low-frequency amplifier using transformers with a characteristic impedance with respect to the load. The amplifier consists of two direct-coupled differential amplifying stages. Experimentally, for the convenience of visual estimation of the amplifier passband, a rectangular signal with different frequencies from the generator was applied to the input, and oscillograms were obtained at the amplifier input and output. The oscillograms show that the developed amplifier is broadband, the bandwidth limitation is provided by the output transistors with a cutoff frequency of 30 MHz.

Keywords: transformer, low frequency amplifier, characteristic impedance, broadband amplifier, long lines, sampling, differential stage.

Как известно, уменьшение эффективного сопротивления нагрузки является основным недостатком усилителя бестрансформаторной связью [1,2]. Это связано с тем, что входное сопротивление усилителя низкие, а его выходное сопротивление высокое.

Когда их соединяют для создания многокаскадного усилителя, высокое выходное сопротивление или выходной импеданс одного каскада идет параллельно с низким входным импедансом следующего каскада. В результате эффективное сопротивление нагрузки уменьшается. Можно решить данную проблему с использованием усилителя с трансформаторной связью.

Построение трансформаторного усилителя. Схема усилителя, в которой предыдущий каскад подключен к следующему каскаду с помощью трансформатора, называется усилителем с трансформаторной связью.

На рис.1 приведена принципиальная схема трансформаторного усилителя. Трансформатор T_1 используется для подачи выходного напряжения первого каскада на вход второго каскада. Первичная обмотка трансформатора служит в качестве нагрузки коллектора транзистора. Вторичная обмотка трансформатора подключена между делителем потенциала и основанием второго каскада, который обеспечивает вход для второго каскада. Трансформатор используется для соединения любых двух ступеней в цепи усилителя.

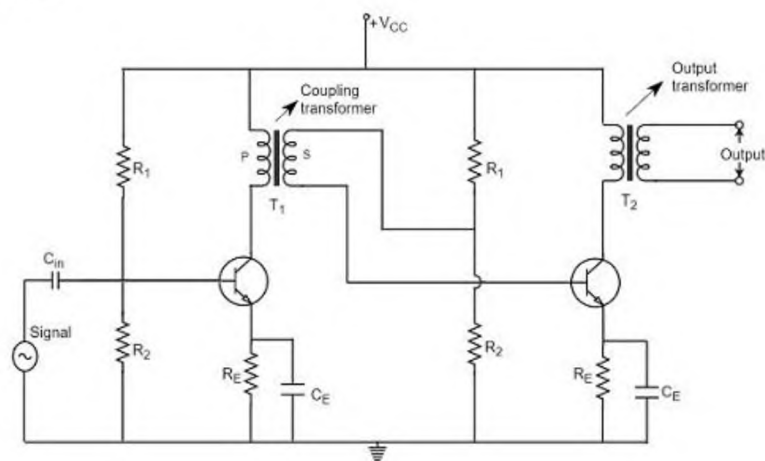


Рис.1. Принципиальная схема трансформаторного усилителя

Принцип действия и частотная характеристика усилителя с трансформаторной связью.

Усиленный транзистором переменный сигнал появляется на коллекторе, к которому подключена первичная обмотка трансформатора. Трансформатор, который используется в качестве соединительного устройства в этой схеме, обладает свойством изменения сопротивления, что означает, что низкое сопротивление каскада (или нагрузки) может быть отражено как сопротивление высокой нагрузки по сравнению с предыдущим каскадом. Трансформаторная связь обеспечивает достаточно оптимальное согласование импедансов между каскадами усилителя. Такие усилители обычно используются для усиления мощности.

На рис.2 показана частотная характеристика трансформаторного усилителя. Усиление происходит постоянным только для узкого диапазона частот. Выходное напряжение определяется как, ток коллектора, умноженного на реактивное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

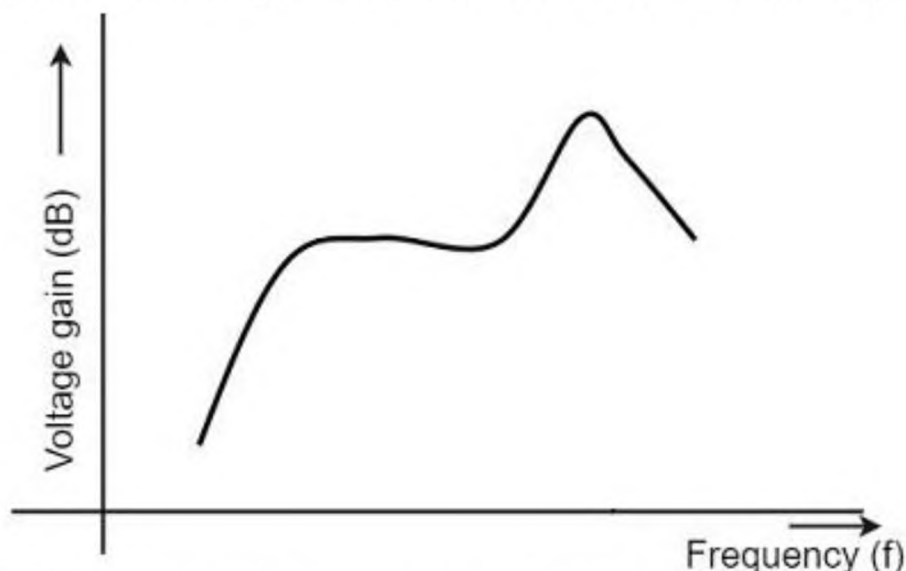


Рис.2. Частотная характеристика усилителя с трансформаторной связью

На низких частотах реактивное сопротивление первичной обмотки начинает уменьшаться, что приводит к падению усиления. На высоких частотах емкость между витками обмоток трансформатора действует как перепускной конденсатор для уменьшения выходного напряжения и, следовательно, усиления.

Основные достоинства усилителя с трансформаторной связью:

- Обеспечивается оптимальное согласование импеданса.
- Низкие потери мощности в коллекторе и базовых резисторах.
- В эксплуатации очень эффективен.

Недостатки усилителя с трансформаторной связью:

- В связи с тем, что усиление меняется с частотой - плохая частотная характеристика.
- Частотные искажения.
- Гул при работе трансформатор.
- Большие габариты и дороговизна трансформаторов.

Решение проблемы. Для усилителей с трансформаторным выходом фактором, ограничивающим полосу пропускания, является сам трансформатор. Без применения глубокой отрицательной обратной связи и корректирующих RC цепей верхняя граничная частота трансформатора не превышает 5...10 кГц, что не позволяет использовать трансформатор для создания усилителей низкой частоты класса HI-FI и HI-END.

Однако в радиотехнике широко используются широкополосные трансформаторы на длинных линиях (ТДЛ), полоса пропускания которых практически не зависит от частотных свойств магнитных сердечников. Так, на низкочастотных ферритовых кольцах 400...1000НН получаются широкополосные трансформаторы до нескольких десятков МГц. Это достигается за счет того, что на низких частотах энергия передается путем перемагничивания сердечника т.е. индуктивной связи между обмотками. На высоких частотах связь между обмотками приобретает непосредственный электромагнитный характер, для этого обмотки должны представлять собой длинные линии с известным волновым сопротивлением. Другими словами - все обмотки трансформатора должны быть сделаны из

параллельных или слегка скрученных проводов с одинаковыми расстояниями между ними.

В книге «Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схмотехнике» [3] на рис.3 приведена номограмма для определения волнового сопротивления Z_w двухпроводной линии.

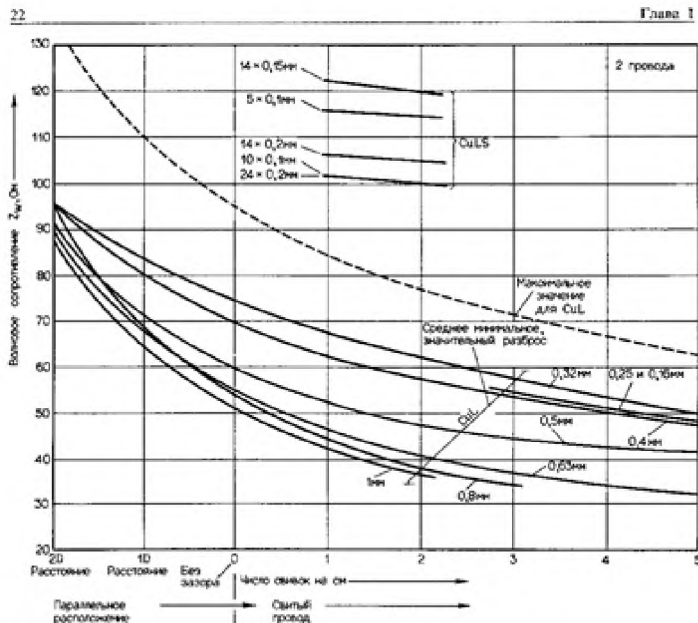


Рис.3. Номограмма для определения волнового сопротивления Z_w двухпроводных линий

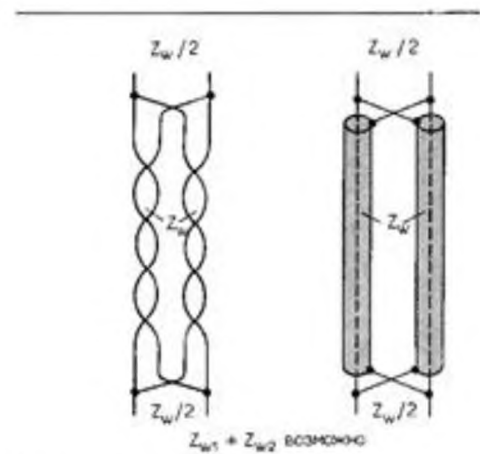


Рис.4. Уменьшение эффективного волнового сопротивления Z_w двух линий путем их параллельного включения

ТДЛ должен быть нагружен по входу и выходу на активные нагрузки равные примерно Z_w линии из которых он сделан. На практика допустимо двукратное отличие Z_w и сопротивления нагрузки R_n .

По номограмме видно, что для нескрученных проводов $Z_w = 50...75$ Ом в зависимости от диаметра провода.

В радиотехнике такой диапазон сопротивлений нагрузки является стандартным. В аудиотехнике нагрузки имеют диапазон 4...16 Ом, что не позволяет выполнить ТДЛ для звуковых частот на обычных обмоточных проводах.

В вышеуказанной книге на рис. 1.24 показан способ уменьшения Z_w путем запараллеливания пар проводов. Для обмоток ТДЛ используем литцендрат (в переводе с немецкого «прядь, пучок проводов») 30x0,12мм, получаем 15 параллельных пар. 15 проводов 0,12мм эквивалентна проводу 0,4мм, для которой по номограмме $Z_w = 70$ Ом, отсюда линия из 15 пар проводов будет иметь $Z_w = 70/15 = 4,67$ Ом. Для проверки широкополосности ТДЛ изготовленного с применением литцендрата был разработан усилитель. Усилитель представляет собой два дифференциальных усилительных каскада с непосредственной связью. Выходной каскад, нагруженный на трансформатор со средней точкой, заимствован из книги «Проектирование транзисторных УНЧ А.В.Цыкина 1968» [4]. Входной каскад по постоянному току представляет собой два источника тока стабилизирующий рабочий режим выходного каскада. Кроме того, диоды VD2, VD3 осуществляют температурную стабилизацию рабочего режима выходного каскада. По переменному току входной каскад является обычным дифференциальным усилителем, на один вход которого подается звуковой сигнал, на другой вход через делитель поступает сигнал отрицательной обратной связи с выхода усилителя.

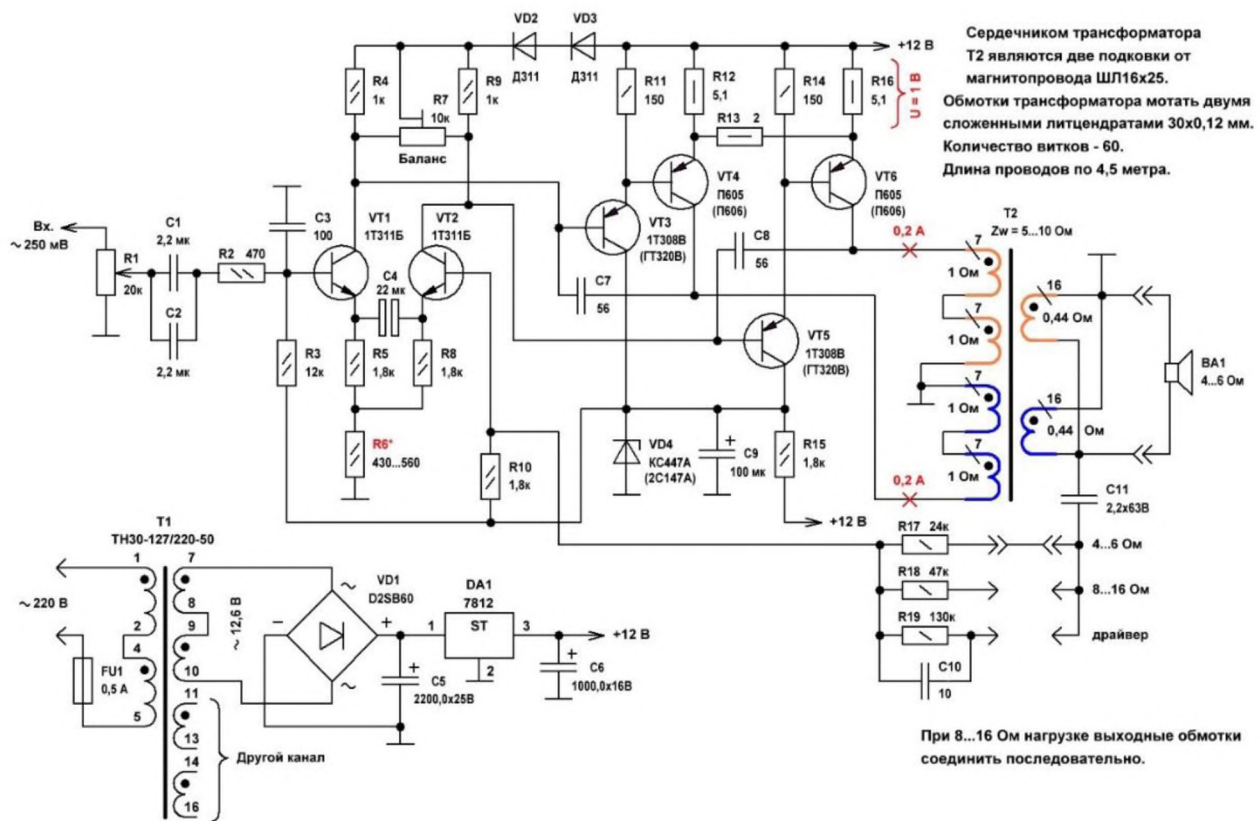


Рис. 5. Принципиальная схема усилителя

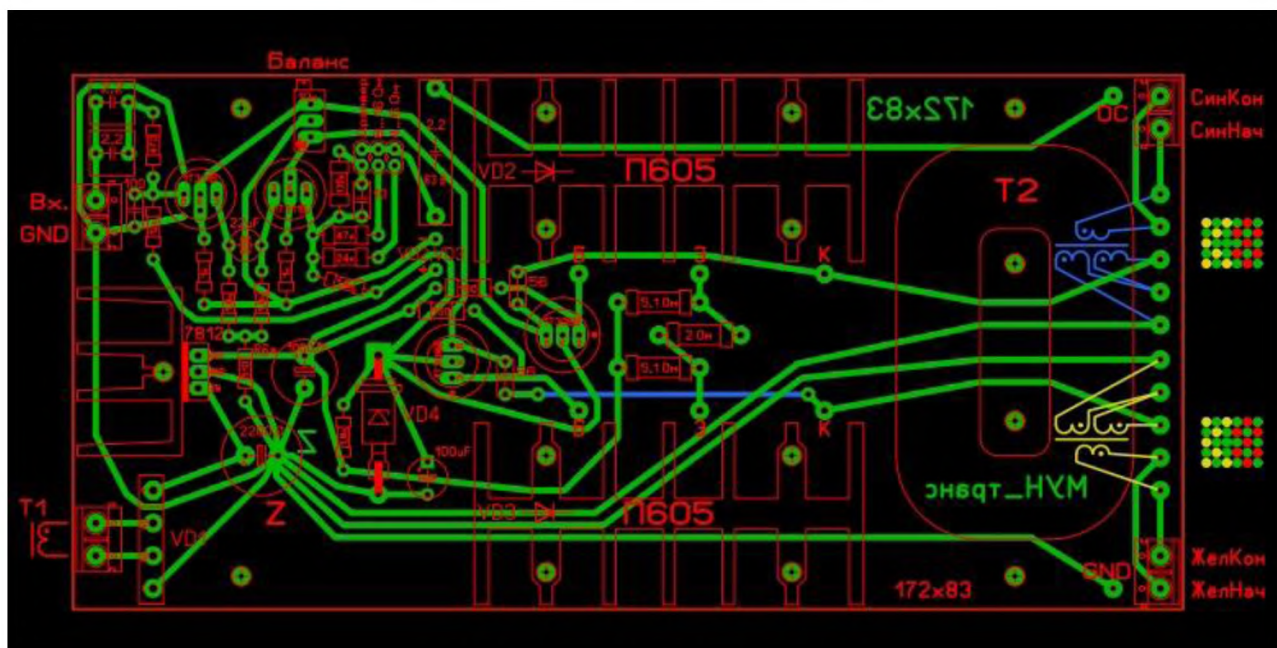


Рис.6. Печатная плата усилителя

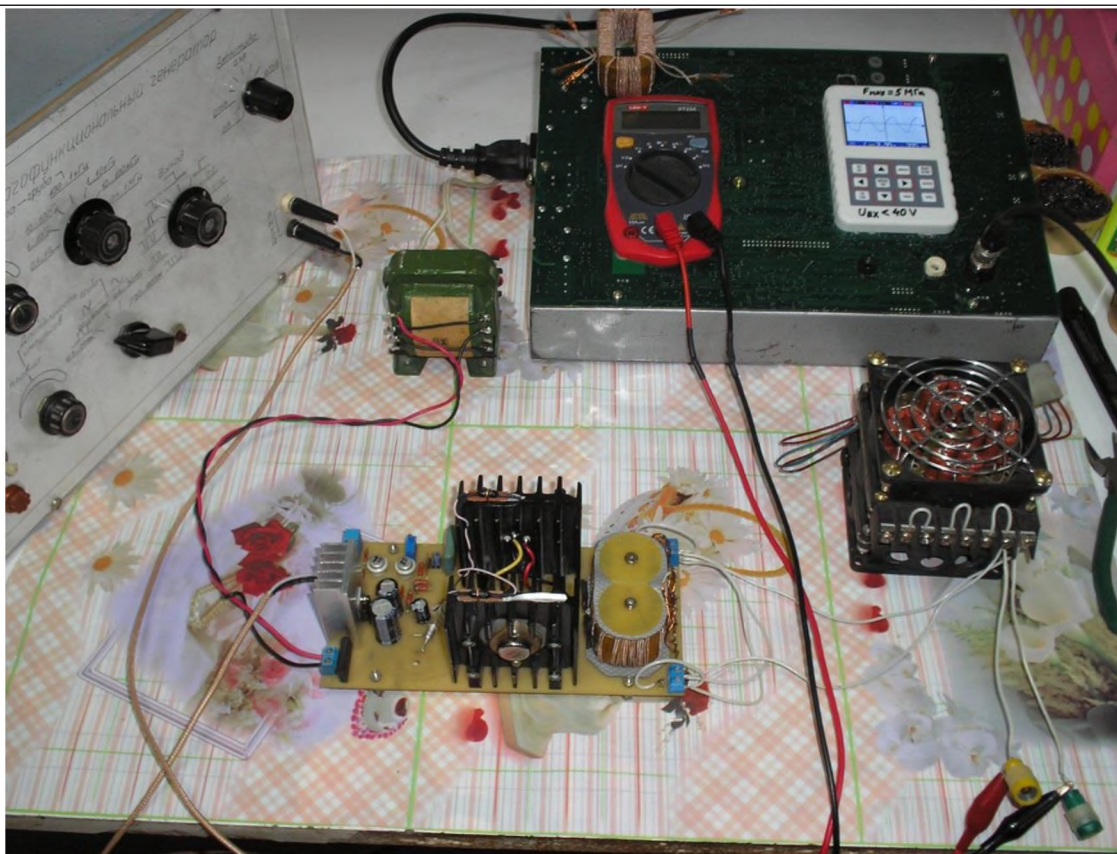


Рис.7. Подключение усилителя к измерительным приборам

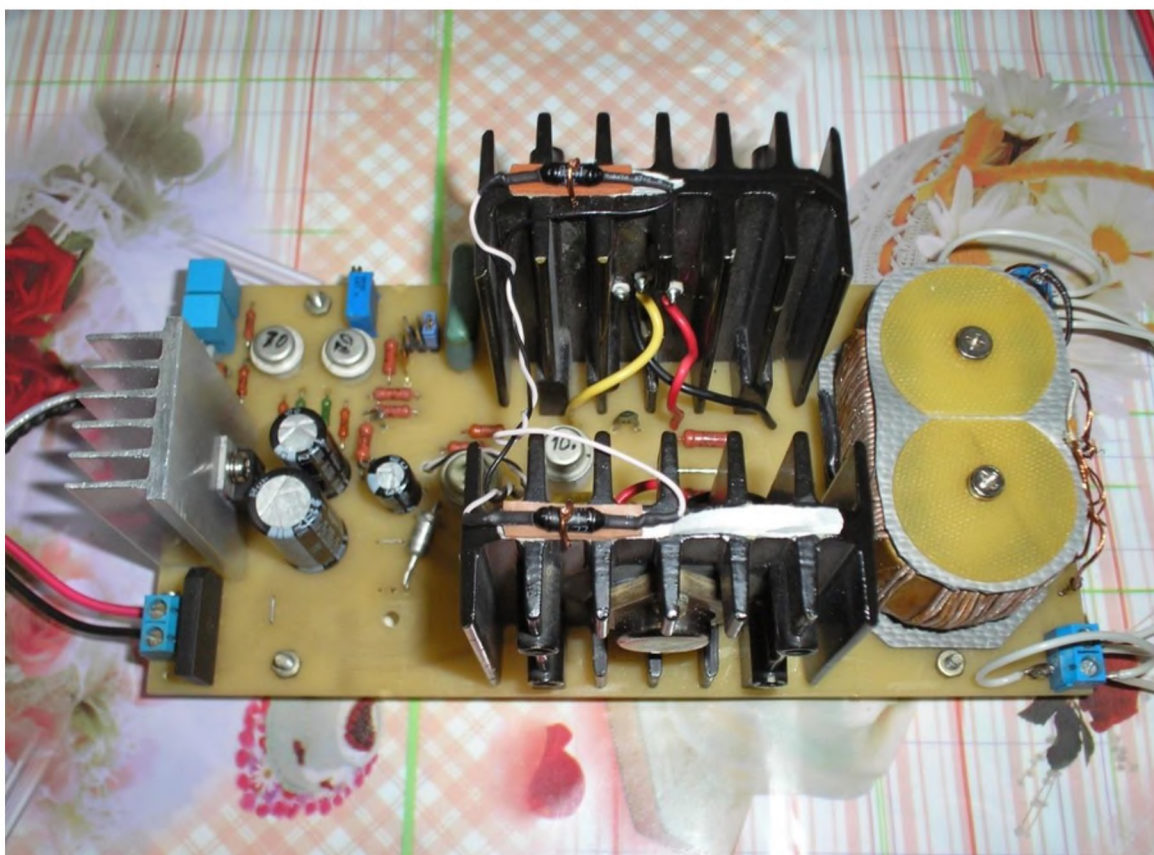
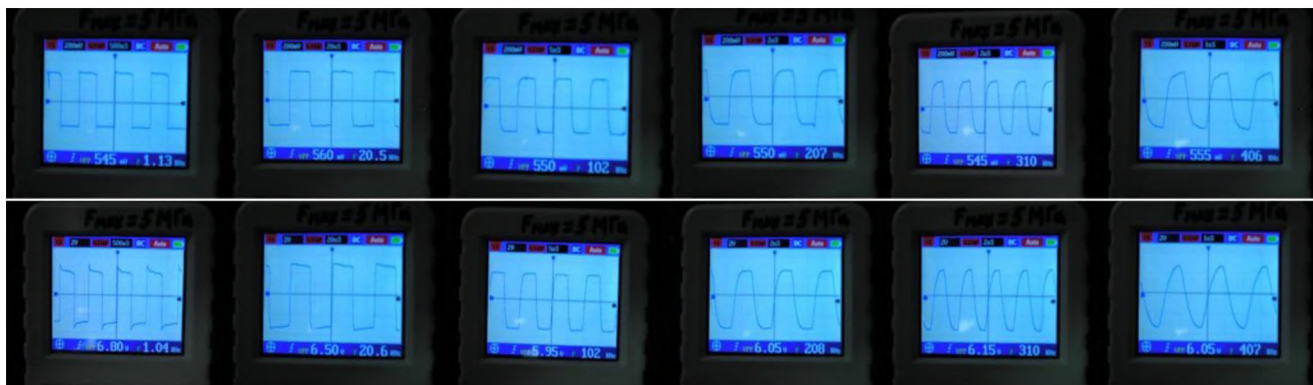


Рис.8. Внешний вид усилителя

Для удобства визуальной оценки полосы пропускания усилителя на вход подавался прямоугольный сигнал частотой 1, 20, 100, 200, 300 и 400 кГц с генератора, изготовленного по схеме из журнала «Радио 1987г. №01» [5].

К сожалению, генератор не держит ни частоту, ни уровень, ни форму, поэтому пришлось снимать осциллограммы на входе и выходе:



По осциллограммам видно сохранение формы импульсов до 100 кГц, далее идет плавная деградация фронтов при сохранении амплитуды импульсов. Таким образом, для синусоидального сигнала АЧХ усилителя линейна до частоты 400 кГц. Возможно трансформатор еще более широкополосен, ограничение полосы дают выходные транзисторы П605 с граничной частотой 30 МГц (частота работы транзистора в схеме с общей базой). В схеме с общим эмиттером граничную частоту необходимо делить на коэффициент передачи базового тока (бета), которая для данных транзисторов равна 20...60. Для транзисторов П605 максимальная частота в схеме с общим эмиттером равна $30 \text{ МГц} / 60 = 0,5 \text{ МГц} = 500 \text{ кГц}$.

Выводы: Применяя трансформаторы с согласованным по отношению к нагрузке волновым сопротивлением можно строить высококачественные усилители низкой частоты, вплоть до классов HI-FI и HI-END. Также необходимо обратить внимание на такой факт, с 2004 года действует новый аудиостандарт для компьютеров HD AUDIO, который предписывает частоту дискретизации 192 кГц. При такой частоте дискретизации, согласно теореме Котельникова, сигнальная полоса частот будет $192 \text{ кГц} / 2 = 96 \text{ кГц}$.

Список литературы

1. Москатов Е. А. Электронная техника. – Таганрог, 2004. – 121 стр.
2. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1991. – 622с.: ил.
3. Ред Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике. Москва: Мир. 1990-256 с.
4. А.В.Цыкина. Проектирование транзисторных УНЧ. Издательство «Связь». 1968.-185 с.
5. Журнал «Радио» 1987г. №01.
6. Кармышаков, А. К. Интегрированный учебно-лабораторный комплекс по электронике / А. К. Кармышаков, Б. Б. Канаев // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2016. – № 4(40). – С. 228-233.
7. Молдоева, М. К. Перспективы процесса внедрения широкополосного доступа в кыргызстане / М. К. Молдоева, А. К. Кармышаков // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2017. – № 1-2(41). – С. 59-62.