

сигнал будет иметь следующий вид, что по сути является сложением искаженного сигнала с инвертированным шумовым сигналом или вычитанием этих сигналов соответственно:

$$Ch(t) = S(t) + (-Z(t)) = S(t) - Z(t) \quad (5)$$

Графически результаты данного процесса изображены на рис. 1.

Так же данный метод можно использовать для спектральной компенсации. Принцип действия заключается в следующем, сначала принимается только шумовой сигнал, затем принятый сигнал спектрально анализируют, а после выстраивают фильтры таким образом, что бы их передаточная характеристика была схожа с обратной к спектральной характеристике шумового сигнала. Такой подход применяется в современном программном обеспечении для пост-обработки звука.

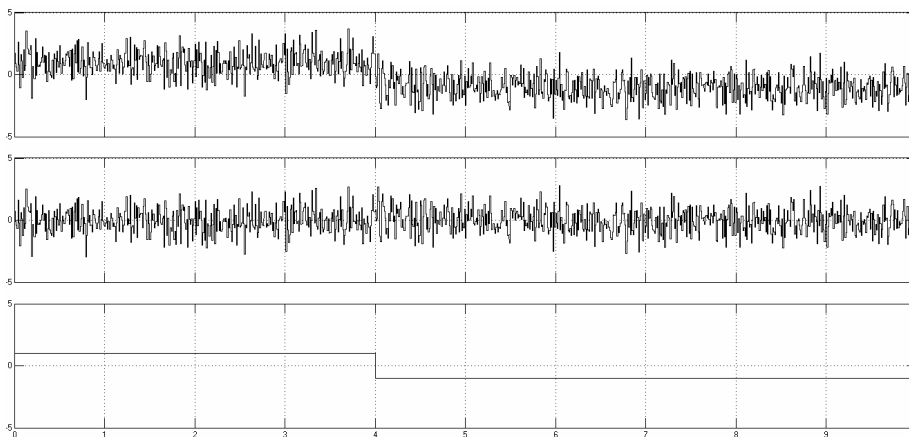


Рис. 1. Осциллограммы полезного искаженного сигнала, шумового сигнала и полезный неискаженный сигнал

На данный момент тема является весьма актуальной.

Не смотря на простоту компенсационного метода, его применение возможно далеко не всегда, а потому не стоит, при сооружении высокоточных систем, рассчитывать только на этот метод, а использовать его в комплексе с другими методами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бойерле, Х. Коммуникация в технике автоматизации / Х. Бойерле, П. Беценар, Г. Бах ; пер. с нем. – Берлин, Мюнхен : АО Siemens, 1991. – 155 с.
2. Варакин, Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин. – М. : Совет. радио, 1978. – 375 с.
3. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. для вузов / И.С. Гоноровский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.
4. Гук, М. Аппаратные средства локальных сетей : энцикл. / М. Гук. – Спб. : Питер, 2000. – 576 с.

УДК 621.375.018.756

### МОСТОВОЙ УСИЛИТЕЛЬ КЛАССА D

**В.В. ЛОВКИС**

(Представлено: канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ)

*Рассматривается мостовой усилитель низкой частоты класса D. Изучены основные характеристики усилителя: коэффициент полезного действия, коэффициенты усиления и искажения, мощность, коэффициент демпфирования. Установлено, что мостовой усилитель класса D обладает высоким коэффициентом полезного действия, имеет малые гармонические искажения, достаточно большой коэффициент демпфирования и небольшие размеры печатной платы.*

В течение последних нескольких лет, отмечается рост рыночного спроса на аудио усилители с высокой выходной мощностью и большим количеством каналов. Это является результатом увеличения динамического диапазона аудио оборудования и движение в сторону многоканальных звуковых систем. Это потребовало комплексных аудио усилителей с небольшим количеством внешних компонентов и

низким энергопотреблением. Традиционные усилители класса АВ, которые еще в значительной степени используются, не подходят для удовлетворения этих требований. Все это привело к быстрому развитию технологических процессов для изготовления на одном кристалле аналоговых и цифровых схем, мощных полевых транзисторов и схем управления ими [1].

В этом режиме усилительный элемент переключает выходную линию то на одну шину питания, то на другую со сверхзвуковой частотой, при этом продолжительность выходных импульсов и паузы между ними подбирается таким образом, чтобы среднее выходное напряжение соответствовало уровню усиливаемого сигнала. Иначе говоря, речь идет о широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Несмотря на перспективность такого подхода, этот режим еще мало применяется в аудиотехнике из-за трудности магнитной совместимости, ведь мощные прямоугольные импульсы частотой 500 кГц являются источником электромагнитных помех.

По принципу работы усилители класса D похожи на импульсные стабилизаторы и блоки питания. На выходной каскад подается последовательность ШИМ-прямоугольных импульсов, скважность которых пропорциональна амплитуде усиливаемого сигнала. На выходе таких усилителей устанавливаются сглаживающие фильтры. Усилители такого типа могут работать в режиме усиления аналоговых или цифровых сигналов (без их предварительного преобразования).

Усиление аналоговых сигналов происходит следующим образом. Встроенный генератор вырабатывает последовательность прямоугольных импульсов постоянной частоты (называемой несущей), и интегратор превращает ее в последовательность треугольных импульсов. Частота несущей задается внешней RC-цепью, резонатором или внешним генератором. Полученная последовательность и входной сигнал поступают на компаратор, выступающий в роли модулятора. С выхода компаратора снимается последовательность прямоугольных импульсов, скважность которых пропорциональна мгновенным значениям амплитуды входного сигнала (взятым через промежутки времени, соответствующие периоду несущей частоты). Эта последовательность поступает на усилитель мощности, работающий в ключевом режиме. После усиления сигнал поступает на фильтр нижних частот (ФНЧ), который подавляет несущую частоту, ее гармоники и побочные составляющие спектра модуляции (рис. 1, а). Основное условие работы такой схемы – несущая частота должна быть как минимум вдвое больше максимальной частоты усиливаемого сигнала. Это гарантирует отсутствие помех в усиливаемом сигнале. Обычно частота дискретизации выбирается в пределах от 250 до 500 кГц (что обусловлено простотой фильтрации) [2].

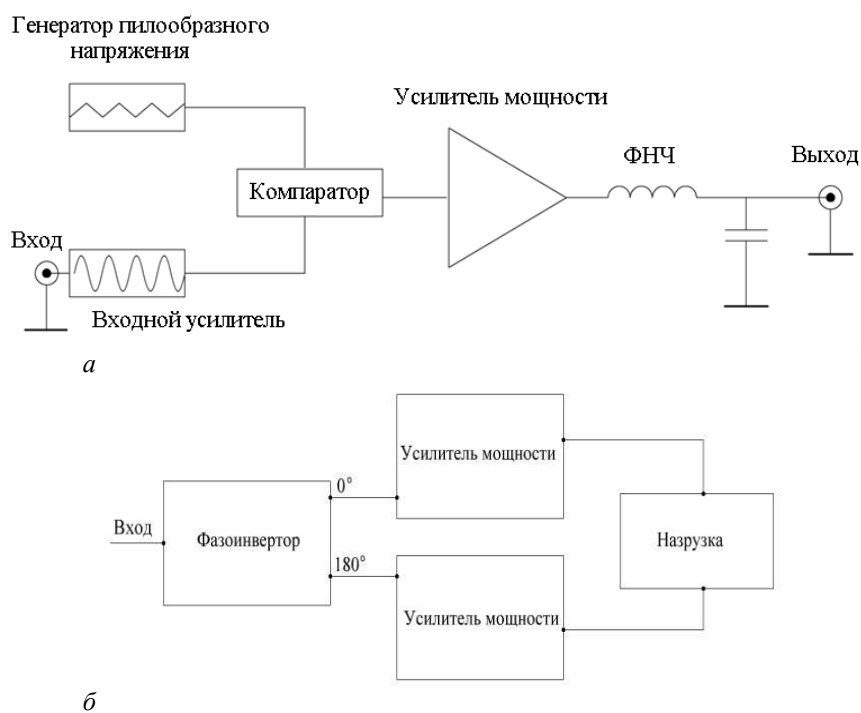


Рис. 1. Блок-схемы усилителя мощности (а) и мостового усилителя класса D (б)

На основе двух блок-схем был реализован опытный образец мостового усилителя низкой частоты класса D, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

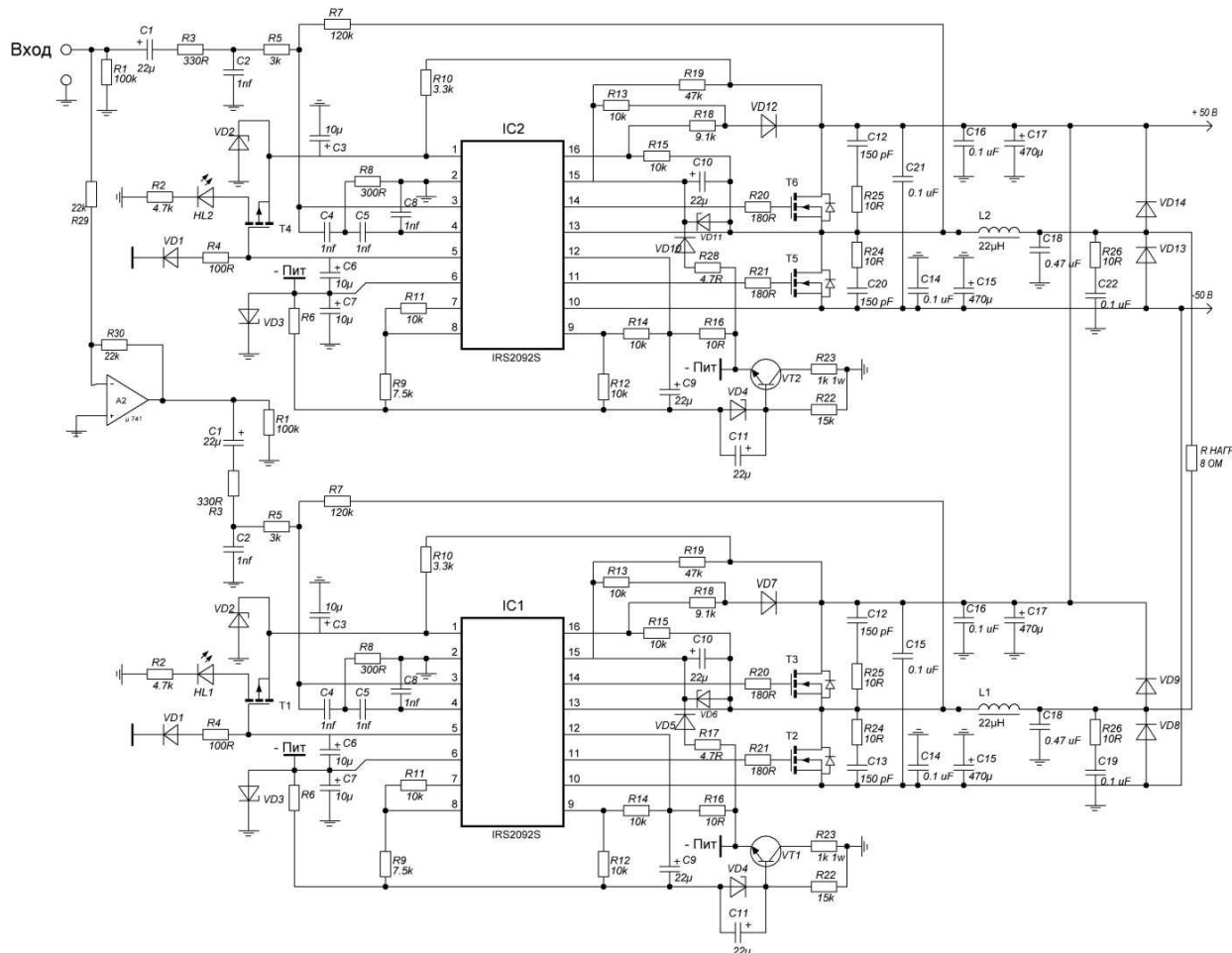


Рис. 2. Принципиальная схема мостового усилителя класса D

Из схемы видно, что незаземленная нагрузка подключается к выходам усилителя с противофазными выходными сигналами. К достоинствам такой схемы можно отнести учетверенную максимальную выходную мощность при том же напряжении питания, по сравнению с усилителями мощности с одиночным выходом и с заземленной нагрузкой. Кроме того, такая схема создает симметричные токовые пульсации по цепям питания с удвоенной частотой сигнала, что упрощает построение источников питания (соответствующей мощности), исключая возможные условия появления перекосов выходных двуполярных напряжений. Отметим, что мостовые усилители не вызывают появления сильноточных сигнальных токов по "общему" проводу, что намного улучшает совместимость узлов в многоканальной (например, стерео) аппаратуре [3].

При том, что мощность в нагрузке стала в 4 раза больше, ее нельзя выделять на сопротивление 4 Ом – это может привести к чрезмерно большому току через ключи и их выходу из строя. Поэтому данный усилитель лучше всего использовать на нагрузку в 8 Ом вместо 4, при этом его мощность составит 700 Вт вместо 1400 Вт, а демпфирующий фактор останется прежним, ведь сопротивление нагрузки возросло в два раза.

Еще одним важным требованием к настройке несущих частот усилителей является то, что поскольку они работают на общую нагрузку, необходимо согласование по частоте работы этих усилителей. При этом отклонения не должны были превышать  $\pm 5\%$ . Если пренебречь этим требованием, то будет резкое увеличение частотных искажений или даже выход усилителя из строя.

Преимуществами мостового усилителя класса D является хорошее соотношение размеров, КПД и выходной мощности. По приведенной выше схеме был построен усилитель размерами печатной платы 10×5 (см) при выходной мощности 700 Вт (сопротивление нагрузки 8 Ом). Значения КПД для этого класса составляют до 96%, так как рабочая точка транзистора очень короткое время находится на линейном участке характеристики, потери в закрытом или полностью открытом состоянии минимальны, а ток через транзисторы при отсутствии сигнала равен нулю.

Именно эти факторы позволяют экономить материалы на изготовление массивных радиаторов для охлаждения выходных транзисторов, а также снизить потребление электроэнергии. Усилитель изготовлен на двухсторонней плате (рис. 3), что повысило стабильность его работы. Нижний слой платы занимает микросхема, пассивные и активные элементы, работающие на высокой частоте (450 кГц). Дорожки сделаны везде тонкими и короткими для получения меньших помех и наводок. Ведь на высоких частотах любой длинный проводник будет работать, как антенна. Верхний слой платы служит «экраном», он защищает усилитель от влияния другой аппаратуры работающей вблизи его. В таблице приведены основные характеристики, разработанного мостового усилителя класса D.

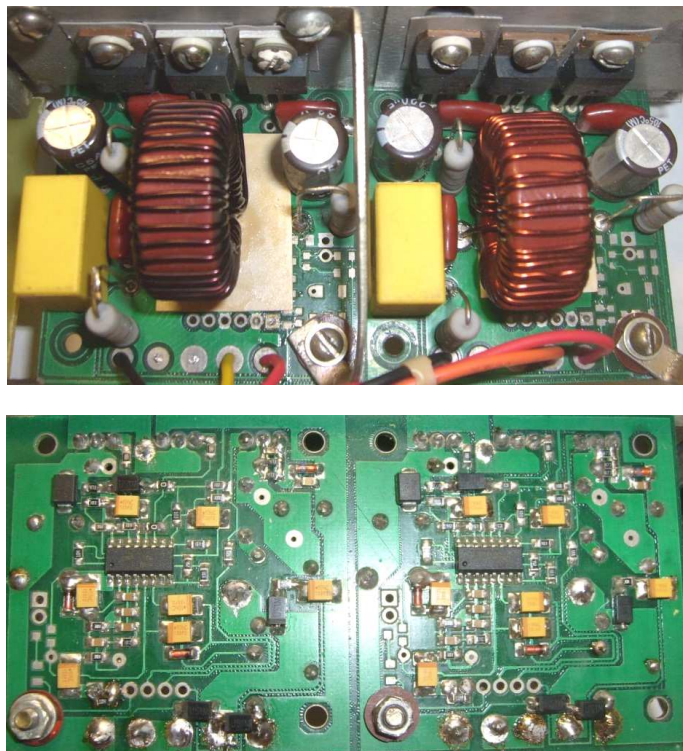


Рис. 3. Внешний вид платы мостового усилителя класса D

Таблица

Характеристики усилителя класса D

Мощность, Вт	Искажения, %	Коэффициент усиления, отн. ед.	кпд, %	Уровень шума, дБ	Коэффициент демпфирования, отн. ед.	Воспроизводимые частоты, Гц
700	0,001	60	90	- 85	100	20 – 25000

Таким образом, в результате исследования установлено, что мостовые усилители класса D обладают характеристиками, позволяющими говорить об их преимуществе над усилителями других классов: высокая выходная мощность обеспечивается устройством с малыми габаритами, высокий кпд (около 90%), малые искажения усиленного сигнала, хорошая нагрузочная способность, большой коэффициент демпфирования, малые шумы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов, А.А. Прецизионные усилители низкой частоты / А.А.Данилов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 352 с.
2. Дуглас, С. Проектирование усилителей мощности звуковой частоты / С. Дуглас. – 3-е изд. – ДМК Пресс, 2009. – 536 с.
3. Шкритек, П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике / П. Шкритек. – Мир, 1991. – 446 с.