МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«**КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ФГБОУ ВО «КубГУ»)**

**Физико-технический факультет**

**Кафедра радиофизики и нанотехнологий**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕНОМЕНА «ЛАМПОВОГО ЗВУЧАНИЯ»**

Работу выполнил \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Крупка Никита Геннадьевич

Курс 3

Направление 11.03.01 Радиотехника

Научный руководитель

преподаватель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ И.С. Петриев

Нормоконтролер

канд. физ.-мат. наук, доцент \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М. А. Жужа

Краснодар 2018

[**РЕФЕРАТ**](#Содержание)

Курсовой проект 32 с., 13 рис., 1 табл., 19 источников.

УСИЛИТЕЛИ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ИСКАЖЕНИЯ, КАСКАД, АУДИОУСИЛИТЕЛИ, ТРАНЗИСТОР, ТРИОД, ПЕНТОД

Объектами исследования в данной курсовой работе являются усилители мощности звуковой частоты лампового и транзисторного типов.

Целью данного проекта является исследование и сравнительный анализ характеристик усилителей звуковой частоты ламповых и транзисторных типов для объяснения феномена «лампового звучания».

В результате выполнения курсового проекта состоят в следующем: изучен феномен «лампового звука»; изучены принципы работы транзисторных и ламповых усилителей мощности звуковой частоты, схемотехника усилителей мощности звуковой частоты; проведен сравнительный анализ характеристик усилителей звуковой частоты различных типов, таких как: ламповые и транзисторные; произведено сравнение нелинейных искажений транзисторного и лампового усилителя звуковой частоты.

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Введение 4](#_Toc516149034)

[1 Феномен «Лампового звука» 5](#_Toc516149035)

[1.1 Гитарные усилители 5](#_Toc516149036)

[1.2 Студийное оборудование 6](#_Toc516149037)

[1.3 Аппаратура «хай-фай» 7](#_Toc516149038)

[1.4 Особенности лампового звука 8](#_Toc516149039)

[1.5 Эксперименты Хэмма 9](#_Toc516149040)

[1.6 Влияние обратной связи 10](#_Toc516149041)

[2 Классификация усилителей и их характеристики 12](#_Toc516149042)

[1.1 Классификация усилителей 12](#_Toc516149043)

[1.2 Типы УМЗЧ 15](#_Toc516149044)

[1.3 Основные характеристики усилителей звуковой частоты 16](#_Toc516149045)

[3 Влияние выходного сопротивления УМЗЧ на искажения в динамической головке 17](#_Toc516149046)

[4 Сравнительный анализ лампового и транзисторного усилителей мощности звуковой частоты 26](#_Toc516149047)

[Заключение 30](#_Toc516149048)

[Список использованных источников 31](#_Toc516149049)

# [ВВЕДЕНИЕ](#Содержание)

**«Ламповый звук»** — термин, возникший во второй половине XX века в среде любителей звукозаписи и музыкантов для обозначения отличий в звучании музыки, прошедшей усилительный тракт, выполненный на электронных лампах, от музыки, записанной или воспроизведённой с помощью усилителей на транзисторах. Популярность противопоставления «тёплого», «мягкого», «комфортного» лампового звука и «беспристрастного, мониторного» звучания твердотельного усилителя разные исследователи приписывают смеси (в разной степени) эмоциональных, технических и коммерческих причин.

В последние три десятилетия глобальное проникновение полупроводниковых технологий вытеснили лампу на задний план и многие твердили, что она исчезнет безвозвратно. Но лампа в который раз оказалась незаменимой и сегодня мы являемся свидетелями своеобразного возрождения лампового звука, и причиной этого являются цифровые технологии. Почему сегодня, в эпоху транзисторов и интегральных схем, самые тонкие ценители звука опять платят баснословные суммы за ламповые усилители? Или же это маркетинговый ход производителей?

**Целью работы** является исследование и сравнительный анализ характеристик усилителей звуковой частоты ламповых и транзисторных типов для объяснения феномена «лампового звучания».

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- изучить схемотехнику усилителей звуковой частоты;

- провести сравнительный анализ нелинейных искажений, вносимых ламповыми и транзисторными усилителями звуковой частоты.

# 1 Феномен «Лампового звука»

Выделяются три слабопересекающиеся и мало влияющие друг на друга области применения радиоламп в записи и воспроизведении музыки [1].

- предусилители в музыкальных инструментах, особенно электрогитарах;

- преобразователи звука в студиях звукозаписи;

- дорогостоящее воспроизводящее оборудование для аудиофилов.

Во всех трёх областях в конце XX века наблюдался быстрый рост применения ламп [1]. Эффекты от применения ламп в разных областях отличаются; объединяет все три применения по сути лишь использование однотипных ламп и схемотехнических приёмов.

## 1.1 Гитарные усилители

Исследователи единодушны в том, что ламповые усилители, используемые с электрогитарами, вносят в звук специфические искажения — а музыкантам и любителям музыки эти искажения нравятся, ламповый звук описывается как «округлённый» и «пробивной», а транзисторный — как «тонкий», «пустой», «металлический» [2]. Называются несколько причин такого предпочтения:

- гитарные усилители часто используются для того, чтобы существенно изменить звук гитары, и потому являются по сути частью инструмента. Достоверность воспроизведения звука в таком случае бессмысленна, и оценка качества может производиться лишь субъективно [1];

- использование ламповых усилителей во время становления рок-музыки в 1950—1960-х годах привёло к тому, что искажения, создаваемые простейшими ламповыми усилителями без обратной связи, стали стандартом звучания для электрогитар [1];

- поведение лампового усилителя при насыщении создаёт эффект медного духового инструмента [1, 3];

- слабое регулирование источника питания в ламповых усилителях вызывает эффект «касания»: при усилении звука напряжение питания падает с небольшим ослаблением громкости [4];

- особенности сжатия амплитуды сигнала при использовании лампового усилителя, возможно, влияют также на акустическую обратную связь между динамиками и струнами гитары в концертной обстановке [1].

Эти причины заставляют конструкторов твердотельных гитарных усилителей имитировать дефекты ламповых усилителей, изготовители пытаются это делать в течение десятилетий — с переменным успехом, так как многие музыканты предпочитают настоящие радиолампы. Э. Барбур объясняет разницу в звуке британского и американского рока разницей в усилителях: на заре британского рока, в 1962 году, Джим Маршалл сконструировал в Лондоне свой собственный гитарный усилитель, использовавший дешёвые и маломощные лампы. Из-за высокой перегрузки звук усилителя был «хрустящим», что и стало классическим звучанием английского рока. В США популярным производителем был «Фендер», профессиональные модели которого характеризовались «звенящим» звуком и сильными компрессионными эффектами из-за использования в источнике питания вакуумного выпрямителя и связанной с этим слабой зарегулированности напряжения питания [1].

Звучание бас-гитары не улучшается от внесения искажений, потому усилители для бас-гитар быстро перешли на транзисторы, хотя интерес к ламповым версиям вновь возник в 1990-е годы [[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_abd89dadb32a79b3-1).

## 1.2 Студийное оборудование

В студиях звукозаписи ламповые схемы чаще всего применяются для усиления сигналов в конденсаторных микрофонах для записи голоса. Лампы в этой ситуации имеют два преимущества [[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_abd89dadb32a79b3-1):

- крайне высокое входное сопротивление позволяет снизить искажения в самом микрофоне;

- высокий динамический диапазон и мягкое насыщение уменьшают искажения в случаях, когда громкость голоса певца в пике превышает ожидаемый уровень.

С 1985 года стали вновь пользоваться спросом среди инженеров в студиях звукозаписи и традиционные ламповые усилители, при этом особую популярность приобрело оборудование прошлых лет (1949—1970-х годов). Э. Барбур объясняет это особенностями искажений тех усилителей, создающими эффект «мягкого» звука; более современные ламповые усилители не имеют этих дефектов и потому звучат ближе к «жёстким» транзисторным [[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_abd89dadb32a79b3-1).

## 1.3 Аппаратура «хай-фай»

Ламповые усилители нашли нишу на рынке «хай-фай» — высококачественной (и очень дорогой) аппаратуры звуковоспроизведения, рассчитанной на любителей звукозаписи. Как и предыдущие две области применения, эту отличает наличие коммерчески значимого количества людей, предпочитающих ламповый звук транзисторному, или из-за особенностей звуковосприятия, или вследствие привычки (Э. Барбур отмечает, что возраст большинства аудиофилов — 30—50 лет в конце XX века — означает, что они в детстве росли под звук рок-гитар) [[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_abd89dadb32a79b3-1). Роль ламп в этой области вызывает наибольшие споры: «„ламповый звук“ — это устойчивый миф, в который каждый вкладывает своё собственное понимание» (А. Гриф [[5]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-5)).

Некоторые исследователи рассматривают популярность лампового звука как чисто культурный феномен. Так, культуролог В. Софронов-Антомони [[6]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-6) сводит популярность радиоламп среди аудиофилов к сформировавшемуся обществу потребления и связанному с избытком потребления убеждению, что *существуют технические устройства для записи и воспроизведения музыки, которые обладают «нечто», неким Иксом, который делает их способным донести до слушателя «волшебство» (Икс) музыки*. Близкую позицию занимает Л. Ганкин, который считает «тёплый ламповый звук» мемом, символом уюта, вроде пледа и связывает его со стремлением человека к неидеальности и хрупкости, которые в избытке демонстрируются теми же грампластинками [[7]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-7).

С другой стороны, предлагаются чисто технические объяснения предпочтению усилителей на лампах, от откровенно псевдонаучных («Электроны, летящие в вакууме, движутся несколько иначе, чем электроны, протекающие в переходах транзистора. Этим объясняется мягкость звучания ламповых усилителей» [[8]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-8)) до серьёзных исследований в рецензируемых технических журналах, которые поясняют, почему неаккуратно сконструированный усилитель на транзисторах будет порождать заметные на слух искажения (см. следующий раздел).

## 1.4 Особенности лампового звука

Обсуждение отличий лампового звука от транзисторного — это область дискуссий, которая как «на заказ» приспособлена для горячих споров [[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_abd89dadb32a79b3-1). Музыка создаётся и прослушивается людьми, а функционирование нелинейных систем в цепочке «ухо-мозг» наукой изучено очень слабо. Объективные измерения искажений с помощью приборов потому не очень полезны — ведь особенности человеческого восприятия приводят к тому, что некоторые типы искажений неприятны в малых количествах, а другие не вызывают раздражения при высоких уровнях. Определённые искажения могут даже восприниматься положительно: «Когда кто-нибудь говорит, что у этого гитарного усилителя большой и толстый звук, то частично это связано с насыщением выходного трансформатора» [[1]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_abd89dadb32a79b3-1).

Отала и Лейнонен [[9]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_a1b0c4ada96d9a50-9) отмечают, что в ситуации, когда ламповый и транзисторный усилители согласно формальным измерениям не отличаются до уровней, нечувствительных для человеческого слуха — но различия всё-таки слышны — возможны лишь комбинация из двух ответов:

- традиционные (на 1977 год) измерения усилителей до некоторой степени не отражали особенностей, важных для звуковосприятия;

- стандартные методы измерения усилителей не улавливали существенных искажений.

## 1.5 Эксперименты Хэмма

Исследователи проявили интерес к феномену лампового звука уже в начале 1970-х годов. Одна из ранних работ была выполнена в 1972 году Р. Хэммом [[3]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_a5d9f40118a8f170-3). Хэмм постулировал, что:

- «тонкую» разницу между транзисторным и ламповым звуком может уловить «каждый», если «слушать внимательно». При этом некоторые люди смогут описать разницу словами, а некоторые — лишь высказать предпочтение (в пользу лампового звука);

- искажения нужно измерять на слух с помощью экспертов-музыкантов и звукооператоров, а не через замеры инженеров-схемотехников;

- обнаружить существенную разницу удалось лишь в двух случаях: предусилители и выходные каскады. В обоих случаях электроника в этом месте сопряжена с механическими устройствами;

- в практике студий звукозаписи при использовании твёрдотельного предусилителя применялся резистивный аттенюатор входного сигнала. При тех же микрофоне и допустимом диапазоне входного сигнала в случае лампового предусилителя аттенюаторы не применялись. Хэмм потому сделал вывод, что усилители на практике перегружаются и изучать следует поведение усилителей в случае перегрузки.

В эксперименте Хэмм предложил неформальной группе студийных инженеров прослушать одни и тот же звук, улавливаемый одним и тем же микрофоном, но проходящий через три переключаемых исследователем усилителя (на лампах, транзисторах и операционных усилителях) и с разными уровнями ослабления сигнала микрофона. Обнаружилось, что все три усилителя неотличимы на слух, пока уровень входного сигнала находится в допустимых границах. Однако, поведение усилителей при перегрузке (наблюдаемой на практике), сильно отличалось:

- искажения, вносимые ламповым усилителем, не были заметны на слух до уровня входного сигнала, превышающего допустимый уровень на 20 дБ;

- в случае транзисторного усилителя, искажения были слышны при превышении на 10 дБ;

- предусилитель на операционных усилителях демонстрировал искажения уже на уровне +5 дБ.

Хэмм связал полученные результаты с разным набором гармоник, порождаемых усилителями при перегрузке:

- вторая гармоника отстоит от основного тона на октаву и потому плохо слышна, однако создаёт ощущение «полноты» звука;

- третья гармоника ощущение «покрытости», ограниченности звука;

- комбинация второй, третьей, четвёртой, пятой гармоник создаёт ощущение «медного», полного звука;

- нечётные гармоники более высокого порядка (седьмая и выше) музыкально не связаны с основным тоном и потому ухо чувствительно к ним, воспринимая их при этом также как показатель громкости (видимо, из-за того, что количество этих гармоник повышается, когда музыкальный инструмент играет громче).

Хэмм связал плохой результат твердотельных усилителей при перегрузках с повышенной генерацией ими высоких гармоник, которые человеческий слух воспринимает как искажения или просто шум. По Хэмму, особенности лампового усилителя приводят к тому, что он лучше работает в качестве импровизированного компрессора аудиосигнала в неизбежных на практике случаях перегрузки [[10]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-10).

## 1.6 Влияние обратной связи

У. Хоге [[11]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-11) в заметке отмечает, что его анализ усилителей, звук которых музыканты описывали, как «транзисторный», всегда выявлял использование компонент с малым частотным диапазоном и, как следствие, большим уровнем обратной связи. Он указывает на работы М. Отала [[12]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-12), изучавшего динамические искажения, которые не обнаруживаются при анализе синусоидальных сигналов и предлагает правило: «используя компоненты с частотным диапазоном (без обратной связи) меньше, чем диапазон сигнала, вы попадёте в ловушку переходных интермодуляционных искажений».

Отала и Лейнонен [[9]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_a1b0c4ada96d9a50-9) напрямую связали ламповый звук с отсутствием или невысоким уровнем обратной связи в усилителях на лампах. По их замечанию, наличие выходного трансформатора в ламповых схемах и его сложная передаточная функция не позволяли использовать обратную связь с уровнем выше 20—30 дБ, но даже в этих случаях эксперты отмечали эффект «завесы», которая возникала в звуке при высоком уровне обратной связи. После появления транзисторных усилителей погоня за малым уровнем гармонических и интермодуляционных искажений привела к тому, что в продаже появились усилители с глубиной обратной связи до 60—100 дБ. Вывод исследователей: глубокая обратная связь (на уровне 60 дБ), внесённая в усилитель с целью получить бессмысленно низкий уровень гармонических искажений, приводит к очень сильным динамическим искажениям, которые могут перегрузить усилитель и породить гигантские искажения даже в случаях, когда уровень входного сигнала остаётся в формально допустимом диапазоне [[13]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-_a1b0c4ada96d9a5a-13).

В конце 1970-начале 1980-х годов ряд статей в журнале «Радио» также относили особенности транзисторного звука к наличию искажений динамических характеристик сигналов [14 — 16] (особенно заметных при воспроизведении ударных и струнных инструментов — в виде выбросов на фронтах импульсных сигналов) и меньшему уровню интермодуляционных искажений в ламповых усилителях, который объяснялся отсутствием высших гармоник в спектре лампового усилителя [[17]](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9_%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA#cite_note-12-1981-17).

# 2 [Классификация усилителей и их характеристики](#Содержание)

## 1.1 Классификация усилителей

Усилители мощности звуковой частоты по способу работы с входным сигналом и принципу построения усилительных каскадов классифицируются по нескольким параметрам. На рисунке 1 показаныуглы отсечки для усилительных каскадов классов А, В, АВ и С**.**



Рисунок 1 — Углы отсечки для усилительных каскадов классов А, В, АВ и С

**Класс А.** Усилители класса А работают без отсечки сигнала на наиболее линейном участке вольтамперной характеристики усилительных элементов. Это обеспечивает минимум нелинейных искажений (THD и IMD), причем как на номинальной мощности, так и на малых мощностях.

За этот минимум приходится расплачиваться внушительными потребляемой мощностью, размерами и массой. В среднем КПД усилителя класса А составляет 15—30 %, а потребляемая мощность не зависит от величины выходной мощности. Мощность рассеяния максимальна при малых сигналах на выходе.

**Класс В.** Усилительные элементы работают с отсечкой 90 градусов. Для обеспечения такого режима работы усилителя используется двухтактная схема, когда каждая часть схемы усиливает свою «половинку» сигнала. Основная проблема усилителей в классе В — это наличие искажений из-за ступенчатого перехода от одной полуволны к другой (рисунок 2). Поэтому, при малых уровнях входного сигнала нелинейные искажения достигают своего максимума.



Рисунок 2 — Искажения типа ступенька в усилителях класса В

Достоинством усилителя класса В можно считать высокий КПД, который теоретически может достигнуть 78 %. Потребляемая мощность усилителя пропорциональна выходной мощности, и при отсутствии сигнала на входе она вообще равна нулю. Несмотря на высокий КПД, обнаружить среди современных моделей усилители класса В вряд ли кому-то удастся.

**Класс АВ.** Как следует из названия усилители класса АВ – это попытка объединить достоинства усилителей А и В класса, т.е. добиться высокого КПД и приемлемого уровня нелинейных искажений. Для того чтобы избавиться от ступенчатого перехода (рисунок 3) при переключении усилительных элементов используется угол отсечки более 90 градусов, т.е. рабочая точка выбирается в начале линейного участка вольтамперной характеристики. За счет этого при отсутствии сигнала на входе усилительные элементы не запираются, и через них протекает некоторый ток покоя, иногда значительный. Из-за этого уменьшается коэффициент полезного действия и возникает незначительная проблема стабилизации тока покоя, но зато существенно уменьшаются нелинейные искажения. Среди аналоговых усилителей данный режим работы встречается чаще всего.



Рисунок 3 — Снижение искажений типа «ступенька» в усилителях класса АВ

Сравнительные характеристики усилителей, работающих в режимах А, В, АВ приведены на рисунке 4 и в таблице 1.



Рисунок 4 — Графики зависимости коэффициентов нелинейных искажений

от выходной мощности усилителя для классов А, В и АВ

Таблица 1 — Сравнительные характеристики усилителей, работающих

в режимах А, В, АВ

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Характеристики | A | B | AB |
| Теоретический КПД | 50% | 78% | Зависит от режима |
| Реальный КПД | 15-30% | 50-60% | 40-50% |
| Нелинейные искажения | малые | Высокие | средние) |
| Потребляемая мощность | постоянная | зависит от выходной | зависит от выходной |
| Термостабильность | низкая | высокая | средняя |

**Класс D.** Строго говоря, класс D — это не только схема построения или режим работы выходного каскада — это отдельный класс усилителей. Более логично было бы назвать их импульсными, но историческое название «цифровой» за ними уже прочно закрепилось. Рассмотрим общую структурную схему усилителя, представленную на рисунке 5.

Оцифрованный сигнал поступает на аудио процессор, который в свою очередь с помощью широтно-импульсной модуляции (PWM — Pulse Width Modulation) управляет силовыми полупроводниковыми ключами. Можно добавить, что ШИМ-сигнал можно получить и без аналого-цифрового преобразования с помощью компаратора и генератора, например, пилообразного сигнала. Такой метод в усилителях класса D также широко применяется, но благодаря развитию цифровой техники постепенно уходит в прошлое. Аналого-цифровое преобразование обеспечивает дополнительные возможности по обработке звука: от регулировки уровня громкости и тембра до реализации цифровых эффектов, таких как реверберация, шумоподавление, подавление акустической обратной связи и др.



Рисунок 5 — Блок схема цифрового усилителя

## **1.2 Типы УМЗЧ**

**Ламповые.** Это усилители на электронных лампах. Составляли основу всего парка УНЧ до 70-х годов. В 60-х годах выпускались ламповые усилители очень большой мощности (до десятков киловатт). В настоящее время используются в качестве инструментальных усилителей и в качестве звуковоспроизводящих усилителей. Составляют львиную долю аппаратуры класса HI-END. А также занимают большую долю рынка профессиональной и полупрофессиональной гитарной усилительной аппаратуры;

**Транзисторные.** Усилители на биполярных или полевых транзисторах. Такая конструкция оконечного каскада усилителя является достаточно популярной, благодаря своей простоте и возможности достижения большой выходной мощности, хотя в последнее время активно вытесняется усилителями на базе интегральных микросхем;

**Интегральные.** Усилители на интегральных микросхемах (ИМС). Существуют микросхемы, содержащие на одном кристалле как предварительные усилители, так и оконечные усилители мощности, построенные по различным схемам и работающие в различных классах. Из преимуществ — минимальное количество элементов и, соответственно, малые габариты;

**Гибридные.** Усилители, в которых часть каскадов собрана на полупроводниковых элементах, а часть на электронных лампах. Иногда гибридными также называют усилители, которые частично собраны на интегральных микросхемах, а частично на транзисторах или электронных лампах;

Устанавливаемые типы усилителей мощности звуковой частоты зависят от используемых усилительных элементов в конструкции.

## 1.3 Основные характеристики усилителей звуковой частоты

**Импеданс (сопротивление).** Это полное электрическое сопротивление проводника при прохождении переменного тока. Наиболее распространенные значения для усилителя: 8 Ом и при 4 Ом.

**КНИ.** Коэффициент гармонических и интермодуляционных (нелинейных) искажений – этот показатель говорит нам о степени искажения звукового сигнала на выходе из усилителя.

**Отношение сигнал/шум.** Безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума. Обычно выражается в децибелах.

[**Коэффициент демпфирования**](#Содержание). Это отношение выходного сопротивления усилителя к сопротивлению нагрузки акустической системы. Динамическая головка после воспроизведения звуковых частот имеет определенную инерцию, если коэффициента демпфирования недостаточно, то колебания диффузора создают разного рода призвуки, окрашивающие звучание. Чем выше показатель демпфирования, тем быстрее останавливается мембрана динамика.

**Диапазон воспроизводимых частот.** Чем он шире, тем лучше. Для справки: принято считать, что человеческое ухо способно улавливать звуковые колебания в диапазоне от 20 Гц до 20000 Гц.

# 3 Влияние выходного сопротив­ления УМЗЧ на искажения в динамической головке

Разницу в звучании громкоговорителей при работе с различными УМЗЧ, в первую очередь, замечают, сравнивая ламповые и транзисторные усилители: спектр их гармонических искажений часто существенно отличается [19]. Иногда заметные отличия бывают и среди усилителей одной и той же группы. Например, в одном из аудиожурналов оценки, данные ламповым УМЗЧ мощностью 12 и 50 Вт, склонялись в пользу менее мощного. Или оценка была необъективной?

Как нам кажется, автор статьи доказательно объясняет одну из мистических причин возникновения в громкоговорителях переходных и интермодуляционных искажений, создающих заметную разницу в звучании при работе с различными УМЗЧ. Он предлагает также доступные методы существенного снижения искажений громкоговорителей, которые достаточно просто реализуются с применением современной элементной базы.

В настоящее время считается общепризнанным, что одним из требований к усилителю мощности является обеспечение неизменности его выходного напряжения при изменении сопротивления нагрузки. Иными словами, выходное сопротивление УМЗЧ должно быть невелико по сравнению с нагрузочным, составляя не более 1/10 — 1/1000 от модуля сопротивления (импеданса) нагрузки |Zн|. Эта точка зрения отражена в многочисленных стандартах и рекомендациях, а также в литературе. Специально введен даже такой параметр, как коэффициент демпфирования - Kd (или демпинг-фактор), равный отношению номинального сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению усилителя Rвых УМ. Так, при номинальном сопротивлении нагрузки, равном 4 Ом, и выходном сопротивлении усилителя 0,05 Ом Kdбудет равен 80. Действующие ныне стандарты на аппаратуру HiFi требуют, чтобы значение коэффициента демпфирования у высококачественных усилителей было бы не менее 20 (а рекомендуется — не менее 100). Для большинства транзисторных усилителей, имеющихся в продаже, Kd превышает 200.

Доводы в пользу малого Rвых УМ (и соответственно высокого Kd) общеизвестны: это обеспечение взаимозаменяемости усилителей и акустических систем, получение эффективного и предсказуемого демпфирования основного (низкочастотного) резонанса громкоговорителя, а также удобство измерения и сопоставления характеристик усилителей. Однако, несмотря на правомерность и обоснованность вышеприведенных соображений, вывод о необходимости такого соотношения, по мнению автора, *принципиально ошибочен*!

Всё дело в том, что этот вывод делается без учета физики работы электродинамических головок громкоговорителей (ГГ). Подавляющее большинство разработчиков усилителей искренне полагает, что всё, что от них требуется — это выдать напряжение требуемой величины на заданном сопротивлении нагрузки с возможно меньшими искажениями. Разработчики громкоговорителей, в свою очередь, вроде бы должны исходить из того, что их изделия будут питаться от усилителей с пренебрежимо малым выходным сопротивлением. Казалось бы, все просто и ясно — какие тут могут быть вопросы?

Тем не менее, вопросы, и очень серьёзные, имеются. Главным из них является вопрос о величине *интермодуляционных искажений*, вносимых ГГ при работе ее от усилителя с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением (источника напряжения или источника ЭДС).

Какое отношение к этому может иметь выходное сопротивление усилителя? Имеет, и самое прямое, несмотря на то, что факт этой зависимости упоминается крайне редко. Во всяком случае, не обнаружено современных работ, в которых бы рассматривалось это влияние на *все* параметры сквозного электроакустического тракта — от напряжения на входе усилителя до звуковых колебаний. При рассмотрении этой темы ранее почему-то ограничивались анализом поведения ГГ вблизи основного резонанса на нижних частотах, тогда как не менее интересное происходит на заметно более высоких частотах — на пару октав выше резонансной частоты.

Для восполнения этого пробела и предназначена эта статья. Надо сказать, что для повышения доступности изложение весьма упрощено и схематизировано, поэтому ряд «тонких» вопросов остался нерассмотренным. Итак, чтобы понять, как выходное сопротивление УМЗЧ влияет на интермодуляционные искажения в громкоговорителях, надо вспомнить, какова физика излучения звука диффузором ГГ.

Ниже частоты основного резонанса при подаче синусоидального напряжения сигнала на обмотку звуковой катушки ГГ амплитуда смещения её диффузора определяется упругим противодействием подвеса (или сжимаемого в закрытом ящике воздуха) и почти не зависит от частоты сигнала. Работа ГГ в этом режиме характеризуется большими искажениями и очень низкой отдачей полезного акустического сигнала (очень низким КПД).

На частоте основного резонанса масса диффузора вместе с колеблющейся массой воздуха и упругостью подвеса образуют колебательную систему, аналогичную грузику на пружинке. КПД излучения в этой области частот близок к максимальному для данной ГГ.

Выше частоты основного резонанса силы инерции диффузора вместе с колеблющейся массой воздуха оказываются большими, чем силы упругости подвеса, поэтому смещение диффузора оказывается обратно пропорциональным квадрату частоты. Однако ускорение диффузора при этом теоретически не зависит от частоты, что и обеспечивает равномерность АЧХ по звуковому давлению. Следовательно, для обеспечения равномерности АЧХ ГГ на частотах выше частоты основного резонанса к диффузору со стороны звуковой катушки необходимо прикладывать силу постоянной амплитуды, как это следует из второго закона Ньютона (*F = ma*).

Сила же, действующая на диффузор со стороны звуковой катушки, пропорциональна току в ней. При подключении ГГ к источнику напряжения U ток I в звуковой катушке на каждой частоте определяется из закона Ома I(f) = U / Zг(f), где Zг(f) — зависящее от частоты комплексное сопротивление звуковой катушки. Оно определяется преимущественно тремя величинами: активным сопротивлением звуковой катушки Rг (измеряемым омметром), индуктивностью Lг.На ток влияет также и противо-ЭДС, возникающая при перемещении звуковой катушки в магнитном поле и пропорциональная скорости перемещения.

На частотах заметно выше основного резонанса величиной противо-ЭДС можно пренебречь, поскольку диффузор со звуковой катушкой просто не успевают разогнаться за половину периода частоты сигнала. Поэтому зависимость Zг(f) выше частоты основного резонанса определяется в основном величинами Rг и Lг

Так вот, ни сопротивление Rг,ни индуктивность Lг особым постоянством не отличаются. Сопротивление звуковой катушки сильно зависит от температуры (ТКС меди около +0,35 %/оС), а температура звуковой катушки малогабаритных среднечастотных ГГ при нормальной работе изменяется на величину в 30—50оС и причем весьма быстро — за десятки миллисекунд и менее. Соответственно, сопротивление звуковой катушки, а следовательно, и ток через неё, и звуковое давление при неизменном приложенном напряжении изменяются на 10—15 %, создавая интермодуляционные искажения соответствующей величины (в низкочастотных ГГ, тепловая инерционность которых велика, разогрев звуковой катушки вызывает эффект тепловой компрессии сигнала).

Изменения индуктивности ещё более сложны. *Амплитуда* и *фаза* тока через звуковую катушку на частотах заметно выше резонансной в значительной мере определяются величиной индуктивности. А она очень сильно зависит от положения звуковой катушки в зазоре: при нормальной амплитуде смещения для частот, лишь немногим больших, нежели частота основного резонанса, индуктивность изменяется на 15—40 % у различных ГГ. Соответственно при номинальной мощности, подводимой к громкоговорителю, интермодуляционные искажения могут достигать 10—25 %.

Сказанное выше иллюстрируется фотографией осциллограмм звукового давления, снятых на одной из лучших отечественных среднечастотных ГГ — 5ГДШ-5-4. Структурная схема измерительной установки приведена на рисунке 6.



Рисунок 6 — Структурная схема измерительной установки

В качестве источника двухтонального сигнала применены пара генераторов и два усилителя, между выходами которых подключена испытуемая ГГ, установленная на акустическом экране площадью около 1 м2. Два отдельных усилителя с большим запасом по мощности (400 Вт) использованы с целью избежать образования интермодуляционных искажений при прохождении двухтонового сигнала через усилительный тракт. Звуковое давление, развиваемое головкой, воспринималось ленточным электродинамическим микрофоном, нелинейные искажения которого составляют величину менее –66 дБ при уровне звукового давления 130 дБ. Звуковое давление такого громкоговорителя в этом эксперименте составляло примерно 96 дБ, та что искажениями микрофона при данных условиях можно было пренебречь.

Как видно на осциллограммах (рисунок 7) на экране верхнего осциллографа (верхняя — без фильтрации, нижняя - после фильтрации ФВЧ), модуляция сигнала с частотой 4 кГц под воздействием другого с частотой 300 Гц (при мощности на головке 2,5 Вт) превышает 20 %. Это соответствует величине интермодуляционных искажений около 15 %. Думается, нет нужды напоминать о том, что порог заметности продуктов интермодуляционных искажений лежит намного ниже одного процента, достигая в ряде случаев сотых долей процента. Понятно, что искажения УМЗЧ, если только они имеют «мягкий» характер, и не превышают нескольких сотых процента, просто неразличимы на фоне искажений в громкоговорителе, вызванных его работой от источника напряжения. Интермодуляционные продукты искажений разрушают прозрачность и детальность звучания - получается «каша», в которой отдельные инструменты и голоса слышны лишь изредка.



Рисунок 7 — Фотографии осциллограмм звукового давления

Однако существует способ резко уменьшить описанные выше искажения, вызванные непостоянством импеданса головки громкоговорителя. Для этого усилитель, работающий на громкоговоритель, должен иметь выходное сопротивление, много большее, чем составляющие импеданса RГИXГ (2π *fL*Г) ГГ. Тогда их изменения практически не будут оказывать влияния на ток в звуковой катушке, а следовательно, исчезнут и искажения, вызванные этими изменениями. С целью демонстрации эффективности такого метода снижения искажений измерительная установка была дополнена резистором сопротивлением 47 Ом (т.е. на порядок больше модуля импеданса исследуемой ГГ), включенным последовательно с ГГ. Для сохранения прежней величины звукового давления уровни сигналов на выходах усилителей были соответственно увеличены. Эффект перехода на токовый режим очевиден из сравнения соответствующих осциллограмм: паразитная модуляция высокочастотного сигнала на экране нижнего осциллографа значительно меньше и еле видна, величина её не превышает 2—3 % — налицо резкое снижение искажений ГГ.

Можно возразить, что для уменьшения непостоянства импеданса звуковой катушки существует множество способов: это и заполнение зазора охлаждающей магнитной жидкостью, и установка медных колпачков на керны магнитной системы, и тщательный подбор профиля керна и плотности намотки катушки, а также многое другое. Однако все эти методы, во-первых, не решают проблему в принципе, а во-вторых, ведут к усложнению и удорожанию производства ГГ, вследствие чего не находят полного применения даже в студийных громкоговорителях. Именно поэтому большинство среднечастотных и низкочастотных ГГ не имеет ни медных колпачков, ни магнитной жидкости (в таких ГГ при работе на полной мощности жидкость нередко выбрасывается из зазора).

Следовательно, питание ГГ от высокоомного источника сигнала (в пределе — от источника тока) является полезным и целесообразным способом снижения их интермодуляционных искажений, особенно при построении многополосных активных акустических систем. Демпфирование основного резонанса при этом приходится выполнять чисто акустическим путем, поскольку собственная акустическая добротность среднечастотных ГГ, как правило, значительно превышает единицу, достигая 4—8.

Любопытно, что именно такой режим «токового» питания ГГ имеет место в ламповых УМЗЧ с пентодным или тетродным выходом при неглубокой (менее 10 дБ) ООС, особенно при наличии местной ООС по току в виде сопротивления в цепи катода.

Искажения усилителя без общей ООС обычно оказываются в пределах 2—5 % и уверенно заметны на слух при включении в разрыв контрольного тракта (метод сравнения с «прямым проводом»). Однако после подключения усилителя к громкоговорителю обнаруживается, что по мере увеличения глубины обратной связи звучание сначала улучшается, а затем происходит потеря его детальности и прозрачности. Особенно четко это заметно в многополосном усилителе, выходные каскады которого работают непосредственно на соответствующие головки громкоговорителей без каких-либо фильтров.

Причина этого, на первый взгляд, парадоксального явления в том, что при увеличении глубины ООС по напряжению выходное сопротивление усилителя резко снижается. Негативные последствия питания ГГ от УМЗЧ с малым выходным сопротивлением рассмотрены выше. В триодном усилителе выходное сопротивление, как правило, намного меньше, чем в пентодном или тетродном, а линейность до введения ООС выше, поэтому введение ООС по напряжению улучшает работу отдельно взятого усилителя, но вместе с тем ещё более ухудшает работу головки громкоговорителя. Как следствие, в результате введения ООС по выходному напряжению в триодный усилитель звук, действительно, может становиться хуже, несмотря на улучшение характеристик собственно усилителя! Этот эмпирически установленный факт служит неиссякаемой пищей для спекуляций на тему вреда от применения обратных связей в звуковых усилителях мощности, а также рассуждений об особой, ламповой прозрачности и естественности звучания. Однако из вышерассмотренных фактов со всей очевидностью следует, что дело не в наличии (или отсутствии) самой по себе ООС, а в результирующем выходном сопротивлении усилителя.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие практические выводы:

1 Режим работы головки громкоговорителя от источника тока (в противоположность источнику напряжения) обеспечивает существенное снижение интермодуляционных искажений, вносимых самой головкой.

2 Наиболее целесообразный вариант конструкции громкоговорителя с низкими интермодуляционными искажениями — активный многополосный, с разделительным фильтром (кроссовером) и отдельными усилителями на каждую полосу. Впрочем, этот вывод справедлив независимо от режима питания ГГ.

3. Работа головок от источников тока вызывает необходимость акустического демпфирования их основного резонанса, вследствие чего попутно достигается и некоторое демпфирование паразитных резонансов подвижной системы. Это улучшает импульсные характеристики громкоговорителя и способствует устранению дополнительной окраски звучания.

4. С целью получения высокого выходного сопротивления усилителя и сохранения малой величины его искажений следует применять ООС не по напряжению, а по току.

# 4 [Сравнительный анализ лампового и транзисторного усилителей мощности звуковой частоты](#Содержание)

Для измерения нелинейных искажений, вносимых ламповым и транзисторным усилителями мощности звуковой частоты, использовалась программа Diagnostic System for Sound Fields v5.0.5.5. Данная программа использует аудиоконтроллер компьютера в качестве ЦАП и АЦП и содержит в своем составе различные виртуальные измерительные приборы: генераторы сигналов, осциллограф, спектроанализатор, измеритель нелинейных искажений и др. К линейному выходу аудиоконтроллера подключался вход испытуемого усилителя, нагруженного на динамическую головку. Выход испытуемого усилителя через делитель напряжения, ослабляющий сигнал в 10 раз подключался к линейному входу аудиоконтроллера.

Измерение нелинейных искажений, вносимых ламповым и транзисторным усилителями мощности звуковой частоты проводились при трех уровнях выходной мощности:

а) малой, составляющей 0,01 от максимальной;

б) средней, составляющей 0,1 от максимальной;

в) максимальной.

Результаты измерений нелинейных искажений на средней мощности представлены на рисунках 8, 9; для малой мощности на рисунках 10, 11; для максимальной мощности на рисунках 12, 13.

Измерение нелинейных искажений вносимых ламповым и транзисторным усилителями мощности звуковой частоты выполненное при средней мощности показывает, что уровень искажений практически равен у транзисторного и лампового УМЗЧ. Однако, уровень нелинейных искажений немного ниже у транзисторного УМЗЧ.



Рисунок 8 — Нелинейные искажения транзисторного УМЗЧ
на средней мощности



Рисунок 9 — Нелинейные искажения лампового УМЗЧ на средней мощности

На малой же мощности, мы видим, что уровень искажений транзисторного УМЗЧ растет, и его значение значительно выше лампового. Это обусловлено тем, что транзисторный УМЗЧ на малых мощностях проявляется эффект «ступеньки», что свидетельствует о том, что слабый сигнал практически не усиливается. Отсутствием этого эффекта проявляет себя ламповый УМЗЧ. Как видим значение уровня искажений ниже практически вдвое. Что дает прекрасный результат даже на малой мощности.



Рисунок 10 — Нелинейные искажения транзисторного УМЗЧ
на малой мощности



Рисунок 11 — Нелинейные искажения лампового УМЗЧ на малой мощности

На близкой к максимальной мощности мы видим, что уровень нелинейных искажений транзисторного УМЗЧ растет и его значение значительно выше чем при средней мощности. Это подтверждает, что эффект «ступеньки» работает даже на такой мощности. А значения нелинейных искажений лампового УМЗЧ сильно не изменяются.



Рисунок 12 – Нелинейные искажения транзисторного УМЗЧ
на максимальной мощности



Рисунок 13 – Нелинейные искажения лампового УМЗЧ
на максимальной мощности

# [ЗАКЛЮЧЕНИЕ](#Содержание)

Основные результаты данной курсового проекта состоят в следующем:

1 Изучен феномен «лампового звука».

2 Изучены принципы работы транзисторных и ламповых усилителей мощности звуковой частоты, схемотехника усилителей мощности звуковой частоты.

3 Проведен сравнительный анализ характеристик усилителей звуковой частоты различных типов, таких как: ламповые, транзисторные, с входными каскадами, выходными и т.д.

4 Произведено сравнение нелинейных искажений транзисторного и лампового усилителя звуковой частоты.

#

# [СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ](#Содержание)

1. Barbour, Eric The Cool Sound of Tubes // IEEE Spectrum. — 1998. — Август. – (Engl.). – URL: https://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/audiovideo/the-cool-sound-of-tubes [15 апреля 2018].
2. Bussey, W. S., Robert M. Haigler Tubes versus transistors in electric guitar amplifiers (англ.) // IEEE Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. — Нью-Йорк, 1981. — Vol. 6. — P. 800-803.
3. Hamm, Russell O. Tubes vs. Transistors: Is There An Audible Difference? (англ.) // Journal of the audio engineering society. — 1973. — Vol. 21. № 4. — P. 267-273.
4. Sag. // Aspen Pittman. The Tube Amp Book. Hal Leonard Corporation, 2003. С. 231.
5. Гриф А. Конструкции и схемы для прочтения с паяльником. Т. 2. М.: Солон, 2010. С. 5.
6. Софронов-Антомони В. Индустрия наслаждения // Логос № 4 2000 (25).
7. Ганкин Л. Долгоиграющая жизнь // Коммерсантъ, 14 июня 2013 года.
8. Коржев Д. Тонкая настройка. Бизнес журнал, 2006/4. С. 5.
9. Otala, Matti, Eero Leinonen. The theory of transient intermodulation distortion (англ.) // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. — 1977. — Vol. 25, iss. 1. — P. 2-8.
10. Nye, John VC. Subjective Fidelity and Problems of Measurement in Audio Reproduction. // Bridges: Mathematical Connections in Art, Music, and Science. Bridges Conference, 1998. С. 132.
11. Hoge, W. J. J. Tubes Versus Transistors: A Further Comment // Journal of the Audio Engineering Society 22.5 (1974): 338—338. (англ.)
12. Otala, Matti. Transient distortion in transistorized audio power amplifiers. // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics 18.3 (1970): 234—239. (англ.)
13. Otala, Matti, Eero Leinonen. The theory of transient intermodulation distortion (англ.) // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. — 1977. — Vol. 25, iss. 1. — P. 2-8.
14. Динамические искажения в усилителях мощности с дифференциальным входом // Радио. 1981. № 1. С. 38 — 39.
15. Динамические искажения в транзисторных усилителях НЧ // Радио. 1976. № 4. С. 41 — 42.
16. О влиянии динамических искажений на восприятие тембра // Радио. 1981. № 7—8. C. 35 — 36.
17. Феномен «Транзисторного» звучания // Радио. 1981. № 12. C. 36 — 38.
18. Морган Д. Ламповые усилители / Д. Морган. М.: Издательский дом «ДМК-пресс», 2007. – 760 с.
19. Агеев С. В. Должен ли УМЗЧ иметь малое выходное сопротивление / С. В. Агеев // Радио. – 1997. – № 4. – С. 14–16.