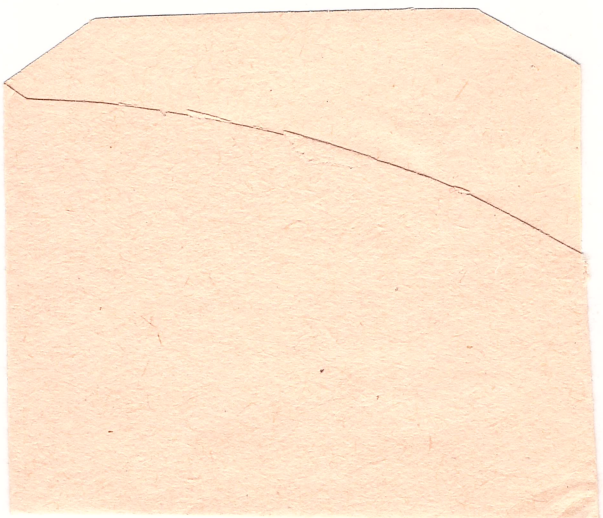
621.395
К21

С. Ф. КАРАВАЕВА

ПРОВОДНОЕ ВЕЩАНИЕ



621.395
К21

С. Ф. КАРАВАЕВА

ПРОВОДНОЕ ВЕЩАНИЕ

Допущено Министерством связи СССР в качестве учебника для техникумов связи, специальность 0708

053262

Техническая библиотека
Киевский
авиационный завод

621.395.61+621.396.623
+681.846

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»
МОСКВА 1973

00 ИЮЛ 1974

-2013

ПЕРЕВІРЕНО

РЕЦЕНЗЕНТЫ:
А. В. ШЕРШАКОВА, В. М. СИЗОНЕНКО

6Ф1.3
К21
УДК 654.19.2(07)

Караваева С. Ф.

К21 Проводное вещание. Учебник для техникумов связи. М., «Связь», 1973.

328 с. с илл.

В книге рассмотрены физические основы акустики, даны принципы работы и описание конструкций современной электроакустической аппаратуры. Рассмотрены вопросы оборудования студий и озвучения открытых пространств и закрытых помещений, построения схем станционной аппаратуры и линий проводного вещания, а также систем проводного вещания в крупных городах, в районных центрах и сельской местности.

Книга рассчитана на учащихся техникумов связи и может быть полезна работникам эксплуатации системы проводного вещания.

К $\frac{0342—55}{045(01)—73}$ 41—73 6Ф1.3

© Издательство «Связь» 1973 г.

Светлана Федоровна Караваева

ПРОВОДНОЕ ВЕЩАНИЕ

Отв. редакторы **М. А. Сапожков, В. И. Шануренко**

Редактор **Л. И. Венгренюк** Художник **В. Р. Плахов**

Техн. редактор **Г. И. Шефер** Корректор **М. Я. Могильнер**

Сдано в набор 12/III 1973 г. Подписано в печ. 5/V 1973 г.
Форм. бум. 60×90/16 20,5 печ. л. 20,5 усл.-п. л. 21,01 уч.-изд. л.
Т-08159 Тираж 24 800 экз. Бумага тип. № 2 Зак. изд. 14897 Цена 85 коп.
Издательство «Связь», Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2

Типография издательства «Связь» Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва-центр, ул. Кирова, 40. Зак. тип. 75

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 7
Введение 9

РАЗДЕЛ I

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИКИ И ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Глава 1. Физическая природа звука. Свойства человеческого слуха, свойства вещательных передач

§ 1.1. Источники звуковых колебаний 15
§ 1.2. Звуковое поле и его параметры 16
§ 1.3. Особенности слухового восприятия 18
§ 1.4. Использование логарифмических единиц 21
§ 1.5. Простые и сложные звуки вещательных передач 24
Контрольные вопросы 29

Глава 2. Качество воспроизведения вещательных передач

§ 2.1. Частотные искажения 30
§ 2.2. Нелинейные искажения 31
§ 2.3. Шумы 33
§ 2.4. Сохранение объемности звучания 34
§ 2.5. Заметность искажений 35
§ 2.6. Классы качества 37
Контрольные вопросы 39

Глава 3. Микрофоны

§ 3.1. Понятие об электромеханических аналогах 40
§ 3.2. Классификация и основные параметры микрофонов 42
§ 3.3. Приемник давления 43
§ 3.4. Приемник градиента давления 45
§ 3.5. Комбинированные приемники 46
§ 3.6. Электродинамические микрофоны 47
§ 3.7. Ленточные микрофоны 53
§ 3.8. Конденсаторные микрофоны 55
§ 3.9. Краткие сведения об электромагнитных, пьезоэлектрических и угольных микрофонах 60
§ 3.10. Новые типы микрофонов: радиомикрофон, стереофонический, транзисторный 62
§ 3.11. Сравнительная оценка микрофонов 63
Контрольные вопросы 64

Глава 4. Громкоговорители

§ 4.1. Классификация и основные параметры громкоговорителей . . . 65
§ 4.2. Электродинамический громкоговоритель прямого излучения . . . 67
§ 4.3. Методы улучшения качества звучания электродинамических громкоговорителей прямого излучения 72

§ 4.4. Рупорные громкоговорители 75
§ 4.5 Звуковые колонки и радиальные громкоговорители 79
§ 4.6. Акустические агрегаты 82
§ 4.7. Громкоговорители для радиотрансляционных сетей 83
Контрольные вопросы 84

Глава 5. Запись и воспроизведение звука

§ 5.1. Основы электромеханической записи и воспроизведения звука . . 85
§ 5.2. Магнитная запись и воспроизведение звука 89
§ 5.3. Лентопротяжный механизм 90
§ 5.4. Магнитные звуконосители и магнитные головки 92
§ 5.5. Процесс стирания магнитной записи 94
§ 5.6. Процесс записи 95
§ 5.7. Запись с высокочастотным подмагничиванием 99
§ 5.8. Процесс воспроизведения. Фонограмма 100
§ 5.9. Искажения при магнитной записи 102
§ 5.10. Принципы магнитной записи телевизионных сигналов 103
Контрольные вопросы 105

РАЗДЕЛ II
СТУДИИ, ЗВУКОФИКАЦИЯ ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВ И ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Глава 6. Студии

§ 6.1. Распространение звука в помещении 106
§ 6.2. Реверберация 108
§ 6.3. Звукопоглощение и звукопоглощающие материалы 109
§ 6.4. Оптимальные характеристики помещения 111
§ 6.5. Типы радиовещательных студий и их характеристики 114
§ 6.6. Понятие о звукоизоляции студий 115
§ 6.7. Освещение и вентиляция студий 118
§ 6.8. Акустический расчет речевой студии 119
§ 6.9. Аппаратура студий 122
§ 6.10. Устройства переменной реверберации 126
Контрольные вопросы 129

Глава 7. Звукофикация открытых пространств и закрытых помещений

§ 7.1. Установки озвучения и качественные показатели их 130
§ 7.2. Системы озвучения 133
§ 7.3. Звукоусиление 138
§ 7.4. Системы озвучения и звукоусиления закрытых помещений . . . 139
§ 7.5. Аппаратура для звукоусиления 142
§ 7.6. Электромегафон 144
§ 7.7. Амбиофоническая система звукоусиления 144
Контрольные вопросы 145

Глава 8. Установки синхронного перевода речей

§ 8.1. Назначение и принцип работы 146
§ 8.2. Структурные схемы и элементы установок синхронного перевода речей проводного (ВЭФ-8) и радио- (УПР-8 и УПР-3) вариантов 149
Контрольные вопросы 159

РАЗДЕЛ III
СИСТЕМЫ ПРОВОДНОГО ВЕЩАНИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ИХ СТАНЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Глава 9. Системы проводного вещания

§ 9.1. Узлообразование системы проводного вещания 160
§ 9.2. Системы проводного вещания в крупных городах 164

§ 9.3. Соединительные линии и их коррекция 171
§ 9.4. Способы подачи программ на РТУ 174
§ 9.5. Проводное вещание в сельской местности 176
§ 9.6. Подача программ сельским радиоузлам 179
§ 9.7. Универсальная аппаратура АВСП 181
§ 9.8. Системы контроля и резервного управления сельскими РУ . . . 183
§ 9.9. Сельские автоматизированные радиоузлы 184
§ 9.10. Трехпрограммное вещание в сельской местности 185
§ 9.11. Система проводного вещания в районных центрах и сельской местности 186
Контрольные вопросы 187

Глава 10. Средства автоматизации РТУ

§ 10.1. Управление станционным оборудованием 188
§ 10.2. Сигнализация неисправности усилителя 193
§ 10.3. Схема автоматического резервирования усилителя 194
§ 10.4. Схемы управления, защиты и сигнализации магистральных фидеров 195
§ 10.5. Взаиморезервирование магистральных фидеров 200
§ 10.6. Система аварийной сигнализации и контроля распределительных фидеров 201
§ 10.7. Устройство защиты аппаратуры станций, подстанций от опасных напряжений 204
§ 10.8. Автоматика защиты персонала 205
§ 10.9. Управление, контроль и сигнализация фидеров уличной звукофикации 207
Контрольные вопросы 208

Глава 11. Регулирование уровней вещательной передачи

§ 11.1. Основные принципы регулирования 210
§ 11.2. Ручные регуляторы 211
§ 11.3. Автоматические регуляторы 214
§ 11.4. Ограничитель максимального уровня 215
§ 11.5. Схемы автоматических регуляторов 218
§ 11.6. Классификация индикаторов уровня и требования к ним . . . 222
§ 11.7. Схема индикаторов уровня 224
Контрольные вопросы 227

РАЗДЕЛ IV

СТАНЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА РТУ

Глава 12. Типовая станционная аппаратура

§ 12.1. Микрофонный и трансляционный усилители 228
§ 12.2. Комплект аппаратуры автоматизации типа А-600 230
§ 12.3. Трансляционный усилитель ТУ-5-4 237
§ 12.4. Усилитель проводного вещания УПВ-1 243
§ 12.5. Усилители типа УПВ-5 и типа УПВ-15 251
§ 12.6. Транзисторное устройство проводного вещания ТУПВ-0,25Х2 . . 258
§ 12.7. Передвижная радиотрансляционная установка РУП-10 260
§ 12.8. Аппаратура дистанционного управления усилительными подстанциями типа УУП 264
§ 12.9. Аппаратура выходной коммутации и контроля фидеров 266
§ 12.10. Аппаратура выходной коммутации и контроля фидеров типа АВК-1 267
Контрольные вопросы 270

Глава 13. Многопрограммное и стереофоническое вещание

§ 13.1. Системы многопрограммного вещания по проводам 271
§ 13.2. Отечественная система трехпрограммного вещания (ТПВ) . . . 273
§ 13.3. Передающие и приемные устройства для ТПВ 275

§ 13.4. Высокочастотная обработка линий 279
§ 13.5. Понятие о стереофоническом звучании 279
§ 13.6. Системы получения стереофонической программы 280
§ 13.7. Понятие об электромеханической и магнитной стереофонической записи и воспроизведении звука 283
Контрольные вопросы 285

Глава 14. Установка и монтаж оборудования

§ 14.1. Помещения станций РТУ и требования к ним 286
§ 14.2. Марки проводов и кабелей для монтажа станций и подстанций РТУ 288
§ 14.3. Монтажная схема и кабельная таблица 290
§ 14.4. Наружные устройства станций радиотрансляционных узлов . . 293
§ 14.5. Энергоснабжение РТУ 298
Контрольные вопросы 301

Глава 15. Основные положения по эксплуатации станций РТУ. Электрические измерения на РТУ

§ 15.1. Техническая эксплуатация РТУ 302
§ 15.2. Общие положения технического контроля на РТУ 303
§ 15.3. Измерения усилителей 304
§ 15.4. Измерение основных показателей ограничителей уровня вещательных передач 307
§ 15.5. Дистанционные измерения качественных показателей усилителей 308
§ 15.6. Электрические измерения линий ПВ 312
§ 15.7. Измерение качественных показателей сквозного тракта 316
§ 15.8. Принципы построения системы технического контроля 317
Контрольные вопросы 318

Приложение. **Общие сведения о линиях и методы их расчета** . . . 319

Литература 328

ПРЕДИСЛОВИЕ

За пятьдесят лет своего существования техника вещания по проводам развилась в самостоятельную дисциплину, охватывающую вопросы радиотехники, проводной связи, электроакустики, телемеханики и техники сильных токов. Технические методы, заимствованные из перечисленных областей, были развиты и переработаны советскими учеными и специалистами применительно к особенностям вещания по проводам. Была создана новая станционная аппаратура большой мощности с системой автоматической защиты, дистанционного управления, сигнализации и контроля. В последние годы была разработана и в настоящее время внедряется система трехпрограммного вещания в городах. На очереди стоит вопрос о разработке системы трехпрограммного вещания для сельской местности.

Техническая эксплуатация этих разнообразных и сложных устройств требует большого количества квалифицированного технического персонала с достаточно широким кругозором в области проводного вещания и хорошо знакомого с принципами работы, конкретными схемами и данными применяемого оборудования.

В учебнике рассмотрена система проводного вещания, включая качественные показатели, ее оборудование, управление, вопросы контроля, измерения и физические явления в отдельных звеньях тракта.

В первом разделе рассматриваются физические основы акустики: природа звука, свойства вещательных передач, свойства и качество их воспроизведения, электроакустическая аппаратура, звукозапись. Во втором разделе рассмотрены вопросы, связанные с

распространением звука в помещении, студии, и вопросы звукофикации. В третьем разделе рассмотрены системы проводного вещания в крупных городах и сельской местности, вопросы автоматизации. В четвертом разделе рассмотрены станционные устройства проводного вещания, рассмотрены основные принципы построения находящейся в эксплуатации аппаратуры РТУ; рассмотрены вопросы установки, монтажа, технической эксплуатации, контроля и измерений на РТУ. §§ 9.5—9.11 написаны Шануренко В. И.

Автор считает приятным долгом выразить благодарность прочитавшим рукопись и давшим много ценных советов отв. ред. М. А. Сапожкову и В. И. Шануренко и рецензентам.

Обо всех замеченных недостатках в книге следует сообщать по адресу: Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2, издательство «Связь».

ВВЕДЕНИЕ

Радиовещание начало развиваться, спустя примерно четверть века после возникновения радиосвязи, и в настоящее время является одним из мощных средств коммунистического воспитания советских людей, средством донесения правдивой информации о Советском Союзе до широких масс трудящихся зарубежных стран.

7 мая 1895 г. русский ученый А. С. Попов продемонстрировал первый в мире радиоприемник, а в начале 1896 г. изобретение А. С. Попова получило практическое применение — была организована радиосвязь между кораблями. Однако понятие «радио» стало широко известно каждому благодаря радиовещанию.

Самые ранние успехи, достигнутые радиотелефонией в 1920 г., имели большое практическое значение и сразу же обратили на себя внимание В. И. Ленина. В письме от 5 февраля 1920 г. руководителю Нижегородской радиолаборатории М. А. Бонч-Бруевичу В. И. Ленин писал: «Пользуюсь случаем, чтобы выразить Вам глубокую благодарность и сочувствие по поводу большой работы радиоизобретений, которую Вы делаете. Газета без бумаги и «без расстояния», которую Вы создаете, будет великим делом». Было принято постановление о строительстве сети радиотелефонных станций. В. И. Ленин внимательно следил за ходом строительства и при малейших перебоях в строительстве немедленно принимал необходимые меры.

Первые радиовещательные программы были переданы в мае 1922 г. в Нижнем Новгороде и в сентябре 1922 г. в Москве через радиостанции, построенные под руководством создателя современной радиотехники М. А. Бонч-Бруевича. С тех пор начались регулярные радиовещательные передачи, а 17 сентября 1922 г. считается официальной датой открытия радиовещания в СССР. В декабре 1924 г. была создана специальная государственная организация — Акционерное общество для широкого вещания по радио «Радиопередача». Это общество в дальнейшем было преобразовано во Всесоюзный радиокомитет при Совете Народных Комиссаров СССР. С каждым годом увеличивалась мощность передающей радиовещательной сети, улучшалось ее качество, увеличивалось ко-

личество приемников. Радиовещание входило прочно в быт советских людей.

Вещание по проводам возникло задолго до изобретения радио. Первые опытные установки вещания по проводам были созданы русскими учеными. В 1880 г. Ю. Охорович продемонстрировал первую в мире громкоговорящую установку, воспроизводящую музыку, транслируемую по проводам из театра. В 1882 г. подобную установку создал доктор Богословский. Музыка из Большого оперного театра в Москве транслировалась по проводам, и прием осуществлялся на телефоны. Установка вещания по проводам демонстрировалась также П. М. Голубицким, Р. Р. Вреденом и А. А. Столповским на русской электротехнической выставке в Петербурге в 1895 г.

Опыты, положившие начало развитию системы проводного вещания в Советском Союзе, были проведены Московским городским советом профессиональных союзов в 1921 г. под руководством И. Е. Горона. Мощный усилитель был установлен в Москве в Доме Союзов и от него по радиальным направлениям расходились магистральные линии, достигавшие городских окраин. Длина каждой линии составляла в среднем около 8 км. От магистральных линий шли ответвления, заканчивающиеся в домах. Создание Московской радиотрансляционной сети позволило установить несколько тысяч громкоговорящих радиоточек индивидуального пользования и охватить многие клубы, фабрики, школы и другие общественные учреждения.

Вещание по проводам быстро завоевало широкую популярность. К 1928 г. в стране насчитывалось уже около двухсот маломощных кустарных усилителей радиотрансляционных узлов. К концу второй пятилетки уже насчитывалось 5250 узлов, из которых 40% размещалось в деревне. По количеству радиотрансляционных узлов и их мощности ведущее место занимала Московская область (350 узлов).

К началу Великой Отечественной войны в СССР насчитывалось 11178 радиотрансляционных узлов, которые обслуживали 5836 тыс. радиоточек. В годы войны радиотрансляционные узлы в тылу и при фронтовой полосе сыграли огромную роль. Они были основным средством, позволяющим населению получать информацию о положении в стране и на фронтах.

Проводное вещание выполняло также ответственную задачу по оперативному оповещению населения о налетах вражеской авиации.

Примером может служить работа Ленинградской городской радиотрансляционной сети, успешно справившейся со своими задачами в условиях блокады, налетов авиации противника и артиллерийских обстрелов.

Война нанесла огромный ущерб технике проводного вещания. Почти половина всего станционного и линейного хозяйства и более 2 млн. трансляционных радиоточек было уничтожено.

Для восстановления разрушенного хозяйства в послевоенные годы проводное вещание получило большее развитие. В результате за 1946—1950 гг. удалось не только залечить раны, нанесенные войной, но и выполнить большие работы по реконструкции и развитию радиотрансляционных узлов. В 1950 г. количество радиоточек составляло 9685 тыс, а в 1972 г. превысило 45 млн., из них 18 млн. — в сельской местности. Услугами вещания пользуются 200 млн. жителей страны.

Большой вклад в развитие техники проводного вещания внесли советские инженеры М. С. Орлов, И. А. Шамшин, Н. И. Павлов, В. А. Нюренберг и многие другие.

Основным недостатком системы проводного вещания до последнего времени являлась невозможность выбора программы абонентом радиотрансляционной сети. Однако в настоящее время более чем в 300 городах внедряется система трехпрограммного вещания по проводам. Возможность выбора программы, а также высокая помехоустойчивость, надежность и высокое качество звучания передач за счет подачи программы на радиотрансляционные узлы от вещательных станций, работающих на метровых волнах с частотной модуляцией, значительно повышают качество работы всей системы проводного вещания.

Организация радиовещания в нашей стране осуществляется Государственным Комитетом по телевидению и радиовещанию при Совете Министров СССР и Министерством связи СССР. Комитет по телевидению и радиовещанию отвечает за подготовку всех программ передач вещания и телевидения. Технические средства радиовещания, телевидения, систем проводного вещания, сеть междугородной подачи программ находятся в ведении Министерства связи СССР.

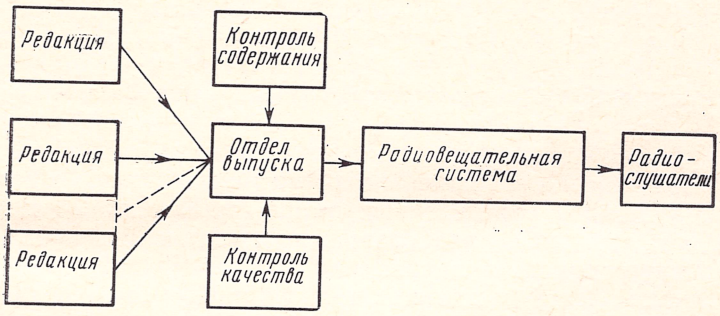


Рис. В.1. Структурная схема организации вещания

Структурная схема вещания показана на рис. В.1. Схема показывает взаимосвязь отделов, служб и системы вещания, объединяющей технические средства вещания.

Подготовкой программы передачи занимаются редакции, специализированные по типу передач: например, редакция последних известий, редакция музыкальных передач, детских передач и др. Отдел выпуска составляет расписание передач и контролирует его выполнение. Отдел контроля следит за содержанием передач и их техническим качеством.

Четкая огранизация, высокое качество передач вещания достигается слаженной работой всех звеньев. Схема построения системы вещания в нашей стране показана на рис. В.2.

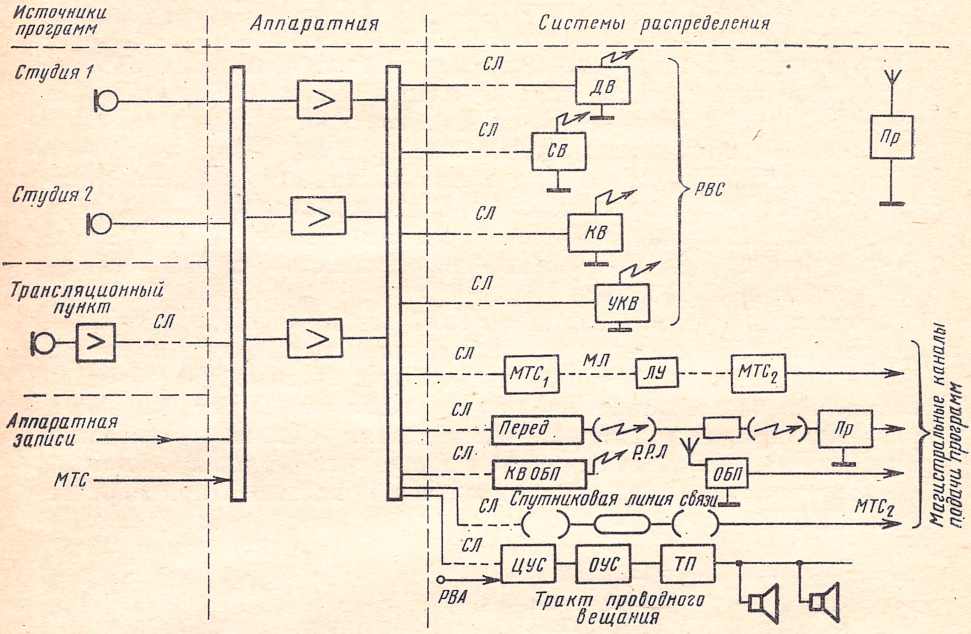


Рис. В.2. Схема построения системы вещания СССР

Система вещания включает в себя несколько отдельных вещательных трактов или каналов, по которым вещательная программа доводится до определенных групп слушателей. Различают тракты: радиовещания, проводного вещания, телевизионного вещания и междугородного вещания.

Источники программ для всех трактов одни и те же. Это — студии, трансляционные пункты стационарные и передвижные, аппаратные записи. Радиовещательный тракт предусматривает подачу программ вещания слушателям, используя сеть передающих станций (РВС) и радиоприемников (Пр.) (см. рис. В.2).

За последние годы значительно расширилась сеть передающих радиовещательных станций на длинных (дв), средних (св), коротких (кв) и ультракоротких волнах (укв). Комплексное использова-

ние этих радиостанций обеспечивает слышимость центральных программ радиовещания как на территории СССР, так и далеко за ее пределами.

В связи с трудностями выделения частот в длинно-средневолновых диапазонах все большее развитие получают сети синхронного вещания, в которых передатчики работают на одной частоте. В эксплуатации находятся более 15 синхронных сетей.

Высокими качественными показателями обладают радиовещательные передачи на ультракоротких волнах с частотной модуляцией, сейчас уже более чем в 230 городах страны действуют УКВ ЧМ радиостанции. В диапазоне укв начаты также стереофонические передачи. Стереофоническое вещание позволяет координально улучшить качество звучания; в Советском Союзе разработана система передачи стереофонических программ через УКВ ЧМ станции с модулированной поднесущей.

Сеть вещания должна, прежде всего, обеспечить передачу центрального вещания по всему Советскому Союзу.

Центральное общесоюзное вещание в настоящее время проводится по шести программам при комплексном использовании всех диапазонов радиоволн. Первая союзная — основная программа — предназначена для населения европейской части Советского Союза, Урала и Средней Азии. Для обеспечения основной программой всей остальной территории СССР введена четвертая программа (IVA и IVБ), учитывающая временну́ю разницу на территории страны. Передача основных программ для радиоузлов и радиослушателей — IVA и IVБ — ведется через длинноволновые радиовещательные станции на частотах 151, 155, 173, 236 и 263 кГц и через сеть коротковолновых станций в диапазонах 13, 16, 19, 25, 31, 41, 49, 74 м. Вторая программа «Маяк» — это информационно-музыкальная программа, передается на средних и коротких волнах и ретранслируется местными радиовещательными станциями на метровых волнах. Третья программа — литературно-музыкальная, передается только в 15 крупных городах европейской части СССР. Пятая программа — круглосуточная. Ее передачи рассчитаны на советских граждан, проживающих за границей и находящихся в длительном плавании, а также для иностранных радиослушателей, знающих русский язык.

Вещание ведется и на 58 иностранных языках. Кроме центрального общесоюзного вещания, в республиках, краях и областях осуществляется республиканское, краевое и областное вещание, состоящее из передач на местных национальных языках, и ретрансляции передач центральной программы. Радиопередачи ведутся на 61 национальном языке народов, населяющих Советский Союз. Все студии и другие источники программ обеспечивают 1124,9 часов вещания в сутки, в том числе по РСФСР — 737,5 часов в сутки, из них на долю центрального вещания приходится 272,5 часов в сутки; по союзным республикам — 387,4 часов в сутки.

Важным показателем развития вещания является количество приемных устройств у населения. В настоящее время в СССР имеется свыше 70 млн. радиовещательных приемников различных типов и класса качества.

Высшей формой вещания несомненно является телевизионное. Население проявляет исключительно большой интерес к телевидению: к началу 1965 г. число телевизоров достигло 13 млн., а в 1971 превысило 40 млн. В стране создана передающая сеть телевизионного вещания, насчитывающая свыше 250 станций и более 900 маломощных ретрансляторов. Ведутся передачи цветного телевидения.

Для подачи обмена программами вещания используются междугородные линии связи: $МТС_1$ — междугородная телефонная станция одного города; МЛ — междугородная линия; $МТС_2$ — междугородная телефонная станция другого города. В тракте проводного вещания программа доводится до слушателей по разветвленной проводной сети, которая называется радиотрансляционной сетью.

Осуществление грандиозной программы коммунистического строительства, начертанной XXIV съездом партии, предъявляет новые более повышенные требования к советскому радиовещанию. Развитие новых технических средств будет проводиться в длинноволновом, средневолновом, коротковолновом и укв диапазонах. К концу 1980 г. 1-я программа должна приниматься на всей территории СССР; II-я программа («Маяк») — на территории, где проживает свыше 90% населения, и III-я программа — на территории, где проживает свыше 50% населения страны. Особенно бурно развивается сеть 2- и 4-программного радиовещания в ультракоротковолновом диапазоне с частотной модуляцией: в 1980 г. им будет охвачена территория, где проживает более 90% населения страны. На всей территории страны будут созданы новые синхронные сети вещания.

Дальнейшее развитие и совершенствование произойдет и в системе проводного вещания. Основные технические направления дальнейшего совершенствования системы проводного вещания;

1. Широкое внедрение дистанционного управления усилительными станциями и трансформаторными подстанциями, автоматизация сельских радиоузлов и применение систем дистанционного контроля.

2. Внедрение трехпрограммного вещания.

3. Создание новых более совершенных систем многопрограммного проводного вещания.

Раздел I.
Физические основы акустики и электроакустическая аппаратура

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЗВУКА. СВОЙСТВА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО СЛУХА, СВОЙСТВА ВЕЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ

§ 1.1. ИСТОЧНИКИ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Колебания, частоты которых лежат в области восприятия человеческим ухом, называются звуковыми колебаниями. Источником звуковых колебаний может быть любое колеблющееся тело или воздушный объем. Заставить колебаться тело или воздушный объем может механическое усилие или поток воздуха.

Простейшим источником звуковых колебаний является камертон (рис. 1.1*а*), ножки которого, будучи выведенными из положения равновесия, совершают свободные колебания. Сила звука камертона очень мала. Для усиления звука камертон укрепляют на деревянном ящике — резонаторе, у которого отсутствуют одна или две боковые стенки. Под влиянием колебаний камертона воздух в ящике также совершает колебания, вызывая заметное усиление звука вследствие резонансных свойств воздушного объема ящика.

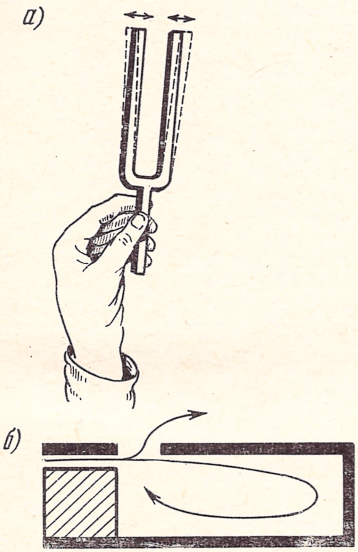


Рис. 1.1. Простейшие источники звука:
а) камертон; *б)* свисток

Другим простейшим источником звука является свисток (рис. 1.1*б*). В свистке колеблется заключенный в нем объем воздуха под воздействием струи вдуваемого воздуха. Немаловажное значение играет острое ребро отверстия в стенке свистка. Струя воздуха, ударяясь о ребро отверстия, разделяется на два потока с периодически изменяющимися

скоростями движения; один из потоков, попадающий в верхнюю часть трубы (являющейся резонатором), заставляет колебаться заключенный в ней воздух, в результате чего возникает звучание.

Для получения звуков большой силы используют сирены. Звучание сирены обусловливается периодическим прерыванием мощной струи сжатого воздуха или пара при прохождении ее через отверстие в двух соосных дисках, один из которых неподвижен, а другой вращается. Частоту звука сирены можно изменять, меняя угловую скорость вращения диска или число отверстий в диске.

Более сложную конструкцию имеют источники звука, создающие сложные звуки. Это — музыкальные инструменты. Например, звучание духовых музыкальных инструментов является результатом колебаний воздушных объемов, заключенных в специальных полостях-резонаторах. Эти колебания возбуждаются струей воздуха, продуваемого через инструмент.

Своеобразным духовым инструментом является голосовой аппарат человека, в котором резонаторами являются полости гортани, рта и носа, через которые продувается пульсирующий поток воздуха из легких (рис. 1.2). Эти пульсации возникают в результате

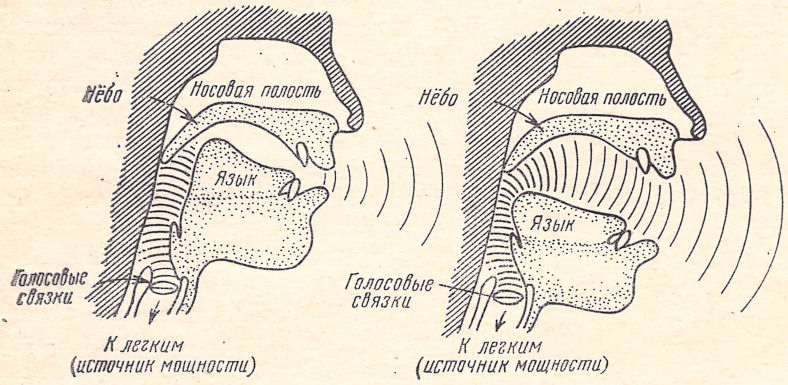


Рис. 1.2. Голосовой аппарат человека

прохождения воздуха через щель между расположенными в гортани голосовыми связками, которые совершают колебания. Изменяя натяжение связок, а также размеры и форму указанных выше резонаторов путем различного расположения губ, языка и т. д., мы можем произносить звуки, отличающиеся по тональности и имеющие различную форму частотного спектра.

§ 1.2. ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

Пространство, в котором распространяются звуковые колебания или звуковые волны, называется звуковым полем. Под воздействием распространяющейся звуковой волны частицы среды

начинают колебаться относительно своего положения равновесия с определенной скоростью. Скорость эта называется колебательной скоростью v частиц среды. В результате изменения взаимного расположения частиц в среде (рис. 1.3) образуются области сжатия *1* и разрежения *2*, т. е. области повышенного и пониженного давлений, возникает дополнительное знакопеременное давление. Возникшее под действием звуковых колебаний давление называется звуковым давлением p.

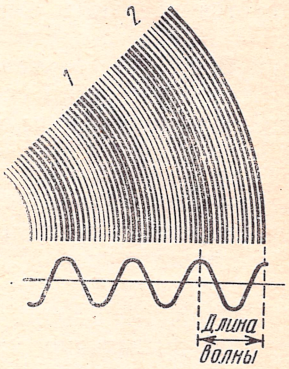


Рис. 1.3. Распространение звуковой волны

На величину колебательной скорости и звукового давления оказывает влияние среда.

Таким образом, звуковое поле характеризуется звуковым давлением p, колебательной скоростью v частиц среды и параметрами среды, в которой происходит распространение звуковых волн.

Звуковые волны характеризуются длиной волны, частотой и скоростью распространения. Расстояние между двумя последовательными сгущениями или разрежениями среды по направлению движения волны называют длиной звуковой волны.

Как и при распространении любой волны частота звука равна числу волн, проходящих через данную точку поля.

Звуковые волны распространяются с определенной скоростью, называемой скоростью звука. Скорость звука зависит от параметров среды, т. е. от ее физического состояния. В воздухе она в основном зависит от атмосферного давления и плотности, а следовательно, от температуры воздуха.

При нормальном атмосферном давлении и температуре $t°=20°C$ скорость звука равна 344 м/с. Скорость звука c, длина волны λ и частота звука f связаны зависимостью: $\lambda=c/f$. В свободном звуковом поле от точечного источника звука звуковые волны распространяются по всем направлениям, и фронт волны имеет сферическую форму. Волна со сферическим фронтом называется сферической волной.

Если источник звука поместить, например, в узкую цилиндрическую трубу, то в последней будут распространяться плоские волны, которые характеризуются плоским фронтом волны.

В поле сферической и плоской волн звуковое давление и колебательная скорость связаны между собой определенной зависимостью. Рассмотрим соотношения между звуковым давлением и колебательной скоростью сначала в поле плоской волны, где эти соотношения проще, а затем в поле сферической волны. В поле плоской волны амплитуды звукового давления p_m и колебательной

053262
Техническая библиотека
Киевский
радиозавод

скорости v_m связаны между собой линейной зависимостью:

$$p_m = \rho_0 c v_m,$$

где ρ_0 — плотность среды. Для воздуха при $t=20°C$ и нормальном атмосферном давлении $\rho_0 = 1{,}21 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Произведение $\rho_0 c$ — называется удельным акустическим сопротивлением среды, а выражение $p_m/v_m = \rho_0 c$ известно под названием акустического закона Ома. В поле сферической волны звуковое давление и колебательная скорость частиц среды не совпадают по фазе, и их амплитудные значения связаны между собой следующим выражением:

$$p_m = \rho_0 c v_m \cos \varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между звуковым давлением и колебательной скоростью, зависящий от расстояния до источника звука (r) и от длины звуковой волны. При $r \to \infty$, $\varphi \to 0$ фронт волны становится плоским.

Сферическая волна может возбуждаться источниками, размеры которых достаточно малы по сравнению с длиной возбуждаемой волны, т. е. $d < \lambda$; плоская же волна возбуждается ими при условии $d > \lambda$, где d — величина, характеризующая размеры излучателя.

Звуковая волна несет с собой определенную энергию в направлении своего движения.

Количество звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади перпендикулярно к направлению распространения звуковой волны, называется интенсивностью, или силой звука J. Для синусоидальной звуковой волны (плоской и сферической)

$$J = \frac{p_m^2}{2\rho_0 c}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

§ 1.3. ОСОБЕННОСТИ СЛУХОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

Познакомимся со слуховым аппаратом человека. В слуховом аппарате различают наружное, среднее и внутреннее ухо (рис. 1.4).

Изменения давления передаются по наружному слуховому каналу *1—2* барабанной перепонке *13* и приводят ее в колебание. Колебания перепонки передаются лимфе улитки *7* через сочленение косточек *3—4—5*. Колебания, сообщаемые эндо лимфе, в свою очередь, приводят в колебание те или иные участки основной мембраны *9* в зависимости от частоты колебаний. Высокие частоты воздействуют на узкий край мембраны около овального окна, а самые низкие частоты — на противоположный конец мембраны у вершины улитки. Колебания волокон мембраны передаются окончаниям нервных волокон *8*, преобразующих колебания в возбуждения, идущим к слуховому центру головного мозга.

На рис. 1.5 приведена эквивалентная электрическая схема слухового аппарата, которая представляет собой ряд резонаторов, па-

раметры которых определяются параметрами соответствующих волокон основной мембраны и расстоянием их от овального окна *1*. Знание особенностей слухового восприятия имеет большое значение для понимания многих процессов, связанных с восприятием речи и музыки, а также с проектированием и эксплуатацией радиовещательной аппаратуры, радиовещательных и телевизионных студий. В самом деле, конечным судьей качества воспроизведения звука является человеческое ухо. Очень тонкий и весьма чувствительный аппарат — ухо — не отличается тем не менее совершенством.

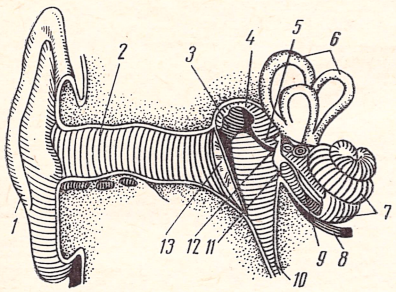


Рис. 1.4. Слуховой аппарат человека

1 — ушная раковина; *2* — слуховой канал; *3* — молоточек; *4* — наковальня; *5* — стремя; *6* — полукружные каналы; *7* — улитка; *8* — окончания слухового нерва; *9* — мембрана; *10* — евстахиева труба; *11* — круглое окно; *12* — овальное окно; *13* — барабанная перепонка

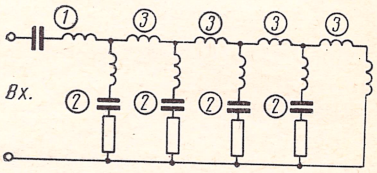


Рис. 1.5. Эквивалентная электрическая схема слухового аппарата

1 — параметры овального окна, *2* — параметры волокон основной мембраны, *3* — инерционность колеблющегося участка лимфы

Особенностями слухового восприятия человека являются частотная зависимость чувствительности уха, маскирующий и бинауральный эффекты.

Человек способен воспринимать как звук колебания с частотами от 20 Гц до 16—20 кГц. При этом ухо неодинаково чувствительно к звукам различных частот. Наибольшая чувствительность уха в области 2000—5000 Гц. Все звуки, интенсивность которых лежит ниже этого значения кривой *а* рис. 1.6, называемой порогом слышимости, будут для уха неслышны. На частоте 1000 Гц ухо воспринимает звук, соответствующий давлению $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Весьма громкие звуки воспринимаются ухом как болевые ощущения, поэтому величина интенсивности звука, или звукового давления, при которой начинает наблюдаться ощущение боли, называется болевым порогом.

Стандартному болевому порогу соответствует эффективное звуковое давление 20 Па при частоте сигнала 1000 Гц (рис. 1.6, кривая *б*).

Таким образом, вся область восприятия или так называемый динамический диапазон восприятия лежит между двумя границами: порогом слышимости и болевым порогом.

Из рисунка видно, что динамический диапазон слухового восприятия достаточно велик.

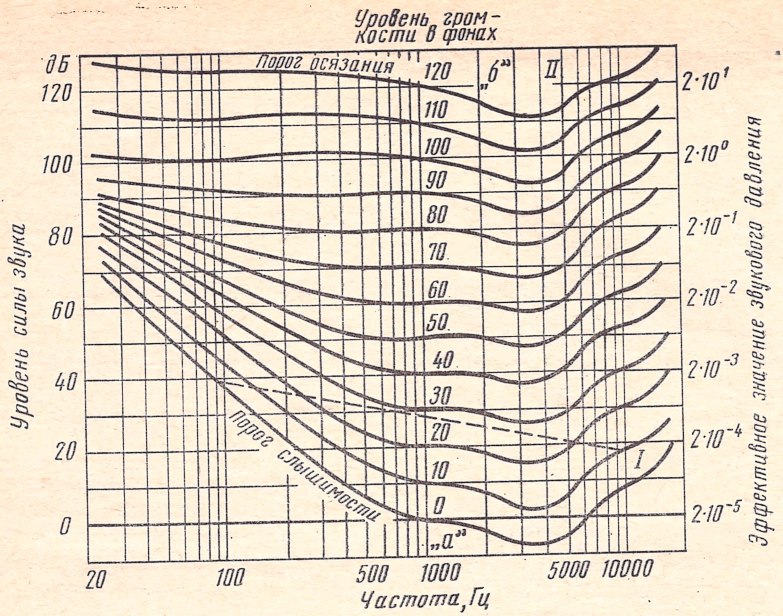


Рис. 1.6. Кривые равной громкости

Восприятие громкости звука зависит от частоты. Кривые равной громкости для различных уровней показаны на рис. 1.6.

Маскирующий эффект — физиологическое явление, состоящее в том, что при одновременном слушании двух или нескольких различных по громкости звуков более тихие звуки перестают быть слышимыми, как бы скрываясь на фоне более громких звуков или шумов. Маскирующий эффект объясняется тем, что возбуждение мембраны слухового аппарата от громкого звука сравнительно мало изменяется от дополнительного небольшого возбуждения, вызываемого тихим звуком. Поэтому замаскированными оказываются только те звуки, которые воздействуют на уже возбужденные маскирующим звуком участки основной мембраны, т. е. звуки, близкие по частоте к основному тону и обертонам маскирующего звука.

Однако сильные низкие звуки возбуждают основную мембрану в очень широкой области частот как на обертонах, так и в промежутках между ними и могут сильно маскировать почти все более высокие звуки. Количественно «маскировка» определяется как число, на которое возрастает в присутствии другого звука порог слышимости слушателя для данного чистого тона.

Бинауральный эффект — возможность человека определять положение источника звука, обусловленная наличием у него двух ушей. Положение источника звука по отношению к голове наблюдателя объективно определяется тремя величинами: расстоя-

нием, углом в горизонтальной плоскости и углом в вертикальной плоскости. Из этих трех величин субъективно точнее всего определяется угол в горизонтальной плоскости; тренированному наблюдателю с нормальным слухом удается определить это направление с точностью до 3°. Объясняется это расположением звукового поля вокруг головы наблюдателя; точки приема — уши — расположены на горизонтальной окружности под углами примерно в 82,5° по отношению к плоскости симметрии головы.

Если источник звука находится со стороны правого или левого уха, то данное ухо принимает колебания большей силы и фаза этих колебаний отличается от фазы колебаний, приходящих к противоположному уху. Сопоставляя различия в восприятии правым и левым ухом и используя свои наблюдения, человек вырабатывает чувство направления. Звуки разной частоты воспринимаются поразному: для низких звуков (до 1500 колебаний в секунду) бинауральный эффект определяется наиболее точно и почти целиком по разности времени прихода; для звуков высоких частот, при которых существенную роль играет различие в силе звука у правого и левого уха, определение менее точно.

Вышесказанное относится к определению направления в горизонтальной плоскости; в вертикальной плоскости направление определяется весьма грубо.

§ 1.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

В технике проводного вещания принято выражать интенсивность звука, звуковое давление, звуковую энергию, а также электрические величины — мощность, напряжение и ток — чаще всего не в абсолютных, а в относительных, логарифмических единицах — децибелах. Это объясняется тем, что когда приходится пользоваться числами, которые отличаются друг от друга в несколько тысяч раз, то логарифмические единицы оказываются удобнее. Например, диапазон изменения интенсивности слышимых звуков огромен: интенсивность самых слабых звуков вблизи порога слышимости на 1000 Гц равна 10^{-12} Вт/м^2, сильных же звуков, вызывающих у нас болевое ощущение (порог осязания) — около 1 Вт/м^2. Таким образом, сильные звуки отличаются по своей интенсивности от самых слабых в 10^{14} раз. Диапазон слышимых частот составляет от 16—20 Гц до 16—20 кГц, т. е. отношение граничных частот доходит до 1000.

Если интенсивность сильного звука J_1, а слабого J_2, то первый звук имеет уровень выше второго на N дБ:

$$N = 10\lg (J_1/J_2).$$

Пусть, например, интенсивность одного звука в 1000 раз больше другого; это значит, что в логарифмических единицах различие в силе звуков составляет 30 дБ. Так как интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления, то число децибел

N, на которое отличаются уровни звукового давления первого звука p_1 и второго звука p_2, определяется формулой

$$N = 10\lg\frac{p_1^2}{p_2^2} = 20\lg\frac{p_1}{p_2}.$$

В радиовещании чаще всего уровень любого параметра определяют по отношению к выбранным нулевым уровням. За нулевой уровень интенсивности звука выбрана величина $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2, которая соответствует среднему порогу слышимости человеческого уха на частоте 1000 гц.

Таким образом, уровень интенсивности звука определяется как

$$N_J = 10\lg\frac{J}{J_0},\ \text{дБ}.$$

Уровень звукового давления определяется по отношению к выбранному нулевому значению звукового давления $p_0 = 2\cdot10^{-5}$ Па, которое соответствует порогу слышимости уха на частоте 1000 Гц:

$$N_p = 20\lg\frac{p}{p_0},\ \text{дБ}.$$

Так как p_0 и J_0 однозначно связаны через акустические сопротивления среды, уровень интенсивности звука равен уровню звукового давления

$$N_J = N_p = N.$$

На рис. 1.7 показаны уровни интенсивности звукового давления некоторых звуков.

Уровень электрической мощности принято отсчитывать относительно мощности $P_{\text{оэл}} = 10^{-3}$ Вт на нагрузке 600 Ом и определять по формуле $N_P = 10\lg(P_{\text{эл}}/P_{\text{оэл}})$, дБ. Найденный таким образом уровень мощности называют абсолютным. Так как $P_{\text{эл}} = U^2/R = i^2R$, где R — сопротивление, на котором выделяется мощность $P_{\text{эл}}$, то

$$N = 10\lg\frac{U^2}{P_0R} = 10\lg\frac{U^2R_0}{U_0^2R} = 20\lg\frac{U}{U_0} + 10\lg\frac{R_0}{R}.$$

При выборе $R = 600$ Ом нулевой уровень напряжения и тока соответственно равен

$$U_0 = 0{,}775\ \text{В, а}\ i_0 = 1{,}29\cdot10^{-3}\ \text{А, так как}$$

$$N = 10\lg\frac{i^2R}{i_0^2R_0} = 20\lg\frac{i}{i_0}\ \text{при}\ R = R_0.$$

Чтобы лучше представить связь между числом децибел и отношением интенсивностей звука, звуковых давлений, электрических мощностей, электрических напряжений или токов, приведем табл. 1.1.

ТАБЛИЦА 1.1

дБ	0,5	1	2	3	5	10	20	40	60	80	100	140
P, J	1,12	1,26	1,59	2	3,16	10	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}	10^{14}
$P_{эл}$, U, i	1,06	1,12	1,26	1,41	1,78	3,16	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^7

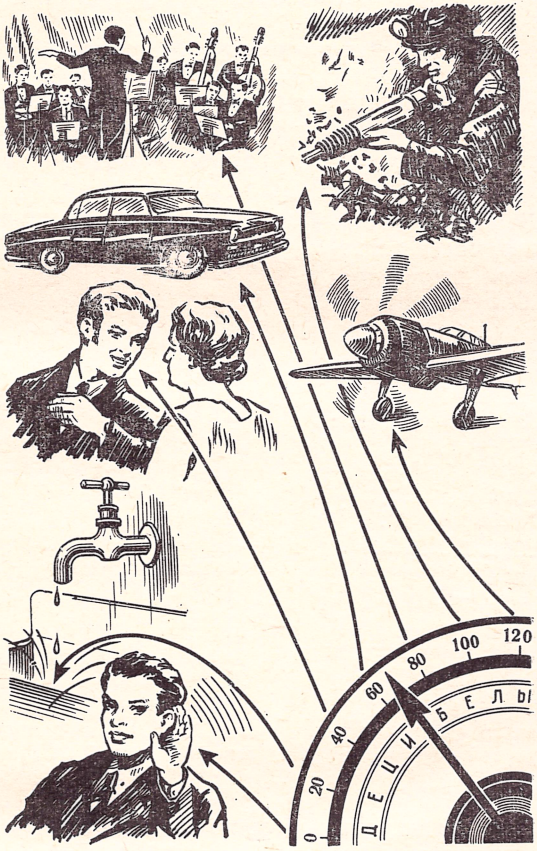


Рис. 1.7. Уровни интенсивности различных источников звука

Примеры:

1. Определить уровень звукового давления, соответствующий давлению 0,2 Па:

$$N = 20\lg\frac{p}{p_0} = 20\lg\frac{0,2}{2\cdot10^{-5}} = 80 \text{ дБ}.$$

2. Определить уровень напряжения на входе линии, соответствующей напряжению 5,5 В на сопротивлении 600 Ом:

$$N = 20\lg\frac{U}{U_0} = 20\lg\frac{5{,}5}{0{,}775} = 17 \text{ дБ}.$$

3. Найти уровень мощности на нагрузке $R = 200$ Ом при напряжении 7,75 В:

$$N = 20\lg\frac{U}{U_0} + 10\lg\frac{R_0}{R} = 20\lg\frac{7{,}75}{0{,}775} + 10\lg\frac{600}{200} = 40 + 10\lg 3 = 44{,}7 \text{ дБ}.$$

§ 1.5. ПРОСТЫЕ И СЛОЖНЫЕ ЗВУКИ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ

Частотный и динамический диапазоны

Среди сигналов вещательных передач встречаются сигналы простых и сложных звуков. Если звуковое давление, создаваемое источником звука, подчиняется синусоидальному закону, то звук называется простым звуком или чистым тоном. Чистый тон создает, например, камертон (рис. 1.8). Чистые тона встречаются довольно редко, чаще встречаются сложные периодические (рис. 1.9*а*) и непериодические (рис. 1.9*б*) звуки.

Сигнал сложного периодического звука можно представить в виде суммы

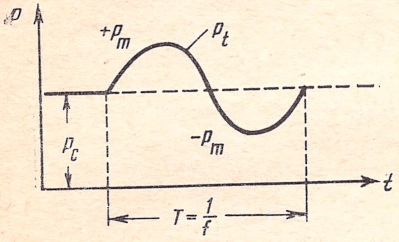


Рис. 1.8. Простой синусоидальный звуковой сигнал

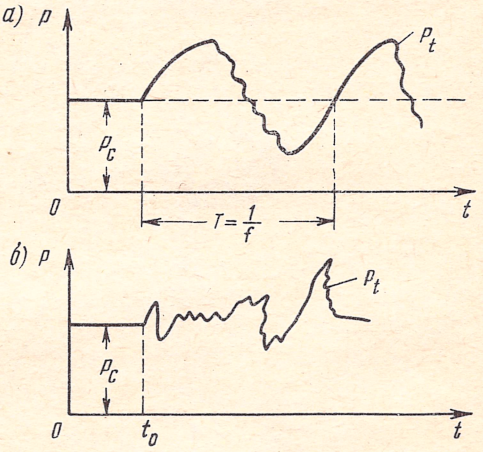


Рис. 1.9. Сложный периодический (*а*) и непериодический (*б*) звуковые сигналы

гармонических синусоидальных составляющих. Ему соответствует дискретный амплитудный спектр (рис. 1.10). Сигнал непериодического звука также может быть представлен в виде бесконечной суммы простейших гармонических составляющих, и сигнал в данном случае следует рассматривать как сумму бесконечно большого числа синусоидальных колебаний с бесконечно малыми амплитудами, частоты которых распределены непрерывно во всей полосе частот.

Сигнал речи и музыки можно представить совокупностью периодических и непериодических звуковых колебаний. Речь чело-

века состоит из сочетания гласных и согласных звуков. Гласные звуки характеризуются основным тоном и формантами. Последние представляют области концентрации энергии в частотном диапазоне.

Звуки гласных букв характеризуются быстро устанавливающимися периодическими колебаниями (рис. 1.11) и имеют основной тон и области концентрации энергии в определенных диапазонах частот.

Основной тон мужских голосов лежит в области частот 70÷250 Гц, женских — в области частот 200÷450 Гц. Основной тон определяет высоту голоса. Форманты находятся преимущественно в области 300÷3000 Гц. Наличие в голосе обертонов в том или ином соотношении придает тембр голосу.

Для того чтобы речь была разборчивой, необходимо воспроизвести диапазон частот, в котором находятся основные форманты, т. е. от 200 до 3000 Гц, а для высококачественного воспроизведения тембра каждого индивидуального голоса необходим более широкий диапазон частот от 80

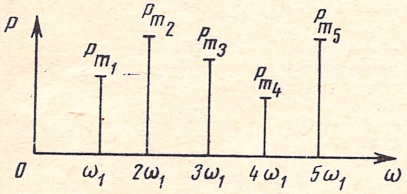


Рис. 1.10. Дискретный амплитудный спектр

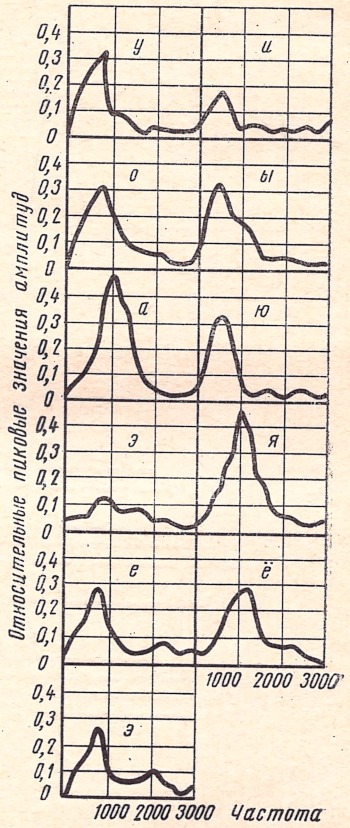


Рис. 1.11. Области формант гласных звуков

до 8000 Гц. Диапазон частот, занимаемый отдельными звуками, показан на рис. 1.12.

Музыкальные звуки содержат большое количество гармоник и их частотный спектр шире, чем частотный спектр речи. Качество передачи музыкальных звуков зависит от передачи всех гармоник, составляющих эти звуки.

Частотный диапазон музыкальных звуков простирается от 30÷40 до 14 000÷16 000 Гц. На рис. 1.13 указаны частотные диапазоны музыкальных инструментов (сплошные линии). Отдельные инструменты (как, например, смычковые и духовые), кроме музы-

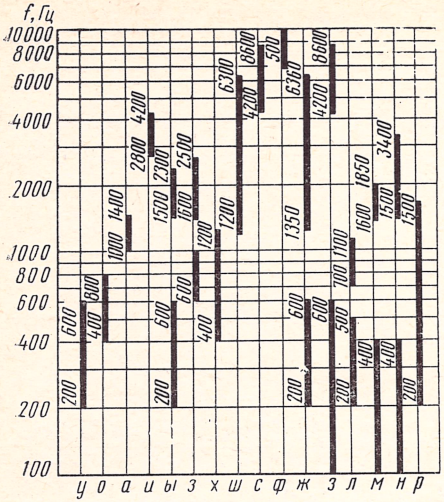


Рис. 1.12. Частотный спектр различных звуков

кальных звуков, создают также некоторые характерные сопровождающие их шумы. Частотный диапазон этих шумов показан на рис. 1.13 мелкими вертикальными линиями.

Кроме частотного диапазона, сигналы речи и музыки характеризуются динамическим диапазоном, который определяется отношением максимального звукового давления во время данной вещательной передачи или данного исполнения к минимальному значению давления за это же время и выражается в децибелах:

$$D = 20 \lg \frac{p_{макс}}{p_{мин}}.$$

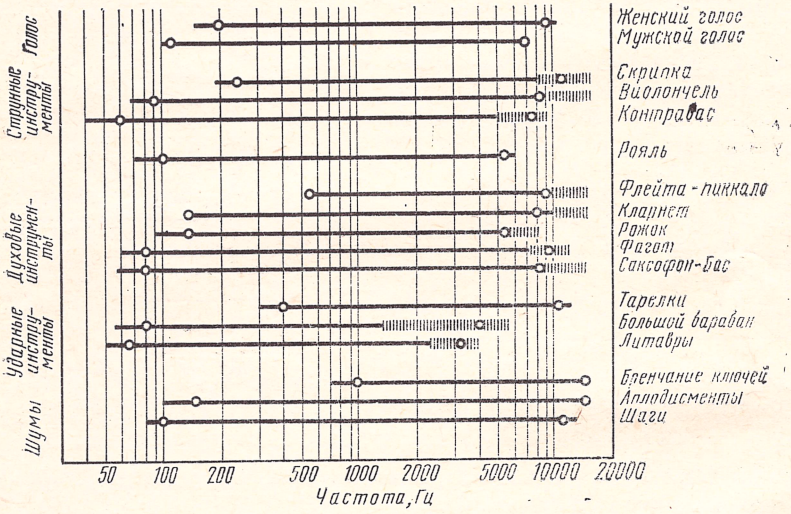


Рис. 1.13. Частотные диапазоны различных источников звука

Значения звукового давления, создаваемого музыкальными инструментами и исполнителями, весьма различны. Литавры, например, на форте развивают давление 4,4 Па, а флейта — 0,004 Па. При наличии в каком-либо исполнении и звуков литавр, и флейты динамический диапазон будет равен

$$D = 20\lg \frac{4,4}{0,004} \approx 60 \text{ дБ}.$$

Динамический диапазон исполнения, или так называемый натуральный динамический диапазон, характеризует качество исполнения. Натуральный динамический диапазон не во всех случаях может быть полностью воспроизведен. Он ограничивается нелинейностью и шумами аппаратуры тракта.

На рис. 1.14 изображена идеализированная амплитудная характеристика вещательного тракта. Отрегулируем систему так, чтобы максимальные значения напряжения $U_{макс}$, соответствующие максимальным значениям звукового давления, доходили до верхнего участка характеристики, а напряжения $U_{мин}$, соответствующие минимальным значениям звукового давления, не заходили в область шумов. При этом желательно, чтобы $U_{мин}$ было больше на 10—20 дБ уровня шума. Предельный динамический диапазон тракта определяется как $D_{пред} = 20\lg (U_{макс}/U_{ш})$.

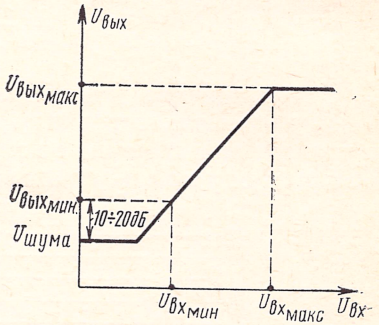


Рис. 1.14. Идеализированная амплитудная характеристика вещательного тракта

Передача через вещательную систему слишком широкого динамического диапазона встречает значительные технические и экономические трудности. Поясним это на примере: пусть максимальному звуковому давлению у микрофона соответствует коэффициент модуляции передатчика $m_{макс} = 90\%$. Тогда, если нужно передать динамический диапазон, равный 70 дБ, то минимальный коэффициент модуляции $m_{мин}$ должен быть приблизительно 0,03%, т. е. на уровне фона передатчика. При этом передача информации практически не возможна. Еще большие трудности возникают на месте приема: уровень шума приемника, шум помещения также ограничивают воспроизведения большого динамического диапазона.

Если принять максимально допустимый уровень громкости в помещении у слушателя равным 80 дБ, а уровень шума в помещении 30—40 дБ, получим допустимый динамический диапазон $D = 50—40$ дБ.

При вещании по специальным междугородным кабельным линиям возможно получить $D = 50$ дБ; при звукоусилении в зале можно иметь $D = 65$ дБ.

Динамические уровни сигналов вещательной передачи

Ухо человека, как и глаз, обладает инерционностью, поэтому мы реагируем не на мгновенное значение звукового давления, а на некоторое усредненное их значение. Время, в течение которого про-

исходит усреднение, можно назвать «памятью» уха. Это время определяется величиной порядка $T=30\cdot10^{-3}$ с. Исходя из сказанного, вещательная передача характеризуется не просто уровнем, например, мощности, а динамическим уровнем. Под динамическим уровнем понимают отношение средней мощности вещательной передачи за некоторое выбранное время T к значению мощности, принятому за нулевое, выраженное в децибелах:

$$N(T) = 10\lg\frac{P(T)}{P_0}.$$

Для измерения динамического уровня сигналов применяют приборы, записывающие динамический уровень на ленте. Записи, получаемые при помощи этих приборов, называемых самописцами, называются уровнеграммами. В качестве примера на рис. 1.15

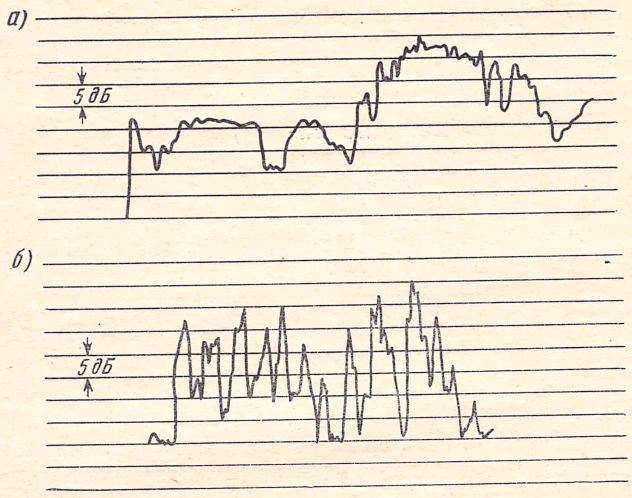


Рис. 1.15. Уровнеграмма музыкального отрывка

приведены уровнеграммы речи и музыки, исполняемой эстрадным ансамблем. Исследование уровнеграмм различных музыкальных и речевых звучаний показало определенную закономерность, которой подчинены вероятности тех или иных значений динамического уровня. Заранее указать, какое значение примет динамический уровень вещательной передачи, нельзя, так как он меняется случайным образом от передачи к передаче.

Вероятность появления тех или иных значений динамических уровней в течение времени исполнения подчиняется нормальному закону распределения Гаусса, как и большинство случайных величин, например, число вызовов, поступивших от абонентов на телефонную станцию в течение определенного промежутка времени, или число космических частиц, попадающих на определенный уча-

сток земной поверхности в течение промежутка времени определенной длины и т. д.

Наиболее вероятное значение в вещательной передаче имеет средний динамический уровень. Отклонение от среднего значения в сторону больших или меньших уровней равновероятно и чем больше уровни отличаются от среднего уровня, тем меньше вероятность их появления. Все это вытекает из закона нормального распределения. Распределение динамических уровней ($B_{ср}$) по частоте также имеет определенную закономерность (рис. 1.16). Из рас-

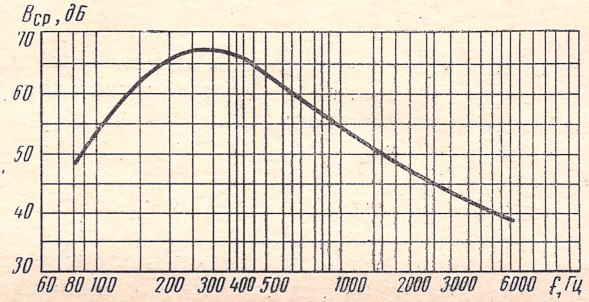


Рис. 1.16. Распределение динамических уровней вещательных сигналов по частоте

смотрения частотной характеристики динамических уровней вытекает, что наибольшие их значения находятся в области средних частот; в области низких и высоких частот их значения значительно меньше.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется звуковое поле?
2. Что такое длина и частота звуковой волны?
3. Что такое интенсивность звука?
4. Каковы частотный и динамический диапазон слуха?
5. Расскажите о логарифмической системе единиц и объясните необходимость ее применения в звуковом вещании.
6. Что такое уровень звукового давления и уровень интенсивности звука?
7. Что такое уровнеграмма вещательной передачи?
8. Что собой представляют сигналы речи и музыки?
9. Каков динамический диапазон различных видов передач?
10. Какое значение звукового давления наиболее вероятно в вещательной передаче?
11. Что такое динамический уровень?

ГЛАВА ВТОРАЯ

КАЧЕСТВО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ВЕЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ

§ 2.1. ЧАСТОТНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Эти искажения характеризуют зависимость коэффициента передачи тракта или элемента тракта от частоты: так, для усилителя низкой частоты частотные искажения характеризуют зависимость коэффициента усиления от частоты, для радиотрансляционной линии — зависимость затухания в линии от частоты.

Причиной частотных искажений в усилителях низкой частоты являются его элементы: индуктивности и емкости. Величины токов и напряжений в схеме усилителя оказываются зависящими от частоты, что, в свою очередь, приводит к частотной зависимости коэффициента усиления. Например, в усилителях низкой частоты завал низших частот происходит в элементах междукаскадной связи — конденсаторах, трансформаторах; завал высших частот из-за паразитных емкостей — в схеме или индуктивности рассеяния выходного трансформатора. Подъем высших частот в усилителях низкой частоты наблюдается вследствие резонанса рассеяния во входных и междуламповых трансформаторах. В линиях проводного вещания частотные искажения возникают вследствие распределенных реактивных параметров линий.

Мерой частотных искажений на частоте f служит коэффициент частотных искажений

$$M_f = K_f/K_0,$$

где K_0 — коэффициент усиления на средней частоте ($f = 1000$ Гц); K_f — коэффициент усиления на частоте f.

Обычно коэффициент частотных искажений для заданного диапазона частот выражают в децибелах:

$$M_f = 20 \lg m_f.$$

Неравномерностью частотной характеристики называется выраженное в децибелах отношение максимального значения коэффициента усиления к минимальному в пределах рабочего диапазона частот.

Частотные искажения изменяют тембр звучания передачи. Завал низших частот при воспроизведении музыки воспринимается как резкое звучание. При подъеме низших и завале высших частот диапазона речь приобретает глухой, «бубнящий» тембр, лишенный яркости и красочности, и становится менее разборчивой. При подъеме высших частот звучание музыки делается резким, а речь более

разборчивой, хотя тембр ее становится несколько неприятным из-за подчеркивания свистящих и шипящих звуков.

Степень слышимости частотных искажений зависит в бо́льшей степени от области частотной характеристики, в которой они лежат, от «ширины» (по частоте) подъема или завала, от их величины.

Частотно-фазовыми или просто фазовыми искажениями называют искажения, связанные с изменением фазовых соотношений между отдельными частотными составляющими сложного колебания. В результате фазовых искажений искажается форма результирующей кривой колебания.

Возникают фазовые искажения из-за реактивных элементов в усилителях, трансформаторах, линиях, электроакустической аппаратуре и т. д. Человеческий слух слабо реагирует на фазовые искажения. Ухо начинает различать фазовые искажения лишь при очень большой их величине, когда временны́е сдвиги достигают десятков миллисекунд для низших частот и нескольких миллисекунд для высших частот по отношению ко времени распространения на средних частотах диапазона.

Такие значительные по величине фазовые искажения может вносить, например, 1000-километровая кабельная линия связи, работающая в тональном спектре частот и содержащая десятки промежуточных усилителей, фильтров и других элементов, вызывающих фазовые сдвиги между отдельными составляющими сложного колебания.

§ 2.2. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Источниками нелинейных искажений в усилителях являются электронные лампы, транзисторы, трансформаторы. Характеристики этих элементов могут быть сведены к двум типам, показанным на рис. 2.1. Кривая типа *1* имеет ограниченно прямолинейный участок между точками *а—б* и представляет собой идеализированную характеристику триода. Для этой формы кривой характерно отсутствие искажений при условии, если амплитуды входного сигнала не выходят за пределы *а—б;* искажение начинается только после того, как амплитуда входного сигнала выйдет за точку *а* или за точку *б,* или за обе точки одновременно.

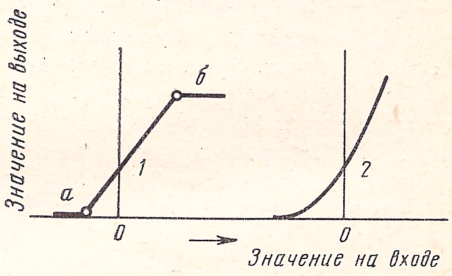


Рис. 2.1. Типовые рабочие амплитудные характеристики элементов усилителя

В зависимости от выбора рабочего участка форма выходного сигнала искажается и наблюдается симметричное или несиммет-

ричное ограничение (рис. 2.2*а, б*). Искажение формы сигнала из-за насыщения стали трансформатора показано на рис. 2.2*в*. Искаженная форма сигнала свидетельствует о появлении новых частот, отсутствовавших в спектре первичного, неискаженного сигнала. При

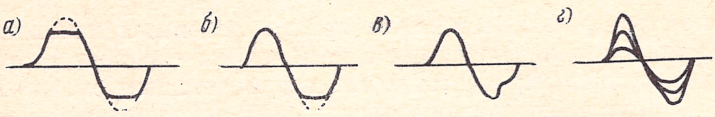


Рис 2.2. Типовые искажения формы сигнала

воздействии на вход нелинейной системы синусоидально изменяющегося напряжения $u = U \sin \omega t$ в выходном сигнале появляются частоты-гармоники, находящиеся в целом, кратном отношении к основной частоте (например, 2-я гармоника с частотой 2ω, 3-я гармоника с частотой 3ω).

При подаче на вход нелинейной системы синусоидально изменяющихся напряжений нескольких частот ω_1, ω_2, ω_3, т. е. при наличии сигнала вида

$$u = U_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + U_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + \ldots + U_m \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

на выходе системы, помимо напряжения частот-гармоник, возникают напряжения так называемых комбинационных частот: $n\omega_1 \pm m\omega_2$, где n и m — целые числа (1, 2, 3 и т. д.). Так как частоты гармоник превышают основную частоту в несколько раз, а амплитуды гармоник составляют обычно проценты и доли процентов от амплитуды основной частоты, их возникновение может изменить только тембр звучания: звучание сигнала получается «нечистым». При больших искажениях возникает хрип, появляются трески. Особенно неприятно воспринимаются комбинационные частоты. Нелинейные искажения возникают и при накладке на основной сигнал фона переменного тока (рис. 2.2*г*).

Для количественной оценки нелинейных искажений пользуются величиной коэффициента гармоник, представляющего собой отношение эффективного напряжения (или тока) гармоник к эффективному напряжению (или току) основной частоты.

Обычно коэффициент гармоник выражают в процентах:

$$K_f = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \ldots}}{U_1} 100\%$$

или

$$K_f = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots}}{I_1}.$$

§ 2.3. ШУМЫ

В радиовещательном тракте могут возникнуть акустические шумы, радиопомехи (атмосферные и промышленные), линейные шумы, аппаратные шумы, ограничивающие динамический диапазон сигнала.

Акустические шумы в помещениях обусловлены недостаточной звукоизоляцией помещений, в которые проникают звуковые колебания от посторонних источников звука, а также от внутренних источников шума. Количественно акустические шумы оцениваются так:

$$N_{\text{аш}} = 20\lg\frac{p_{\text{ш}}}{p_0}, \text{ дБ},$$

где $p_{\text{ш}}$ — звуковое давление, создаваемое источником шума;
p_0 — нулевой уровень звукового давления ($2 \cdot 10^{-5}$ Па).

Так, например, в радиовещательной студии, несмотря на особую звукоизоляцию, всегда имеется шум, уровень которого не менее 15—20 дБ, в жилой комнате 30—40 дБ, на улицах 80—90 дБ. Атмосферные и промышленные радиопомехи прослушиваются на выходе приемника в виде щелчков, шорохов и тресков и резко снижают качество радиовещательного приема. Основной причиной атмосферных помех являются местные и отдаленные грозовые разряды, вызывающие электромагнитные колебания высокой частоты, распространяющиеся по тем же законам, что и волны радиовещательных станций. Промышленные помехи возникают при искрении коллекторов электрических машин, при возникновении дуги в месте соприкосновения проводов с токоприемниками трамвая и троллейбуса, при работе устройств зажигания в двигателях автомашин, аппаратов электросварки, высокочастотных печей, рентгеновской аппаратуры и т. д. Преобладающее значение в городах имеют промышленные помехи, в сельской местности — атмосферные.

Линейные шумы, образующиеся в линиях для передачи вещательных программ, можно разделить на шумы, присущие самой линии, и шумы, возникающие в линии из-за влияния на нее внешних электромагнитных полей.

Основными мерами снижения указанных шумов служат скрещивание проводов для воздушных, скрутка жил и их экранирование для кабельных линий. В линиях, уплотняемых высокочастотными каналами, взаимные влияния снижаются соответствующим разнесением частотных спектров, занимаемых каналами.

Линии электрического тока оказывают заметное влияние на воздушные и кабельные линии связи, вызывая в них помехи на частотах порядка десятков и сотен герц. Эти помехи уменьшают, главным образом, путем соответствующего разнесения указанных линий.

Шумом, присущим самой линии, является так называемый термический шум, образующийся в проводах линии вследствие беспорядочного движения свободных электронов, вызываемого тепловым движением молекул. Мощность термических шумов распределяется равномерно по всему спектру частот (от десятков герц до десятков мегагерц). Эта мощность невелика. Однако в длинных кабельных магистралях, имеющих десятки и даже сотни участков линии, разделенных промежуточными усилительными пунктами, суммарная величина мощности термических шумов может быть сравнимой с величиной шумов других видов.

Аппаратурные шумы—шумы, вносимые аппаратурой станционных вещательных устройств, определяются электронными лампами; полупроводниковыми триодами; цепями звуковой частоты, работающими при низких уровнях; источниками питания и т. д.

Шумы оцениваются отношением напряжения, развиваемого шумами, $U_ш$ к напряжению полезного сигнала $U_с$, т. е.

$$N_ш = 20 \lg \frac{U_ш}{U_с}, \text{ дБ}.$$

§ 2.4. СОХРАНЕНИЕ ОБЪЕМНОСТИ ЗВУЧАНИЯ

Высокое качество вещания и звукозаписи обеспечиваются в том случае, если слуховое ощущение, получаемое слушателями от радиоприемника, телевизора и т. д., достаточно хорошо соответствует тому ощущению, которое они получили бы при непосредственном восприятии в концертном или театральном зале. Нарушение такого соответствия этих ощущений, при котором слушатели были бы не в состоянии заметить их различие, обусловливается, в первую очередь, теми видами искажений, которые уже рассмотрены.

Слушатель, находящийся в концертном зале, воспринимая, например, звуки оркестра, ощущает направления, по которым звук приходит от того или иного музыкального инструмента или группы их, благодаря бинауральному эффекту. Помимо прямых звуков в определенных направлениях, слушатель воспринимает также отраженные звуки, идущие со всех сторон. На слух возможно определить размеры источника звука, т. е. оценить его ширину и глубину. Слушатель же, воспринимающий все звуки, прошедшие через вещательный тракт и воспроизведенные громкоговорителями, слышит как бы одним ухом и поэтому теряет пространственное распределение источников звука.

Сохранить пространственную перспективу можно, применяя систему передачи записи и воспроизведения, носящую название стереофонической. Монофоническая система — система без сохранения пространственной перспективы, имеет всего один канал записи и воспроизведения звука. Стереофоническая система имеет два и более каналов. Несколько каналов необходимо, чтобы фиксировать не только амплитудное значение сигнала источника звука, но и его

фазу. Сохранение и воспроизведение амплитудных и фазовых изменений в сигнале позволяют представить объемность звучания источника звука. Для стереофонии (объемного звучания) применяется специальная аппаратура записи и воспроизведения.

§ 2.5. ЗАМЕТНОСТЬ ИСКАЖЕНИЙ

Искажения, возникающие в аппаратуре, по-разному воспринимаются человеком.

Ряд научно-исследовательских и учебных институтов Министерства связи СССР под руководством проф. И. Е. Горона, методом субъективно-статистической экспертизы исследовал заметность различного рода искажений. Познакомимся с некоторыми результатами этих исследований.

Результаты экспериментов по определению заметности ограничения диапазона воспроизводимых частот снизу и сверху, проведенных на различном звуковом материале, для различных групп экспертов представлены в виде усредненной кривой заметности на рис. 2.3*а* и *б*. В среднем 50% слушателей замечают разницу в воспроизведении при ограничении полосы сверху примерно до 8,5 кГц; 75% — при ограничении до 6 кГц; 90% — при ограничении до 4 кГц.

Эксперименты показывают, что в среднем ограничение полосы воспроизведения частотой 100 Гц замечают около 30% слушателей, а частотой 150 Гц — свыше 50% слушателей. Ограничение частотой 300 Гц замечают свыше 95% слушателей.

Исследование влияния всевозможных отклонений частотной характеристики (подъемов или спадов характеристики к краям диапазона, пиков и провалов на характеристике) на качество звучания показало следующее: завал или подъем частотной характеристики примерно до 6 дБ является не очень опасным искажением, особенно в области низких частот и крайних высоких (10 000÷÷15 000 Гц); при наличии завала на одном краю полосы желательно иметь такой же спад и на другом; при этом происходит некоторое уравновешивание спектра и звучание становится лучше.

Широкие пики и провалы на частотной характеристике при величине 5 дБ, как правило, уверенно замечаются слушателями. Острые пики и провалы заметны много меньше. В области низких и высоких частот острые пики и провалы величиной 15 дБ остаются неуверенно заметными. При частотных искажениях вида комбинации пиков с провалами допустима бóльшая неравномерность частотной характеристики, чем в случае присутствия только пиков или только провалов.

Исследование заметности нелинейных искажений показало; нечетные гармоники заметны в широком диапазоне частот (кривая *1*) и менее заметны в узком (кривая *2*) (рис. 2.3*в*). Заметность четных гармоник (квадратичных искажений) не меняется с изменением воспроизводимого частотного диапазона. По сравнению с (не-

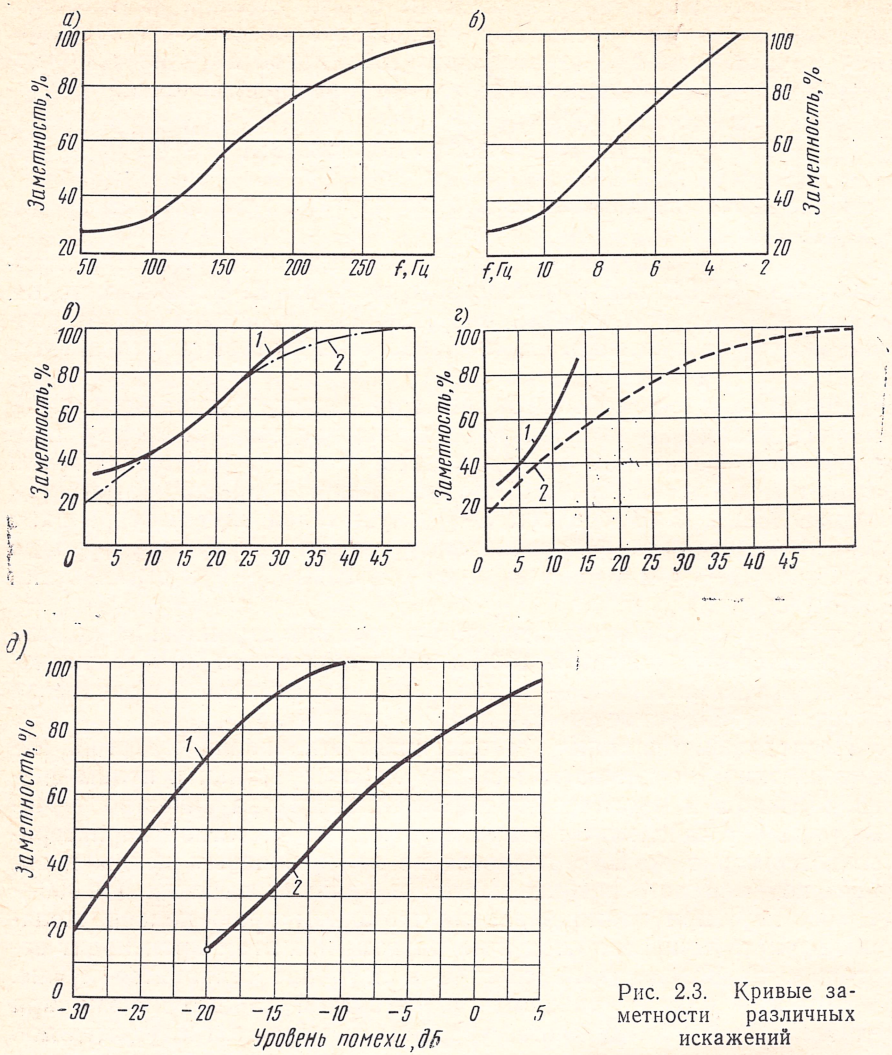


Рис. 2.3. Кривые заметности различных искажений

четными гармониками) кубичными искажениями квадратичные искажения в широкополосном тракте в 2 раза менее заметны, в узкополосном тракте заметность одинаковая. Чрезвычайно заметны на слух, особенно в широком диапазоне частот (50% экспертов замечают отсечку в 3% при широкой полосе, а в узкой полосе — в 6%), нелинейные искажения вида «центральная отсечка» (рис. 2.3*г*). Заметность нелинейных искажений, частотнозависимых в области низких частот, оказывается малой.

При исследовании заметности фона и шума в результате большого числа разнообразных экспериментов были получены следую-

щие результаты: наиболее заметны фоны с частотой 50, 100 и 150 Гц. В области частот ниже 50 Гц энергия полезного сигнала сравнительно невелика, в то время как в области выше 200 Гц сосредоточена основная энергия сигнала и сигнал сильно маскирует фон. В той же степени вышесказанное относится к шуму.

Заметность различных помех графически изображена на рис. 2.3*д*, где кривая *1* относится к заметности гладкого шума, а кривая *2* — к фону 100 Гц.

§ 2.6. КЛАССЫ КАЧЕСТВА

В соответствии со степенью заметности искажений различают следующие четыре класса качества звучания:

— высший класс — соответствует звучанию, при котором искажения передачи (или помехи в передаче) совершенно незаметны для обычных слушателей и практически незаметны для высококвалифицированных экспертов;

— первый класс — соответствует звучанию, при котором искажения практически незаметны для обычных слушателей и неуверенно заметны для высококвалифицированных экспертов;

— второй класс — соответствует неуверенной заметности искажений передачи для обычных слушателей и уверенной заметности для высококвалифицированных экспертов;

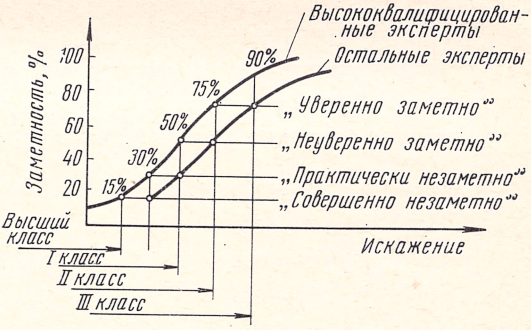


Рис. 2.4. Классификация заметности искажений

— третий класс — соответствует наличию в передаче искажений, которые уверенно заметны обычными слушателями. Сказанное иллюстрируется рис. 2.4.

Наличие нескольких классов качества определяется техническими возможностями и экономической целесообразностью обеспечения в каждом конкретном случае наиболее высоких качественных показателей аппаратуры. Технические возможности и экономические соображения учитываются при установлении класса качества для каждого из элементов вещательного тракта.

Требованиям высшего класса качества должны удовлетворять устройства головных звеньев радиовещательных трактов, а именно: аппаратура крупных радиовещательных узлов; радиовещательные передатчики с частотной модуляцией, работающие на ультракоротких волнах; профессиональные приемники частотномодулиро-

ванных сигналов, предназначенные для ретрансляции вещания на ультракоротких волнах.

Требованиям первого класса качества должны удовлетворять: аппаратура небольших радиовещательных узлов, радиовещательные передатчики с использованием амплитудной модуляции; профессиональные приемники амплитудномодулированных сигналов, предназначенные для ретрансляции вещательных программ; аппаратура крупных станций проводного вещания и трансляционные сети крупных городов, междугородные каналы для подачи программ радиовещания; высококачественные магнитофоны.

Требованиям второго класса качества должны удовлетворять: аппаратура небольших станций проводного вещания и трансляционные сети небольших городов, радиовещательные приемники амплитудномодулированных сигналов индивидуального пользования, магнитофоны и устройства грамзаписи бытового назначения.

Требованиям третьего класса качества должна удовлетворять оконечная аппаратура: громкоговорители, вещательные АМ приемники.

ТАБЛИЦА 2.1

Качественные показатели	I класс	II класс	III класс
Воспроизводимый диапазон частот, Гц	60÷9500	100÷6000	200÷4000
Неравномерность частотной характеристики в полосе, Гц			
60÷9500	6 дБ		
100÷5000	2 дБ		
100÷6000		6 дБ	
200÷4000			6 дБ
Коэффициент гармоник при номинальном напряжении на частотах, Гц			
60÷100	6%		
100÷200	—	8%	
100÷4000	2,5%		
200÷4000		3,6%	7%
>4000	6%	6%	
Фон частоты 50 и 100 Гц	—55 дБ	—50 дБ	—45 дБ
Фон частоты 150÷600 Гц и гладкий шум относительно номинального выходного напряжения не более, дБ	—60 дБ	—55 дБ	—

Данные субъективно-статистических экспертиз слухового восприятия различных искажений и помех позволяют установить нормы на допустимые в том или ином классе качества виды искажений и помех. Характеризуя каждый отдельный вид искажений и помех, ниже будут указаны допустимые величины тех или иных искажений и помех. Согласно электрическим нормам проектирования радиотрансляционных сетей [13] установлены три класса качества. Сквозной тракт от входа усилительного тракта до абонентских устройств характеризуется качественными показателями, которые приведены в табл. 2.1.

Контрольные вопросы

1. Какие искажения возникают в тракте передачи и причины их возникновения?
2. Как влияют на восприятия акустического сигнала частотные, нелинейные искажения? Укажите допустимые величины этих искажений.
3. Как устанавливаются нормы на качественные показатели аппаратуры?
4. Как сохранить при воспроизведении акустического сигнала его объемность?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

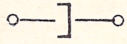
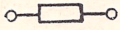
МИКРОФОНЫ

§ 3.1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГАХ

Электроакустическая аппаратура, например, микрофоны, громкоговорители представляют сложные электромеханические системы, аналитическое исследование которых для специалистов в области радиосвязи и радиовещания затруднительно. С другой стороны, методы исследования электрических систем хорошо знакомы им. Это навело на мысль найти аналогию между механическими и электрическими системами с тем, чтобы законы электротехники (закон Ома, Кирхгофа и др.) использовать для исследования механических систем. Была усмотрена формальная аналогия в написании дифференциальных уравнений для колебаний в механической и электрической системах. Кроме того, была замечена и аналогия по существу. Так возник метод электромеханических аналогий, заключающийся в том, что параметры и переменные механической системы (например, микрофона, громкоговорителя и пр.) заменяются параметрами и переменными электрической системы.

В табл. 3.1 представлены основные электромеханические аналоги. Поясним некоторые из них: электрическое напряжение u определяет движение электрических зарядов в цепи, а механическая сила F определяет движение элементов в механической цепи; ско-

ТАБЛИЦА 3.1

Механические величины			Электрические величины		
параметр	изображение	обозначение	параметр	изображение	обозначение
Масса		m (кг)	Индуктивность		L (Г)
Гибкость		C (м/Н)	Емкость		C (Ф)
Сопротивление трения		$ч$ (Н·с/м)	Активное сопротивление		R (Ом)
Сила		F (Н)	Напряжение		U (В)
Скорость		v (м/с)	Ток		I (А)
Смещение		x (м)	Заряд		Q (Кл)

рость в механической системе v определяет изменение положения элемента во времени, а ток в электрической цепи определяется изменением зарядов во времени. Масса механической системы определяет инерционность системы; в массе происходит накопление кинетической энергии.

В электрической системе инерционным элементом является индуктивность L, в которой происходит запас энергии электромагнитного поля.

Ряд механических элементов (так например, пружина, пластина) — характеризуется гибкостью C. При приложении к ней некоторой внешней силы в этих элементах накапливается потенциальная энергия. Аналогично при подведении напряжения к электрическому конденсатору на нем происходит накопление электрических зарядов. Таким образом, аналогом гибкости может являться емкость и наоборот.

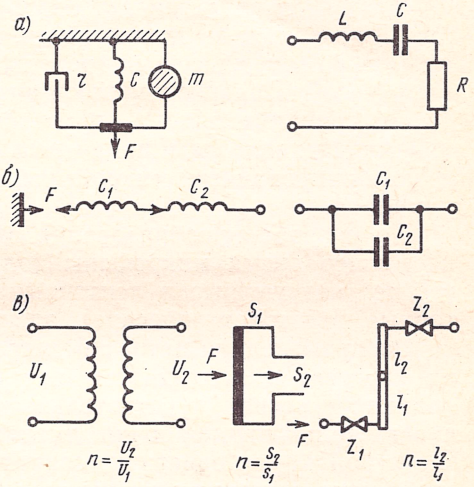


Рис. 3.1. Аналогии

Имея в виду приведенную аналогию, механическое устройство можно заменить электрической схемой. Для этого следует воспользоваться следующими основными правилами:

1) если механические элементы соединены в конструкции в узел, то в электрической схеме, являющейся ее аналогом, элементы будут соединены последовательно (рис. 3.1*а*);

2) если механические элементы соединены в конструкции це-

ТАБЛИЦА 3.2

Акустические величины		Электрические величины	
параметр	обозначение	параметр	обозначение
Акустическая масса	m_a(кг/м^4)	Индуктивность	L(Г)
Акустическая гибкость	c_a(м$^4\cdot$с^2/кг)	Емкость	C(Ф)
Сопротивление акустическое	r_a(кг/м$^4\cdot$с)	Активное сопротивление	R(Ом)
Звуковое давление	p (Па)	Напряжение	U(В)
Поток	v (м^3/с)	Ток	I(А)
Объемное смещение	V (м^3)	Заряд	Q(К)

почкой, то в схеме электрического аналога элементы соединяются параллельно (рис. 3.1*б*);

3) электрический трансформатор аналогичен преобразователю скорости потока воздуха в акустической системе и рычагу механической системы (рис. 3.1*в*). Под акустической колебательной системой следует понимать ограниченный объем воздуха.

Подобная аналогия может быть проведена и между электрическими и акустическими величинами, которая сведена в табл. 3.2.

§ 3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОФОНОВ

Микрофон представляет собой электроакустический прибор для преобразования звуковых колебаний в электрические. Микрофоны могут быть классифицированы по принципу приема и по принципу преобразования звуковой энергии.

По принципу приема звуковой энергии микрофоны делятся на приемники давления и приемники градиента давления. Существуют и комбинированные микрофоны, в которых используются оба принципа.

По способу преобразования звуковой энергии применяемые в настоящее время микрофоны подразделяются на электродинамические (катушечные и ленточные), электростатические (конденсаторные, пьезоэлектрические), электромагнитные и угольные.

Основными параметрами микрофона, позволяющими судить об их качестве и пригодности для различных случаев применения, являются: осевая чувствительность, стандартный уровень осевой чувствительности, рабочий диапазон частот и неравномерность частотной характеристики, сопротивление номинальной нагрузки, диаграмма направленности, средняя разность чувствительностей между фронтом и тылом, уровень шумов.

Осевая чувствительность (E_0) микрофона — это отношение величины напряжения, развиваемого микрофоном на номинальной нагрузке, к величине звукового давления, воздействующего на микрофон в направлении его максимальной чувствительности. Давление измеряется в пространстве в отсутствие микрофона или, как принято говорить, в свободном поле:

$$E_0 = \frac{U}{p}\left(\frac{10^{-3}\,\text{В}}{\text{Па}}\right).$$

Направление максимальной чувствительности микрофона называется акустической осью микрофона.

Стандартный уровень осевой чувствительности (N) микрофона представляет собой выраженный в децибелах уровень мощности, отдаваемой микрофоном в номинальную нагрузку при эффективном звуковом давлении 0,1 Па. Уровень измеряется относительно нулевого уровня электрической мощности:

$$N = 10\lg\frac{P_{p=0,1}}{10^{-3}}.$$

Зависимость осевой чувствительности микрофона от частоты называется частотной характеристикой. Рабочий диапазон частот выделяется из частотной характеристики чувствительности как диапазон частот, воспроизводимый микрофоном с допустимой неравномерностью.

Средняя чувствительность микрофона вычисляется как среднее арифметическое из значений осевой чувствительности на определенных частотах, которые располагаются внутри рабочего диапазона частот микрофона.

Диаграмма направленности $D(\theta)$ микрофона есть зависимость чувствительности микрофона от угла падения звукового давления на микрофон. Она, как правило, дается в полярных координатах. Эффективность направленных микрофонов определяется отношением «фронт/тыл», т. е. отношением среднеарифметических значений фронтальной осевой чувствительности микрофона к тыловой. Отношение осевой чувствительности микрофона к чувствительности его к рассеянному звуку носит название коэффициента направленности. Уровень собственных шумов определяется, как отношение напряжения шума $U_ш$ к напряжению U, развиваемому микрофоном под действием звукового давления в 0,1 Па, выраженное в децибелах:

$$N_ш = 20 \lg \frac{U_ш}{U}.$$

Все основные параметры микрофонов будут рассмотрены более подробно в дальнейшем для каждого типа микрофона.

§ 3.3. ПРИЕМНИК ДАВЛЕНИЯ

Микрофон любого типа содержит мембрану или диафрагму или другую подвижную систему, движение которой вызывает изменение параметров электрической цепи и возникновение эдс.

Приемник давления представляет собой приемник звуковой энергии, выполненный конструктивно так, что звуковое давление воздействует на одну сторону подвижной системы.

Приемник давления условно изображают как показано на рис. 3.2*а*, где S — площадь подвижной системы микрофона (диафрагма); $Э$ — экран, закрывающий диафрагму так, что звуковое давление p от источника звука падает только на одну ее сторону; d — геометрический размер приемника.

Диаграмма направленности приемника давления зависит от соотношения размеров приемника и длины падающей на него звуковой волны.

Если размеры приемника звука d очень малы по сравнению с длиной падающей волны $d \ll \lambda$, то приемник не искажает звукового поля. В этом случае на него действует то звуковое давление, которое было в пространстве, когда приемник звука отсутствовал. Под действием звукового давления p возникает механическая сила

F, действующая на диафрагму. Эта сила пропорциональна площади S диафрагмы и звуковому давлению: $F=pS$. Микрофон, работающий на принципе приемника давления, будет развивать напря-

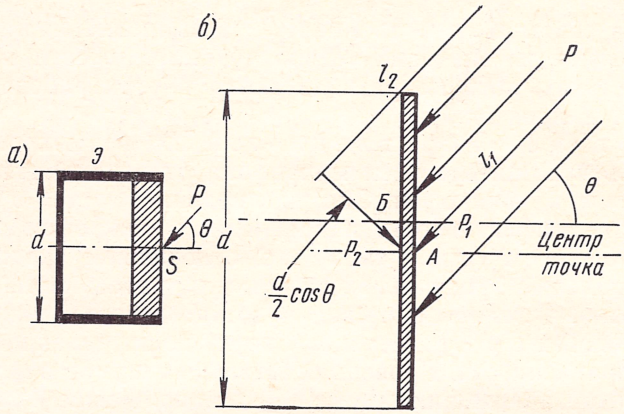


Рис. 3.2. К рассмотрению принципа действия приемников давления и градиентов давления

жение на своей нагрузке, пропорциональное механической силе F, и не будет обладать направленным свойством в той области частот, где $\lambda \gg d$. Диаграмма направленности имеет вид окружности.

Если размеры приемника давления сравнимы с длиной волны, то дифракция звука приводит к тому, что действующее на микрофон давление $p_д$ будет отличаться от p, а механическая сила $F=p_дS$. Звуковое давление $p_д$ зависит от формы приемника, соотношения между длиной волны и размерами приемника d/λ и от угла падения θ звуковой волны:

$$p_д = p\,\varphi\left(\frac{d}{\lambda},\ \theta\right).$$

Механическая сила F также становится зависимой от размера приемника, длины волны или частоты $\left(\lambda=\frac{C_0}{f}\right)$ и от угла падения звуковой волны:

$$F = p\,\varphi\left(\frac{d}{\lambda},\ \theta\right)S.$$

Таким образом, микрофон при $d \gg \lambda$ будет иметь направленные свойства. Чем больше размер микрофона, тем ниже частота, на которой проявляются направленные свойства.

§ 3.4. ПРИЕМНИК ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

Приемник градиента давления представляет собой приемник звуковой энергии, выполненный конструктивно так, что звуковое давление воздействует на две противоположные стороны подвижной системы (рис. 3.2*б*).

Сила F, действующая на приемник с поверхностью S, определяется разностью звуковых давлений $p_1 - p_2 = \Delta p$, действующих на обе стороны приемника $F = \Delta p S$, и может быть представлена двумя составляющими $F_А$ и $F_Б$. Если предположить, что звуковое давление, воздействующее на подвижную систему, подчиняется синусоидальному закону, то при $p = p_m \sin \omega t$, $F_А = p_m S \sin \omega t$, $F_Б = p_m S \sin(\omega t - \varphi)$, где φ — разность фаз между колебаниями звука в точках $А$ и $Б$, и действующая сила

$$F = F_А - F_Б = p_ш S [\sin \omega t - \sin(\omega t - \varphi)] = 2 p_m S \sin \frac{\varphi}{2} \times$$

$$\times \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Разность фаз может быть выражена как $\varphi = 2\pi \frac{d \cos \theta}{2\lambda}$, тогда сила, действующая на подвижную систему, будет иметь вид

$$F = 2 p_m S \sin\left(\pi \frac{d \cos \theta}{2\lambda}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Если $d \ll \lambda$, т. е. длина звуковой волны значительно превышает размер микрофона, то можно величину $\sin\left(\pi \frac{d \cos\theta}{\lambda}\right)$ заменить значением угла $\pi \frac{d \cos \theta}{2\lambda}$. Отсюда $F = p_m S \frac{\pi d}{\lambda} \cos\theta \cos\left(\omega t - \frac{\varphi}{2}\right)$. Окончательно амплитуда силы

$$F_m = \pi p_m S \frac{d}{\lambda} \cos\theta = p_m S \frac{\omega d}{2 C_0} \cos\theta.$$

Как указывалось выше $F = \partial p S$, откуда

$F = \frac{\partial p}{\partial l} \Delta l S = \frac{\partial p}{\partial l} d \cos\theta S$, так как $\Delta l = \frac{\partial \cos\theta}{2}$;

$\frac{\partial p}{\partial l}$ — изменение звукового давления по длине пути l распространения звуковой волны, которое называется градиентом давления, и поэтому микрофон подобной конструкции носит название приемник градиента давления. Микрофон, работающий на принципе приемника градиента давления, развивает на нагрузке напряжение, пропорциональное результирующей силе F_m, и, следовательно, зависящее от соотношения размера микрофона и длины

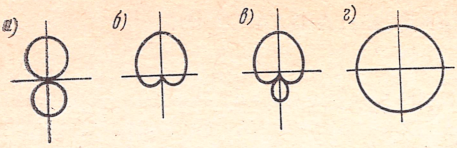


Рис. 3.3. Диаграммы направленности

волны (или частоты) и угла падения звуковой волны θ на микрофон.

При неизменной амплитуде действующего звукового давления амплитуда движущей силы возрастает с повышением частоты.

Для такого микрофона чувствительность зависит от угла падения волны, т. е. $E=\varphi(\theta)$.

При $\theta=0$ $E=E_{макс}$; при $\theta=90°$ $E=0$; при $\theta=180°$ $E=E_{макс}$.

Диаграмма направленности $D(\theta)=E_\theta/E_0$ представляет собой восьмерку $D(\theta)=\cos\theta$ (рис. 3.3*а*).

§ 3.5. КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРИЕМНИКИ

Приемник давления имеет диаграмму направленности $D_1(\theta)=E_{\theta 1}/E_{01}=1$. Приемник градиента давления имеет диаграмму направленности $D_2(\theta)=E_{\theta 2}/E_{02}=\cos\theta$.

Совмещая в одной конструкции приемника звука приемник давления и приемник градиента давления, можно получить различные диаграммы направленности.

Пусть специально сконструированный микрофон имеет осевую чувствительность, которая равна сумме чувствительности приемника давления и приемника градиента давления, т. е. $E_\theta=E_{\theta 1}+E_{\theta 2}$, тогда диаграмма направленности этого микрофона будет

$$D(\theta)=E_\theta/E_0=E_{01}/E_0+E_{\theta 2}/E_{02}.$$

Если подобрать конструкцию микрофона так, чтобы $E_0=E_{01}=E_{02}$, тогда

$$D(\theta)=E_\theta/E_0=E_{\theta 1}/E_{01}+E_{\theta 2}/E_{02}=1+\cos\theta,$$

т. е. диаграмма направленности комбинированного приемника представляет собой кардиоиду в полярных координатах, как показано на рис. 3.3*б*.

Меняя долю участия приемника градиента давления в общей чувствительности, можно получить разнообразные диаграммы направленности. Если выполнить конструкцию микрофона так, чтобы напряжение, развиваемое приемником градиента давления, было несколько больше, например на 25%, чем от приемника давления, то диаграмма направленности сложного микрофона будет выражаться как $D(\theta)=\frac{1}{4}(1+3\cos\theta)$ и иметь вид гиперкардиоиды (рис. 3.3*в*).

Комбинированные приемники могут быть получены:

1. Путем электрического соединения двух микрофонов различных типов (приемника давления и приемника градиента давления).

2. Путем создания такой механико-акустической системы, в которой движущая сила, определяющая работу микрофона, может быть разложена на две составляющие, одна из которых не зависит от угла падения звуковой волны, а другая пропорциональна $\cos\theta$.

3. Путем использования двух микрофонов, являющихся каждый по отдельности комбинированным, т. е. имеющим диаграмму направленности кардиоиды, но с противоположно расположенными акустическими осями.

Пусть чувствительность одного микрофона выражается зависимостью $E_1=\frac{1}{2}E_{01}(1+\cos\theta)$, а чувствительность другого — зависимостью $E_2=\frac{1}{2}E_{02}(1-\cos\theta)$, где E_{01}, E_{02} — осевая чувствительность каждого микрофона. Тогда комбинируя их в одну систему, получим общую чувствительность комбинированного микрофона:

$$E=\frac{1}{2}[(E_{01}+E_{02})+(E_{01}-E_{02})\cos\theta].$$

Изменяя соотношения между E_{01} и E_{02}, можно получить различные диаграммы направленности.

Рассмотрим основные возможные случаи:

1. $E_{01}=E_{02}$ — синфазное включение микрофонов на общую нагрузку. При этом $E=\frac{1}{2}[E_{01}+E_{02}]$, следовательно, $D(\theta)=\frac{E}{E_0}=1$.

Диаграмма направленности имеет вид круга (3,3 *г*).

2. $E_{01}=-E_{02}$ — противофазное включение микрофонов на общую нагрузку. При этом $E=\frac{1}{2}[(E_{01}-E_{02})\cos\theta]=E_0\cos\theta$ и диаграмма направленности имеет вид восьмерки: $D(\theta)=\cos\theta$ (рис. 3.3*а*).

§ 3.6. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МИКРОФОНЫ

Принцип действия электродинамического микрофона основан на возникновении тока в проводнике, движущемся в магнитном поле. Движение проводника вызывается звуковой энергией.

Электродинамические микрофоны по конструкции подвижной системы разделяются на микрофоны с подвижной катушкой и ленточные микрофоны. Электродинамический микрофон с подвижной катушкой обычно называют динамическим микрофоном. Он имеет легкую диафрагму со звуковой катушкой, которая помещается в кольцевом зазоре магнитной цепи.

Динамические микрофоны обозначаются буквами МД (микрофон динамический) и цифрами, указывающими номер разработки, например, МД-59. Эти микрофоны используются для студийного и проводного вещания, профессиональной звукозаписи и звукоусиления в театрах и концертных залах. Микрофоны просты и надежны.

Динамические микрофоны выполняются в виде приемников давления, и комбинированных приемников. Познакомимся с некоторыми из них.

Динамический микрофон — приемник давления. Общий вид и конструкция динамического микрофона показаны на рис. 3.4. Жест-

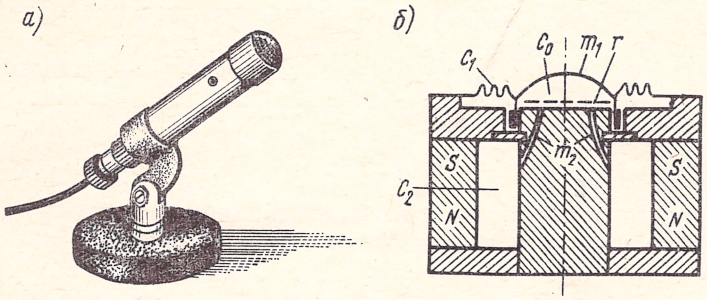


Рис. 3.4. Общий вид и конструкция динамического микрофона

ко скрепленная с диафрагмой звуковая катушка находится в радиальном магнитном поле. Магнитная система микрофона содержит цилиндрический кольцевой постоянный магнит NS из высококоэрцитивного сплава и магнитопровод, состоящий из верхнего и нижнего фланцев и круглого центрального стержня (керна). Между верхним фланцем и керном образуется кольцевой воздушный зазор, в котором и создается радиальное магнитное поле. Под действием звуковой волны колеблется диафрагма и витки звуковой катушки пересекают магнитные силовые линии, вследствие чего на зажимах катушки появляется эдс:

$$E = Blv = Bl\frac{F}{Z_м},$$

где F — сила, действующая на диафрагму; B — индукция в зазоре магнитной системы; $Z_м$ — механическое сопротивление подвижной системы микрофона; v — скорость колебания подвижной системы; l — длина проводника звуковой катушки.

Если к микрофону с внутренним сопротивлением R_i подключить сопротивление нагрузки $R_н$, то напряжение, развиваемое микрофоном на этом сопротивлении, может быть найдено как

$$U_{R_н} = E\frac{R_н}{R_i + R_н} = Bl\frac{F}{Z_м}\frac{R_н}{R_i + R_н}.$$

Максимальная отдача мощности в линию достигается при $R_i = R_н$:

$$U_{R_н макс} = Bl\frac{F}{Z_м}\frac{1}{2}.$$

Добиться равенства $R_i = R_н$ можно с помощью трансформатора, включенного после микрофона, коэффициент трансформации n которого выбран, исходя из соотношения $n = \sqrt{\frac{R_н}{R_i}}$.

Тогда напряжение на нагрузке $R_н$ будет

$$U_{R_н} = \frac{1}{2} Bl \frac{F}{Z_м} n = \frac{1}{2} B l \frac{F}{Z_м} \sqrt{\frac{R_н}{R_i}}.$$

Внутреннее сопротивление микрофона R_i определяется параметрами звуковой катушки длиной l, поперечным сечением q и удельным сопротивлением ρ проводника: $R_i = \rho l/q$.
Механическая сила для приемника давления

$$F = pS,$$

где S — площадь диафрагмы; p — звуковое давление, действующее на диафрагму. Подставляя значения силы, окончательно получаем

$$U_{R_н \text{ макс}} = \frac{1}{2} Bl \frac{pS}{Z_м} \sqrt{\frac{R_н q}{\rho l}},$$

и осевая чувствительность микрофона будет определена через параметры микрофона следующим образом:

$$E_0 = \frac{U}{p} = \frac{1}{2} B \frac{S}{Z_м} \sqrt{\frac{R_н l q}{\rho}}.$$

Следовательно, чувствительность динамического микрофона зависит от индукции в зазоре, от параметров звуковой катушки, диафрагмы и от частоты, поскольку $Z_м$ частотнозависимо.

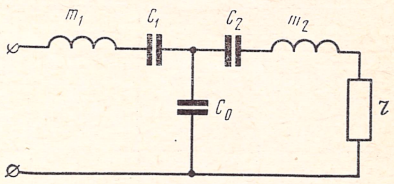


Рис. 3.5. Электрический аналог динамического микрофона

Для обеспечения частотнонезависимой чувствительности устройство микрофона должно быть таково, чтобы механическое сопротивление подвижной системы $Z_м$ было постоянным в достаточно широком диапазоне частот. Этого можно достигнуть применением сложной механико-акустической системы, идея и детали которой выясняются при рассмотрении электрического аналога микрофона (рис. 3.5).

Основными элементами системы являются: диафрагма (и связанная с ней катушка) с общей массой m_1, закрепленная гофрированным воротником с гибкостью C_1; воздушный объем под диафрагмой с гибкостью $C_0 = \frac{V_0}{\gamma p_0 S^2 d}$ (V_0 — объем полости между диафрагмой и керном); m_2 — масса воздуха в каналах; C_2 — гибкость воздушного объема внутри магнитной системы микрофона; r — потери в подвижной системе микрофона.

Внешний вид и диаграммы направленности микрофона МД-59 для разных частот показаны на рис. 3.6.

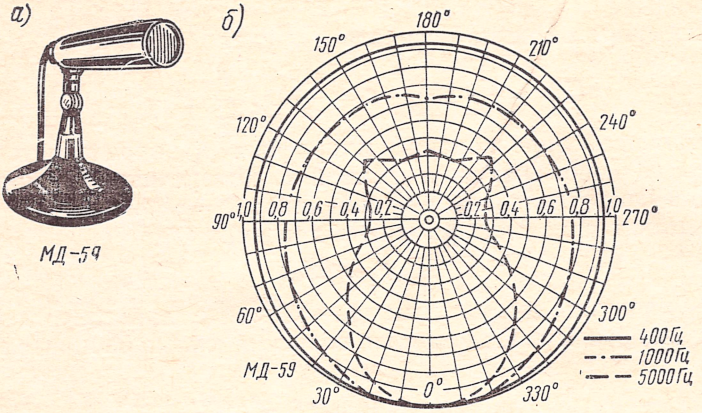


Рис. 3.6. Внешний вид и диаграмма направленности микрофона МД-59

Как видно из рисунка, на средних частотах 400÷1000 Гц микрофон не обладает направленностью, а на верхних частотах (5000 Гц) проявляются направленные свойства. Основные параметры некоторых динамических ненаправленных (НН) микрофонов приведены в табл. 3.3.

ТАБЛИЦА 3.3

Тип микрофона	Рабочий диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики ΔN, дБ	Номинальное сопротивление нагрузки $R_н$, Ом	Стандартный уровень осевой чувствительности N, дБ	Осевая чувствительность на f=1000 Гц при $R_{ном}$ E_0, $\frac{10^{-3}\ В}{Па}$	Основное назначение
МД-55	60÷8000	12	250	—72	1,25	речевой
МД-57	50÷13 000	10	250	—78	0,63	студийный универсальный
МД-59	50÷15 000	8	250	—78	0,63	»
МД-62	100÷10 000	12	250	—88	0,2	репортажный

Комбинированные динамические микрофоны. Динамические микрофоны могут иметь особую механико-акустическую систему и работать как комбинированные приемники звука. При этом они обладают направленными свойствами.

К однонаправленным (ОН) микрофонам относится микрофон типа МД-44, предназначенный для работы в помещениях с повы-

шенным уровнем шума или большим временем реверберации (гулкое помещение). Внешний вид его и диаграмма направленности даны на рис. 3.7. Конструкция микрофона МД-44 и приведенная

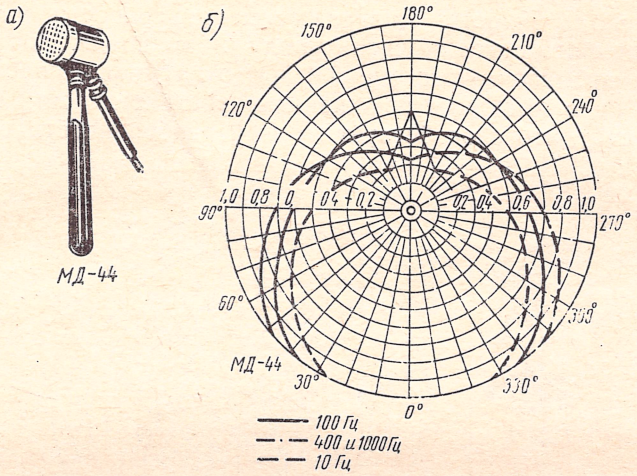


Рис. 3.7. Внешний вид и диаграмма направленности микрофона МД-44

схема электрического аналога механико-акустической системы изображены на рис. 3.8. Кольцевая щель (так называемый шлиц), через которую объем под диафрагмой сообщается с объемом внутри магнита, имеет параметры: массу m_2 воздуха и активное сопротивление r_2 воздушному потоку, обусловленное наличием вязкого трения при прохождении воздуха через узкий шлиц.

Для дополнительной коррекции частотной характеристики чувствительности микрофона используют сквозной канал в среднем стержне магнита, воздушный объем которого обладает массой m_3 и гибкостью C_3 и сопротивлением потерь r_3.

Таким образом, динамический микрофон при соответствующей конструкции может иметь хорошую частотную ха-

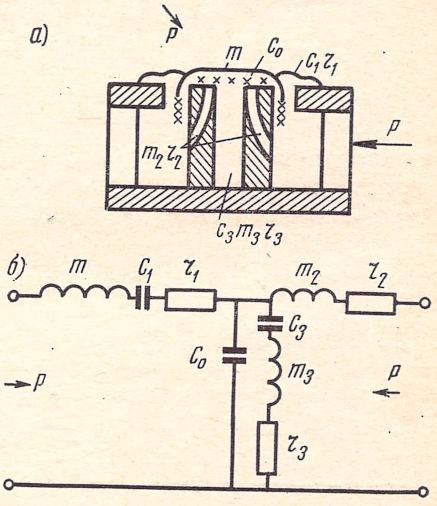


Рис. 3.8. Конструкция и электрический аналог микрофона МД-44

рактеристику и достаточно высокую чувствительность. Чувствительность динамических микрофонов из года в год увеличивают в связи с применением сильных магнитов, а габариты микрофона уменьшают. Последнее приводит к частотнонезависимой характеристике направленности его на всех частотах приближается по своему виду к кардиоиде. Номинальный частотный диапазон этого микрофона охватывает полосу частот 100÷8000 Гц с заметным понижением чувствительности в области низких частот, что способствует лучшей разборчивости речи.

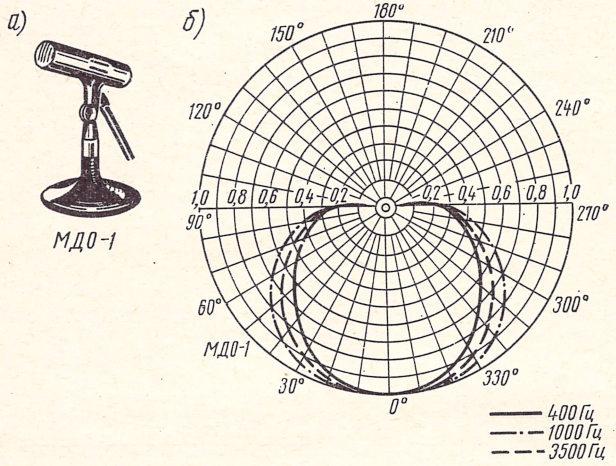


Рис. 3.9. Внешний вид и диаграмма направленности микрофона МДО-1

Объединенную конструкцию из двух микрофонов типа МД-44 представляет микрофон МДО-1, внешний вид и диаграмма направленности которого представлены на рис. 3.9. Конструктивно два микрофона разнесены, расстояние между диафрагмами, направленными соосно в одну сторону, 0,1 м. Из электрической схемы микрофона МДО-1 (рис. 3.10) видно, что микрофоны МД-44 соединены последовательно и противофазно. Один из микрофонов (задний) шунтирован конденсатором $C=0{,}5\cdot10^{-6}$ Ф, который как бы отключает его на высших частотах, когда диаграмма направленности одного микрофона МД-44 достаточно острая (одно-

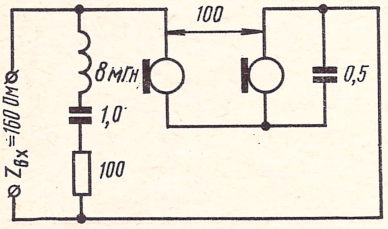


Рис. 3.10. Электрическая схема микрофона МДО-1

сторонний остронаправленный — ООН). Имеется фазокорректирующая цепочка L, C, R. Все детали находятся внутри корпуса микрофона. Основные параметры направленных микрофонов даны в табл. 3.4.

ТАБЛИЦА 3.4

Тип микрофона	Рабочий диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики ΔN, дБ	Номинальное сопротивление нагрузки $R_н$, Ом	Стандартный уровень осевой чувствительности, N, дБ	Осевая чувствительность на частоте 1000 Гц и при $R_{ном}$ E_0, $\frac{10^{-3}\text{В}}{\text{Па}}$	Направленность	Средняя чувствительность между фронтом и тылом, дБ	Основное назначение
МД-44	100÷8000	12	250	—78	0,03	ОН	10	речевой репортажн.
МД-49	100÷8000	10	250	—78	—	ОН	15	речевой
МД-64	100÷10 000	12	250; 3000; 5000; 500000	—74	1,2	ОН	12	бытовой
МД-69	50÷15 000	8	250	—73	1,1	ОН	14	студийный
МДО-I	150÷8000	15	250	—78	0,63	ООН	15	речевой
82А-II	100÷8000	15	250	—74	1,25	ОН	15	репортажный

§ 3.7. ЛЕНТОЧНЫЕ МИКРОФОНЫ

Ленточные микрофоны по своему внешнему виду, размерам, весу и конструкции значительно отличаются от динамических микрофонов, хотя принцип действия и тех и других один и тот же. Звукоприемником в ленточном микрофоне служит гофрированная ленточка *1* из очень тонкой алюминиевой фольги.

Эта ленточка располагается в верхней части микрофона в плоскости магнитной системы *2* (рис. 3.11). Она подключается к повышающему трансформатору, который служит для согласования электрического сопротивления ленточки с нагрузкой. Трансформатор располагается обычно в корпусе микрофона и представляет с ним единое целое.

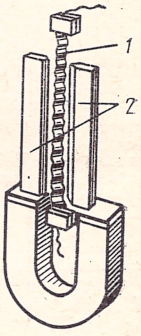


Рис. 3.11. Устройство ленточного микрофона

Ленточка колеблется под действием разности давлений. Колеблясь, ленточка пересекает линии магнитного поля и на ее зажимах индуктируется электродвижущая сила, изменение которой пропорционально изменению действующего звукового давления и амплитуде силы F_m. Для приемника градиента давления

$$F_m = pS\,\frac{\omega d}{c}\,\cos\theta.$$

Напряжение, развиваемое ленточкой на нагрузке, пропорционально движущей силе F_m, величине магнитной индукции в зазоре магнитной системы микрофона. Отсюда и чувствительность микрофона $E_0 = U/p$ зависит от индукции в зазоре магнитной системы, конструктивных данных ленточки, частоты и угла падения звуковой волны на микрофон.

При $\theta = 0$ или $\theta = 180°$, т. е. когда звуковая волна падает перпендикулярно на поверхность ленточки на одну или другую сторону ее, чувствительность ленточки достигает своего максимального значения $E = E_{макс} = E_0$, а при $\theta = 90°$ $E \to 0$.

Диаграмма направленности ленточного микрофона приемника градиента давления представляет собой восьмерку: $D(\theta) = E_0/E = \cos\theta$. Диаграмма направленности почти не зависит от частоты, потому что ширина ленточки совместно с полюсными наконечниками значительно меньше длины волны на всех частотах. Чувствительность микрофона порядка $0{,}8 \left(\frac{10^{-3}\ \text{В}}{\text{Па}}\right)$. Благодаря своим высоким качественным показателям ленточные микрофоны успешно применяются в студиях вещания и телевидения.

Ленточным микрофонам и вообще всем приемникам градиента давления свойственен так называемый эффект ближней зоны, связанный с возрастанием чувствительности на низких частотах при расположении микрофона вблизи исполнителя. Чтобы избежать подчеркивания низких частот, рекомендуется размещать исполнителей на расстоянии не менее 0,3—0,5 м от таких микрофонов и применять электрическую коррекцию в виде дросселя, шунтирующего первичную обмотку трансформатора, с которым работает микрофон.

Типы некоторых ленточных микрофонов (приемников градиента давления) и их основные параметры указаны в табл. 3.5. Лен-

ТАБЛИЦА 3.5

Тип микрофона	Рабочий диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики ΔN, дБ	Номинальное сопротивление нагрузки $R_н$, Ом	Стандартный уровень осевой чувствительности N, дБ	Чувствительность на частоте 1000 Гц при $R_{ном}$ E_0, $\frac{10^{-3}\ \text{В}}{\text{Па}}$	Направленность	Основное назначение
МЛ-15	50÷10 000	5	250	—76	0,8	ДН	студийный универсальный
МЛ-16	50÷15 000	10	250	—78	0,63	ДН	»
МЛ-18	100÷10 000	10	250	—78	0,63	ООН	для звукоусиления в шумном зале
МЛ-17	70÷10 000	12	250	—76	0,8	ООН	

точный микрофон может быть выполнен конструктивно так, что он будет работать как акустически-комбинированный. Например, ленточный микрофон типов МЛ-11М, МЛ-17. Внешний вид и диаграмма направленности микрофона МЛ-11А показаны на рис. 3.12.

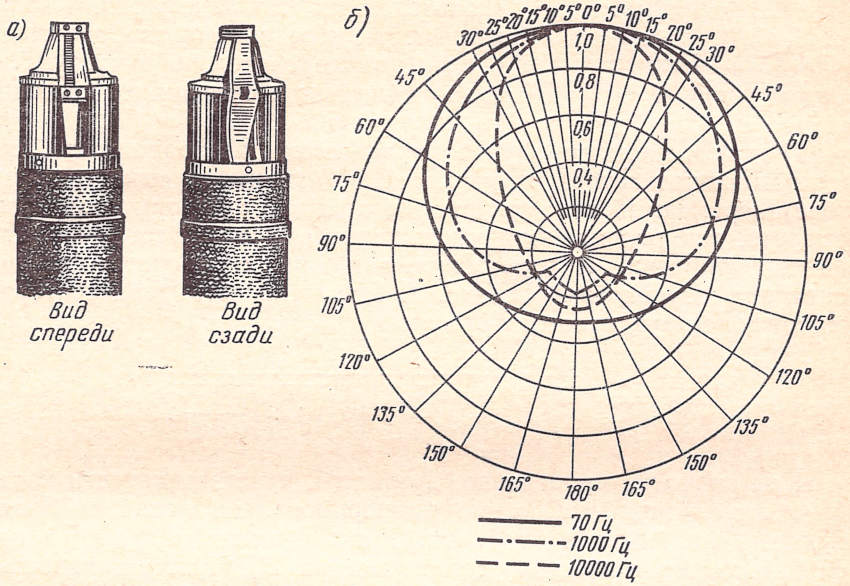


Рис. 3.12. Ленточный микрофон МЛ-11М:
а) вид со стороны ленты и со стороны лабиринта; *б)* характеристики направленности

В данном типе микрофона одна сторона ленточки плотно закрыта лабиринтом. В стенке лабиринта, которая примыкает к ленточке, имеется отверстие, благодаря которому на ленточку воздействует добавочное звуковое давление. Ленточные микрофоны сравнительно тяжелы и громоздки. Они в основном предназначаются для музыкальных передач из студий и других закрытых помещений. При внестудийных передачах их следует тщательно оберегать от воздействия ветра из-за возможности обрыва ленточки.

§ 3.8. КОНДЕНСАТОРНЫЕ МИКРОФОНЫ

Рассмотрим прежде конденсаторный микрофон как приемник давления (рис. 3.13). В этом случае он представляет собой плоский воздушный конденсатор. Одна из обкладок конденсатора является подвижной системой микрофона, воспринимающей звуковые колебания, и называется мембраной. Выполняется эта обкладка из очень тонкой ($10—30 \cdot 10^{-6}$) м металлической фольги, нержавеющей стали, дюралюминия, никеля или из еще более тонкой металлизированной с одной стороны полимерной пленки. Вторая неподвиж-

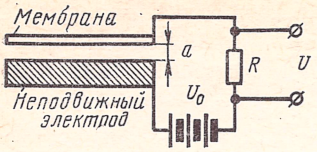


Рис. 3.13. Устройство конденсаторного микрофона

ная и довольно массивная обкладка расположена на расстоянии $20—40 \cdot 10^{-6}$ м от мембраны. Такой капсюль может быть небольшим по размерам, емкостью в несколько десятков пикофарад. Капсюль конденсаторного микрофона включается в схему последовательно с нагрузочным сопротивлением и источником постоянного напряжения.

Под воздействием звукового давления мембрана колеблется, емкость конденсатора меняется. При изменении емкости в цепи течет переменный ток: ток заряда конденсатора при возрастании емкости, ток разряда при уменьшении емкости. Этот ток создает на сопротивлении R переменное напряжение u, соответствующее значению звукового давления. Чувствительность конденсаторного микрофона определяется формулой

$$E_0 = \frac{U}{p} = \frac{U_0}{a} \frac{KS}{\omega Z_м} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega C R_н}\right)^2}}.$$

Как видно из приведенной формулы, чувствительность конденсаторного микрофона прямо пропорциональна величине поляризующего напряжения и обратно пропорциональна зазору конденсатора a и механическому сопротивлению $Z_м$. Чувствительность не будет зависеть от частоты, если $\omega C R_н \gg 1$ и $Z_м \approx \frac{1}{i \omega C_м}$. Первое условие выполнимо путем увеличения сопротивления нагрузки $R_н$ до нескольких десятков мегом, так как электрическая емкость C конденсаторного микрофона не более $100—150 \cdot 10^{-12}$ Ф. Второе условие выполнимо конструктивно. В связи с этим конденсаторный микрофон имеет широкий диапазон воспроизводимых частот и значительно меньшую неравномерность частотной характеристики по сравнению с другими типами микрофонов. Электрические данные некоторых типов ненаправленных микрофонов приведены в табл. 3.6.

ТАБЛИЦА 3.6

Тип микрофона	Рабочий диапазон частот Гц	ΔN дБ	N, дБ	$E_0 \left(\frac{10^{-3}\text{В}}{\text{Па}}\right)$	$R_н$ Ом	Вид характеристики направлен.	Габариты 10^{-3} м	Основное назначение
МК-5А	20÷20 000	4	—73	1,1	250	НН	⌀20×110	измерительный
МК-6	20÷4000	5	—74	—	250	НН	⌀15×95	»
МИК-6С	20÷15 000	5	—64	5	600	НН		»

Высокие качества конденсаторных микрофонов привели к тому, что они стали широко применяться для измерительных цепей.

На рис. 3.14 схематически изображено устройство конденсаторного микрофона типа 19А-1, который является акустически комбинированным приемником звука. Капсюль имеет две мембраны. Между двумя подвижными мембранами расположены неподвижный электрод с имеющимися в ней сквозными каналами, которые соединяют друг с другом воздушные объемы под мембранами. Включение микрофонного капсюля в электрическую схему показано на рис. 3.15.

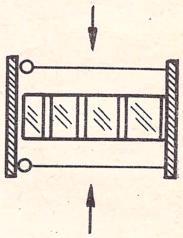


Рис. 3.14. Устройство капсюля комбинированного микрофона 19А-1

Каждая пара пластин подключается к усилительному каскаду на малошумящей лампе типа 6С6Б с пониженным микрофонным эффектом. Каждая сторона капсюля обладает однонаправленной диаграммой направленности и идентична другой стороне, а акустические оси их повернуты на 180°. Комбинирование напряжения, получаемого от каждой пары капсюля, и изменение на 180° фазы напряжений позволяют получить различный вид диаграммы направленности: круг, восьмерку, кардиоиду, суперкардиоиду и гипер-

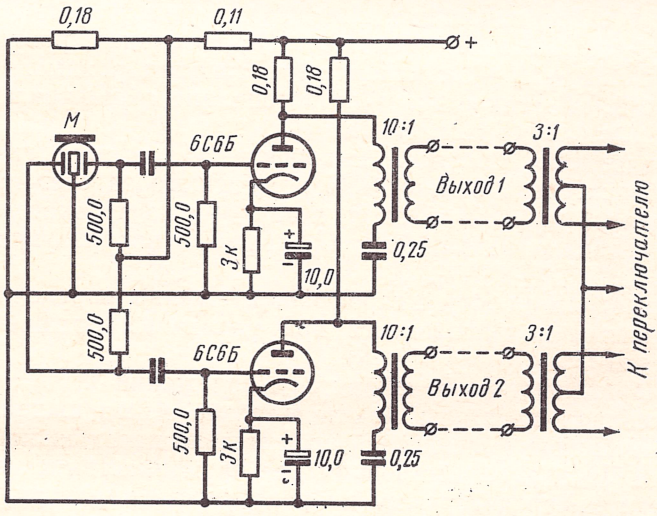


Рис. 3.15. Электрическая схема микрофона 19А-10

кардиоиду. Изменение диаграммы можно осуществить дистанционно — путем коммутации вторичных обмоток дополнительных выходных трансформаторов, находящихся у звукорежиссера (рис. 3.15). При этом характеристика направленности может быть: круг, кардиоида, восьмерка.

Схема другого микрофона КМ-55А показана на рис. 3.16. В зависимости от положения переключателя $П$ можно получить любую из трех видов диаграмм направленности (круг, кардиоида, восьмерка). Рассмотрим подробнее принцип действия микрофона. Как видно из схемы, изображенной на рис. 3.16, одна подвижная

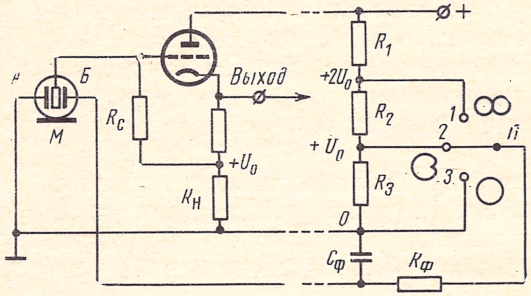


Рис. 3.16. Электрическая схема микрофона КМ-55А с регулируемой характеристикой направленности

мембрана микрофонного капсюля заземлена, т. е. имеет потенциал земли, другая подсоединена к переключателю $П$ и в зависимости от того, в каком положении находится переключатель $П$, приобретает потенциал земли — положение *3*; потенциал, равный некоторой величине $+U_0$ — положение *2*; потенциал, равный $+2U_0$ — положение *1*. Указанное значение потенциала обеспечивается подбором сопротивлений делителя $R_1R_2R_3$.

Неподвижная пластина микрофонного капсюля имеет потенциал относительно земли $+U_0$, полученного за счет падения напряжения на сопротивлении $R_н$ в катоде усилительной лампы. Как видно, величина напряжения U_0 является поляризующим напряжением.

Рассмотрим работу микрофона, а именно определим вид характеристики направленности при различных положениях переключателя $П$:

1. Переключатель $П$ находится в положении *3*.

Потенциал пластины А относительно неподвижной пластины $+U_0$. Потенциал пластины Б относительно неподвижной пластины также $+U_0$, т. е. задействованы две пары пластин капсюля. Каждая пара имеет диаграмму направленности кардиоиду, но у них противоположные акустические оси, т. е. каждая пара пластин (1,2) имеет противоположное направление максимальной чувствительности.

Запишем:

$$E_1 = E_{01}(1 + \cos\theta) \text{ и } D_1(\theta) = (1 + \cos\theta);$$
$$E_2 = E_{02}(1 - \cos\theta) \text{ и } D_2(\theta) = (1 - \cos\theta).$$

Чувствительность всего микрофона определяется суммой чувствительностей отдельных пар пластин:

$$E = E_1 + E_2 = E_{01}(1 + \cos\theta) + E_{02}(1 - \cos\theta) \text{ и при } E_{01} = E_{02} =$$

$$= \frac{1}{2} E_0 \qquad E = E_0.$$

Следовательно, диаграмма направленности микрофона $D(\theta) = E/E_0 = 1$, т. е. диаграмма направленности имеет форму круга.

2. Переключатель *П* находится в положении *2*.

Потенциал пластины А относительно неподвижной пластины $+U_0$. Потенциал пластины Б относительно земли $+U_0$, неподвижная пластина имеет тоже потенциал $+U_0$ относительно земли, поэтому потенциал пластины Б относительно неподвижной пластины равен нулю. А это означает, что пластина Б не работает, так как ее потенциал равен потенциалу неподвижной пластины. Значит, в работе участвует только пластина А и неподвижный электрод и диаграмма направленности микрофона имеют вид кардиоиды:

$$D(\theta) = 1 + \cos\theta.$$

3. Переключатель *П* находится в положении *1*.

Потенциал пластины А относительно неподвижной пластины $+U_0$. Потенциал пластины Б относительно земли $+U_0$, а относительно неподвижной пластины $-U_0$, т. е. работают две пары пластин микрофона. Поляризующее напряжение U_0 каждой пары по

ТАБЛИЦА 3.7

Тип микрофона	Рабочий диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Стандартн. уровень осевой чувствительности, дБ	Сопротивление нагрузки $R_н$, Ом	Вид характеристики направленности	Чувствительность на частоте 1000 Гц и при $R_н$ E_0, $\frac{10^{-3}\text{В}}{\text{Па}}$	Габариты 10^{-6}м	Средняя чувствительность между фронтом и тылом, дБ	Основное назначение
19А-4	50÷12 000	10	—58	250	НН, ОН	6	31× ×135	10— —20	студийный
19А-9	40÷15 000	10	—66	32±10	ОН	2,5	40× ×50× ×200	10	»
19А-10	40÷15 000	7	—66	250	8 видов	2,5	42× ×140	15	»
19А-13	30÷15 000	6	—52	250	ОН	1,5	32× ×50× ×116	8	»
19А-19	40÷16 000	8	—50	250	ОН	16	⌀40+ +150		»

величине равно, но противоположно по знаку. Поэтому чувствительность микрофона равна разности чувствительности микрофонов с одной парой пластин:

$$E = E_1 - E_2 = E_{01}(1 + \cos\theta) - E_{02}(1 - \cos\theta)$$

и при $E_{01} = E_{02} = \frac{1}{2} E_0$

$$E = E_0 \cos\theta.$$

Диаграмма направленности микрофона имеет вид $D(\theta) = E_0/E = \cos\theta$, т. е. восьмерки. Электрические данные комбинированных конденсаторных микрофонов приведены в табл. 3.7.

§ 3.9. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ, ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И УГОЛЬНЫХ МИКРОФОНАХ

Электромагнитные микрофоны. Принцип действия электромагнитного микрофона состоит в том, что колеблющиеся от звуковых волн диафрагма или якорь из мягкого магнитного материала изменяют магнитное поле постоянного магнита. В катушках, намотанных на полюсные наконечники и расположенных в том же магнитном поле, возникает эдс, соответствующая звуковым колебаниям, воздействующим на диафрагму.

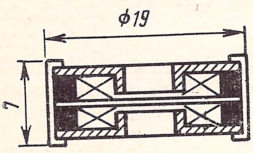


Рис. 3.17. Устройство электромагнитного микрофона ДЭМШ-1

Широкое распространение получил дифференциальный электромагнитный микрофон ДЭМШ-1, устройство которого схематично показано на рис. 3.17.

ДЭМШ-1 является приемником градиента давления и при надлежащем его расположении около рта говорящего (микрофон должен почти вплотную прилегать ребром к углу рта) наиболее нечувствителен к воздействию внешних шумов, повышая тем самым эффективность работы микрофона в шумных условиях.

Пьезоэлектрические микрофоны. Для преобразования звуковых колебаний в электрические используется также пьезоэлектрический эффект, состоящий в том, что при деформации некоторых кристаллов на их поверхности возникают электрические заряды, величина которых пропорциональна деформирующей силе.

Пьезоэффектом обладают кристаллы сегнетовой соли, дигидратфосфат аммония, керамика и т. д.

Вырезанные особым образом пластинки из искусственно выращенных кристаллов и служат основным рабочим элементом пьезомикрофонов.

По своим электроакустическим и эксплуатационным свойствам пьезомикрофоны пока не удовлетворяют требованиям, предъявляе-

мым к профессиональным микрофонам. Однако такие их достоинства, как простота устройства, малый вес и габариты, относительно высокая чувствительность, а также небольшая стоимость, определили их применение в любительских устройствах и некоторых типах промышленной аппаратуры.

К недостаткам пьезомикрофонов следует отнести высокое внутреннее сопротивление, имеющее емкостный характер, значительную неравномерность частотной характеристики, недостаточную эксплуатационную надежность, зависимость параметров от температуры и сравнительно низкую предельную температуру (40°С). Пьезомикрофоны имеют среднюю чувствительность от 50÷60 до 80÷100 $\left(\frac{10^{-3}\ \text{В}}{\text{Па}}\right)$ со значительным подъемом в области 2÷4 кГц, где чувствительность доходит до 200 [10^{-3} В/Па], а в некоторых экземплярах и еще больше.

По форме частотной характеристики и значению чувствительности разные экземпляры пьезомикрофонов имеют значительный разброс. Чтобы низшие частоты не были слишком ослаблены, пьезомикрофоны должны включаться на нагрузку не менее $(3—5)\cdot 10^6$ Ом и размещаться в непосредственной близости к входному каскаду усилителя.

Угольные микрофоны. Угольный микрофон является своеобразным переменным сопротивлением. Действие угольного микрофона основано на свойстве угольного порошка изменять свое сопротивление в зависимости от силы сжатия зерен порошка.

Угольный микрофон включается в цепь постоянного тока. При воздействии звукового давления диафрагма давит на угольный порошок, изменяется сопротивление микрофона, а следовательно, и ток, текущий в электрической цепи микрофона, и на нагрузке его выделяется напряжение, изменяющееся в такт изменению звукового давления.

Микрофон типа МК-10 имеет штампованный металлический корпус, в котором укреплен латунный электрод в виде диска наружной поверхностью, покрытой тонким слоем палладия. Неподвижный электрод при помощи изоляционной втулки и двух шайб электрически изолирован от корпуса, на дно которого засыпается угольный порошок, сплошь покрывающий этот электрод. Подвижный электрод, выполненный из тонкой латуни в виде чашечки, также покрытый снаружи палладием, прикреплен к легкой металлической фигурной диафрагме, которая при помощи кольца крепится на краю корпуса. Чашечка погружается в угольный порошок. Между диафрагмой и угольным порошком имеется тонкая шайба из эластичной пленки, прикрепленная сверху к подвижному электроду; она фиксирует порошок в корпусе. Корпус закрыт крышкой, завальцованной в край. В крышке имеется кольцевое отверстие для звуковых колебаний, а сверху укреплен фигурный защитный диск.

Чувствительность угольных микрофонов особенно велика в области средних частот от 1 до 3÷4 кГц, что способствует достижению лучшей разборчивости речи. Для МК-10 чувствительность на частоте 2 кГц равна 1000 $\left(\frac{10^{-3}\,\text{В}}{\text{Па}}\right)$, рабочий диапазон частот 300÷÷3000 Гц. Чувствительность микрофона МК-59 100÷200 $\left(\frac{10^{-3}\,\text{В}}{\text{Па}}\right)$.

§ 3.10. НОВЫЕ ТИПЫ МИКРОФОНОВ: РАДИОМИКРОФОН, СТЕРЕОФОНИЧЕСКИЙ, ТРАНЗИСТОРНЫЙ

Радиомикрофон. Это малогабаритное устройство, состоящее из микрофона (электромагнитного или динамического), усилителя и маломощного радиопередатчика. Радиомикрофон предназначен для осуществления односторонней радиосвязи. Передатчик мощностью $(30—150)\cdot 10^{-6}$ Вт выполнен на транзисторах. Он состоит из собственно микрофона, двухкаскадного усилителя звуковой частоты задающего генератора с модуляционным устройством выходного каскада, штыревой антенны, устройства для стабилизации напряжения питания и батареи питания. Радиомикрофон работает в специально выделенном диапазоне $(57{,}5÷58{,}5)\cdot 10^{+6}$ Гц. Дальность действия 50—500 м. Приемник радиомикрофона выполнен на миниатюрных лампах или транзисторах. Приемник содержит усилитель высокой частоты, гетеродин-преобразователь, два каскада усиления промежуточной частоты и частотный детектор.

Радиомикрофон применяется для звукоусиления, репортажа, перевода речей, а также в условиях открытой площади, большой сцены или лекционного зала, когда артист или диктор не может находиться достаточно близко от обычного микрофона.

Применение радиомикрофонов целесообразно для передачи различных сообщений и команд в движении или с разных мест, когда невозможно или крайне затруднительно присоединить микрофон непосредственно к звукоусилительному или передающему тракту. В радиомикрофонах используются микрофоны типа МД-54Р, 82А-13, МД-48.

Стереофонический микрофон. В стереофоническом радиовещании и стереофонической звукозаписи на грампластинку или магнитную пленку используется двухканальная система приема и передачи сигналов.

Поскольку стереофония предполагает не менее двух каналов передачи, то каждый канал при записи или звукоусилении требует, по крайней мере, двух микрофонов. Каждый микрофон должен иметь диаграмму направленности, обеспечивающую прием сигнала в строго определенной зоне. В настоящее время комбинируют микрофоны с различными диаграммами направленности, например, микрофон с $D(\theta)=1$ и микрофон с $D(\theta)=\cos\theta$ или два микрофона с $D(\theta)=1+\cos\theta$ и углом между их акустическими осями 45°. Два микрофона часто объединяются в одну конструкцию. Рассмотрим

принцип действия стереомикрофона, имеющего в своей конструкции два микрофона с характеристиками направленности круг и восьмерка. На рис. 3.18, кроме диаграмм направленности, дан график изменения напряжения в каналах при перемещении источника звука. Как видно при движении источника звука, напряжения в каналах перераспределяются.

Транзисторный микрофон. Транзисторный микрофон состоит из плоскостного транзистора и диафрагмы, механически связанной сапфировой иглой с эмиттером транзистора. Звуковые волны, падающие на диафрагму, приводят ее в колебание, которое, передаваясь через иглу эмиттеру, создает переменное давление на него и изменяет сопротивление эмиттерного перехода в транзисторе, а следовательно, и тока через него. Таким путем звуковое давление преобразуется в электрическое напряжение на нагрузке транзистора.

Изменение сопротивления эмиттерного перехода аналогично действию сигнала в цепи эмиттер-база в транзисторном усилителе. Вследствие этого транзисторный микрофон, помимо преобразования звукового давления в электрическое напряжение, усиливает еще и величину последнего.

Транзисторные микрофоны потребляют ток в 20—100 раз меньше, чем угольные микрофоны, чувствительность их в 4 раза выше угольного. Отношение сигнал/шум равно 54 дБ; нелинейные искажения меньше 3% на частоте 1000 Гц при звуковом давлении 0,3 Па.

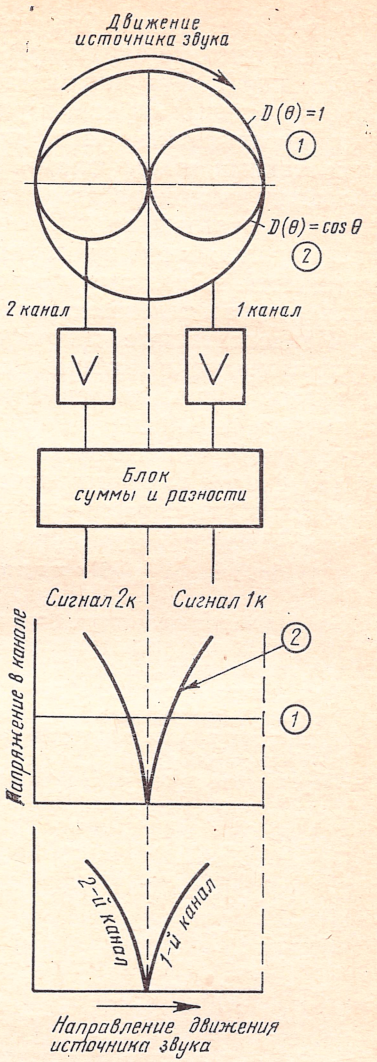


Рис. 3.18. К пояснению принципа действия стереофонического микрофона

§ 3.11. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МИКРОФОНОВ

Рассмотрев основные типы микрофонов, познакомившись с их устройством и параметрами, можно отметить, что наиболее удоб-

ные в эксплуатации, имеющие стабильные характеристики и достаточно высокие параметры, — это электродинамические микрофоны типа МД. Они широко используются в радиовещании при работе из речевых студий, в различных системах звукоусиления. Радиотрансляционные узлы для ведения местных передач снабжаются такими микрофонами. Ленточные микрофоны хотя и имеют бóльшую равномерность частотной характеристики по сравнению с микрофонами типа МД, однако применение их ограничено из-за конструкции: они не терпят механических сотрясений, большой влажности и поэтому применяются только в радиовещательных концертных и телевизионных студиях.

Конденсаторные микрофоны являются высококачественными микрофонами, имеющими высокую чувствительность и широкий диапазон воспроизведения частот с малой неравномерностью. Они относятся к высшему классу качества. Поэтому конденсаторные микрофоны используются в основном для измерительных целей и для систем высшего качества, тем более, что количество выпускаемых конденсаторных микрофонов невелико.

Контрольные вопросы

1. Какими основными параметрами характеризуется работа микрофона?
2. Объясните принцип действия микрофонов: приемников давления и приемников градиента давления.
3. Расскажите о принципе действия электродинамического, ленточного, конденсаторного микрофонов.
4. Какие диаграммы направленности можно получить с помощью комбинированных микрофонов?
5. Перечислите типы микрофонов и дайте их краткую характеристику.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

§ 4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

В тракте вещания громкоговоритель является завершающим звеном и предназначен для громкого воспроизведения речи и музыки.

Громкоговоритель состоит из электрической цепи, питаемой переменным током звуковой частоты, и механического колебательного устройства, создающего звуковые волны. Процессы, происходящие в электрической системе громкоговорителя, вызывают силы, приводящие его в колебательное движение. Благодаря такой электромеханической связи происходит преобразование электрических колебаний, отображающих передаваемый звуковой процесс, в механические колебания устройства, создающего акустические колебания.

Громкоговорители классифицируют по способу преобразования энергии, излучения звуковой энергии, по классу качества и номинальной мощности. По способу преобразования различают электромагнитные, электродинамические и электростатические (конденсаторные) громкоговорители. По способу излучения звуковых колебаний громкоговорители разделяются на две основные группы: громкоговорители прямого излучения и рупорные громкоговорители. Громкоговорители прямого излучения имеют диффузоры, излучающие звук непосредственно в окружающую воздушную среду; диффузоры или диафрагмы рупорных громкоговорителей излучают звуковые колебания. Последние излучаются рупорами различных форм.

Основными параметрами, характеризующими работу громкоговорителя, являются: номинальная электрическая мощность, среднее стандартное звуковое давление, рабочий диапазон частот и неравномерность частотной характеристики в этом диапазоне, диаграмма направленности, величина нелинейных искажений, входное сопротивление громкоговорителя.

Номинальной электрической мощностью ($P_{эл.\,ном}$) громкоговорителя называется наибольшая мощность, при подведении которой сохраняется механическая и электрическая прочность громкоговорителя; величина нелинейных искажений соответствует нормам. Подведение к громкоговорителю номинальной мощности в течение длительного времени не должно вызывать никаких повреждений в нем. Повреждение громкоговорителя может произойти, во-первых, вследствие относительно больших механических

усилий, возникающих при работе громкоговорителя, и, во-вторых, из-за перегрева звуковой катушки при прохождении электрического тока. Поэтому громкоговоритель обычно испытывается при номинальной мощности в течение не менее получаса, после чего проверяется способность его к воспроизведению чистого тона. Громкоговоритель должен обладать способностью в течение короткого времени выдерживать значительное увеличение мощности, обладать так называемой пиковой мощностью, которая в два—четыре раза больше номинальной.

Среднее стандартное звуковое давление (p_c) есть эффективное значение звукового давления, создаваемого громкоговорителем в точке, лежащей на акустической оси на расстоянии 1 м от громкоговорителя, при подведении к его зажимам электрической мощности 0,1 Вт при частоте 1000 Гц.

Рабочий диапазон частот определяется теми звуковыми давлениями, которые создает громкоговоритель на различных частотах с допустимым отклонением их величин. Зависимость звукового давления от частоты есть частотная характеристика громкоговорителя. Она может быть представлена графиком или таблицей. Частотная характеристика громкоговорителя показана на рис. 4.1. Неравномерность ΔN частотной характеристики представ-

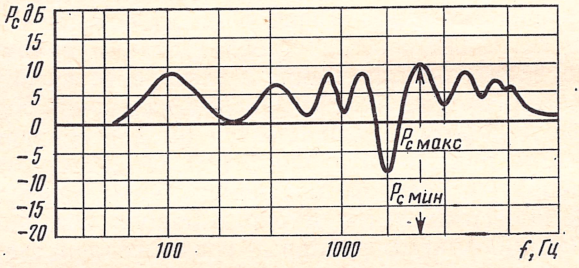


Рис. 4.1. Частотная характеристика громкоговорителя

ляет собой отношение максимального стандартного звукового давления к минимальному и выражается в децибелах:

$$\Delta N = 20 \lg p_{c\,макс}/p_{c\,мин}.$$

Диаграммой направленности $D(\theta)$ громкоговорителя называется зависимость создаваемого им звукового давления в различных равноудаленных точках пространства по отношению к звуковому давлению на акустической оси $D(\theta) = p_\theta/p_0$, где p_θ — звуковое давление в данной точке пространства; p_0 — звуковое давление в точке на акустической оси.

Акустическая ось — это направление, по которому громкоговоритель создает максимальное звуковое давление. Обычно акусти-

ческая ось совпадает с геометрической осью, обусловленной конструкцией громкоговорителя.

Направленные свойства громкоговорителя характеризуются количественно коэффициентом осевой концентрации (Ω), показывающим, во сколько раз интенсивность звука на оси громкоговорителя, обладающего направленными свойствами, больше интенсивности звука, создаваемой ненаправленным громкоговорителем на том же расстоянии от акустического центра при одинаковой излучаемой мощности.

Нелинейные искажения громкоговорителя оцениваются выражением

$$\kappa_f = \frac{\sqrt{p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \ldots + p_n^2}}{p_1},$$

где p_2, p_3, p_n — звуковое давление гармоник; p_1 — звуковое давление основного тона, получаемого громкоговорителем.

Входным сопротивлением или полным электрическим сопротивлением $Z_{вх}$ называется сопротивление переменному току между входными зажимами громкоговорителя. Входное сопротивление громкоговорителя зависит от частоты. В паспорте громкоговорителя обычно указывается входное сопротивление на частоте 1000 Гц.

§ 4.2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ ПРЯМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Принцип действия. Электродинамический громкоговоритель прямого излучения представляет собой электроакустический преобразователь, предназначенный для непосредственного излучения звука в воздушное пространство. Он состоит из диффузора и звуковой катушки, помещенной в постоянное магнитное поле. Сила, вызывающая в электродинамических громкоговорителях колебательные движения диффузора, обязана своим возникновением взаимодействию постоянного магнитного поля и электрического тока, проходящего через звуковую катушку, жестко скрепленную с диффузором.

Направление этой силы, называемой электродинамической, определяется по хорошо известному из электротехники правилу левой руки. Очевидно, что при прохождении через звуковую катушку переменного тока звуковой частоты направление и величина силы, действующей на звуковую катушку, будут изменяться в полном соответствии с изменением направления силы тока. Величина электродинамической силы легко может быть определена по известной формуле:

$$F = BlI, \text{ Н},$$

где B — индукция в зазоре магнитной цепи; l — длина проводника звуковой катушки, м; I — сила тока, А.

На рис. 4.2 показано устройство электродинамического громкоговорителя прямого излучения. Магнитная система громкоговорителя состоит из нижнего фланца *1* с запрессованным в него керном *2* и верхнего фланца с отверстием в центре. Воздушный зазор *3* магнитной цепи имеет кольцевую форму и образуется между керном и верхним фланцем.

Магнитное поле создается постоянным магнитом *5*, имеющим наиболее распространенную форму цилиндрического стакана. К верхнему фланцу крепится диффузородержатель *6*, при помощи которого фиксируется положение подвижной системы диффузора *7*, жестко связанного со звуковой катушкой *8* и центрирующей шайбой *9*. Внешний вид электродинамического громкоговорителя показан на рис. 4.3.

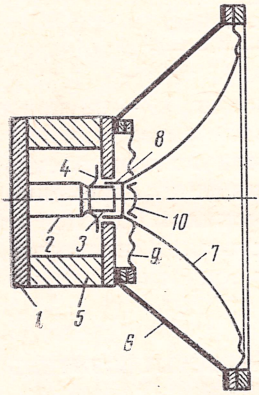


Рис. 4.2. Разрез диффузорного электродинамического громкоговорителя

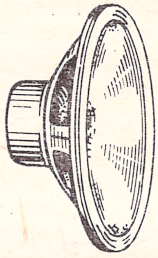


Рис. 4.3. Внешний вид электродинамического громкоговорителя

Эквивалентная схема и входное сопротивление. Электродинамический громкоговоритель прямого излучения можно представить в форме его электрического эквивалента, состоящего из последовательно соединенных двух сопротивлений (рис. 4.4) электрического сопротивления звуковой катушки $Z = R + i\omega L$ (где R — активное сопротивление звуковой катушки; L — ее индуктивность) и вне-сенного механического сопротивления $Z_к = \frac{(Bl)^2}{Z_м}$, где B — индукция в зазоре магнитной цепи; $Z_м$ — механическое сопротивление подвижной системы; l — длина проводника звуковой катушки.

Механическое сопротивление подвижной системы можно представить как

$$Z_м = r + i\omega m + \frac{1}{i\omega C},$$

где m — масса подвижной системы громкоговорителя (диффузора, звуковой катушки); C — гибкость подвеса, зависящая от упругих

свойств центрирующей шайбы и системы подвеса; r — активное сопротивление излучения диффузора подвижной системы, включая сопротивление излучения.

Для анализа внесенное механическое сопротивление $Z_к$ удобнее представить в виде внесенной проводимости:

$$Y_к = \frac{1}{Z_к} = \frac{r + i\omega m + \frac{1}{i\omega c}}{(Bl)^2} = \frac{1}{R^1} + i\omega C' + \frac{1}{i\omega L'},$$

где

$$R' = \frac{(Bl)^2}{r}; \; C' = \frac{m}{(Bl)^2}; \; L' = (Bl)^2 C.$$

Тогда эквивалентная схема примет вид рис. 4.5. Входное сопротивление громкоговорителя, как видно из эквивалентной его схе-

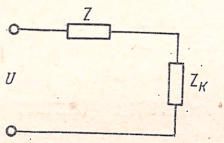


Рис. 4.4. Эквивалентная схема громкоговорителя

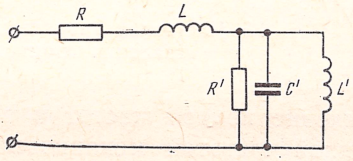


Рис. 4.5. Схема электрического эквивалента входного сопротивления

мы, зависит от частоты. Рассмотрим эту зависимость. При $f_0 = 0$, т. е. при постоянном токе, входное сопротивление определяется омическим сопротивлением звуковой катушки R; с увеличением частоты оно возрастает и достигает максимума на частоте механического резонанса подвижной системы ω_0, т. е. когда инерционное сопротивление равно сопротивлению гибкости подвесов:

$$2\pi f_0 m = \frac{1}{2\pi f_0 C}.$$

Минимальное значение входного сопротивления наблюдается при частоте ω_2, где реактивная часть сопротивления равна нулю, активная же — незначительно отличается от омического сопротивления R. Частоту ω_2 называют частотой электромеханического резонанса. На более высоких частотах сопротивление увеличивается, приближаясь к индуктивному сопротивлению звуковой катушки.

Зависимость входного сопротивления электродинамического диффузорного громкоговорителя от частоты показана на рис. 4.6.

Теоретические расчеты и опыт показывают, что электродинамический громкоговоритель будет эффективно воспроизводить низкие частоты только в том случае, если его собственная частота лежит ниже самой низкой частоты рабочей полосы частот.

Частотная характеристика электродинамического громкоговорителя. Как видно из реальной частотной характеристики электро-

динамического громкоговорителя (см. рис. 4.1), ей присущи два вида искажений: ограничение полосы частот; пики и провалы внутри воспроизводимого диапазона частот.

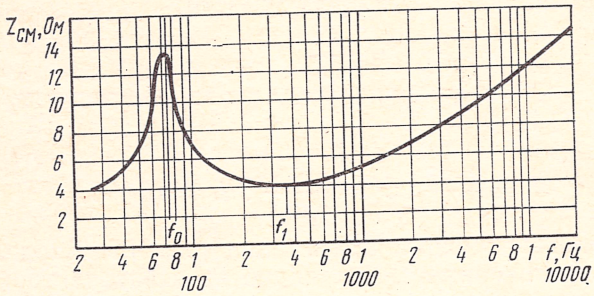


Рис. 4.6. Частотная характеристика входного сопротивления громкоговорителя

Ограничение полосы частот в области низких частот связано с собственной частотой механического резонанса громкоговорителя. Для понижения собственной частоты механического резонанса возможны два пути: увеличение массы системы и уменьшение упругости подвеса. Однако увеличивать массу и уменьшать упругость подвеса можно только до определенных пределов. Чрезмерное уменьшение упругости приводит к снижению надежности закрепления и трудно выполнимо на практике. Увеличение массы системы (обычно за счет увеличения поверхности диффузора) улучшает частотную характеристику в области самых низких частот, но в то же время ухудшает ее в области средних и высоких частот. Кроме того, важной причиной, вызывающей снижение отдачи в области низких частот, является сложение волн, излучаемых передней и задней сторонами диффузора, если ящик, в который помещен громкоговоритель, открыт. Если в какой-то момент диффузор создает впереди себя сжатие, то у тыльной стороны диффузора возникает разряжение, и наоборот. Если длина излучаемой волны больше размеров излучателя, то такая волна может обогнуть излучатель и встретиться с волной, идущей от его противоположной стороны. В результате сложения этих волн, имеющих противоположные фазы, может произойти ослабление или полное уничтожение колебаний.

Пики и провалы внутри воспроизводимого диапазона частот, имеющие достаточно большую величину (до 12÷15 дБ), обусловлены возникновением стоячих волн на поверхности диффузора. Различный характер колебаний отдельных участков диффузора показан на рис. 4.7. Уменьшение частотных искажений, расширение полосы воспроизведения достигается ценой усложнения и удорожания конструкции громкоговорителя.

Основными причинами возникновения нелинейных искажений в громкоговорителях являются:

1. Нарушение линейной зависимости между амплитудой колебания диффузора и механической силой. Это происходит при подведении к громкоговорителю мощности, близкой к номинальной или больше ее.

2. Неравномерность магнитного поля в зазоре. В пределах средней части зазора индукция имеет постоянную величину, а за его пределами она постепенно уменьшается (рис. 4.8). При этом средняя индукция магнитного поля, в котором

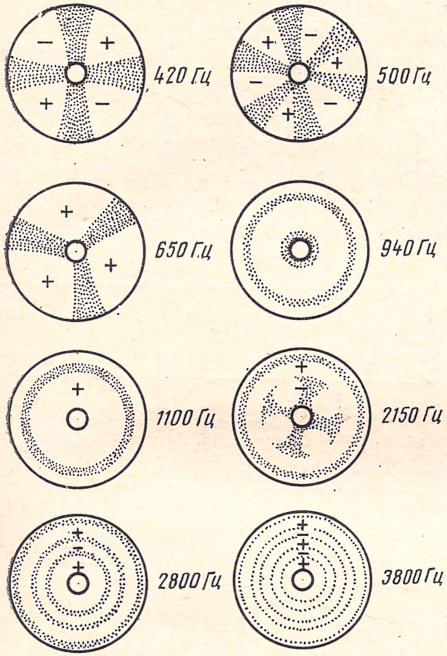


Рис. 4.7. Характер колебаний участков диффузора

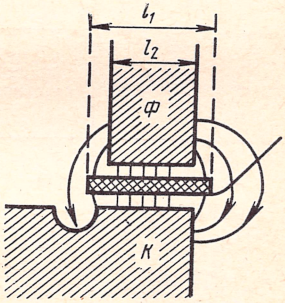


Рис. 4.8. Неоднородное распределение магнитного поля в зазоре громкоговорителя

перемещается звуковая катушка, изменяется. Это изменение нежелательно. Для устранения его длина намотки звуковой катушки делается больше глубины зазора.

3. Параметрические колебания диффузора. При движении звуковой катушки вправо (рис. 4.9) стенки диффузора изгибаются, принимая положение *а*. При движении катушки влево стенки претерпевают растяжения, а при последующем движении катушки вправо — изгибаются, принимая положение *б*. Таким образом, стенки диффузора совершают колебание с частотой в два раза меньше частоты питающего катушку тока. Эти искажения могут быть устранены применением диффузора с криволинейной образующей.

Громкоговорителям придают условные обозначения, состоящие из цифр и букв. Согласно ГОСТ 9010—59 первая цифра обозначает номинальную мощность громкоговорителя в ваттах; первая

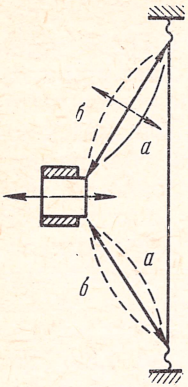


Рис. 4.9. Параметрические колебания диффузора

буква Г означает «громкоговоритель», вторая — Д — тип громкоговорителя «динамический» и последняя цифра — номер разработки. Например, обозначение громкоговорителя 10ГД5 расшифровывается так: «громкоговоритель 10-ваттный, динамический, пятой разработки».

В настоящее время нашей промышленностью выпускается большой ассортимент диффузорных громкоговорителей различной мощности в пределах от 0,1 до 10 Вт и имеющих различные качественные показатели. В табл. 4.1 приведены основные параметры громкоговорителей электродинамического типа прямого излучения, относящихся к различным классам качества.

ТАБЛИЦА 4.1

Тип громкоговорителя	Класс качества	Номинальная мощность, Вт	Рабочий диапазон частот Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Резон. частота, Гц	Среднее станд. звуковое давление, Па
4ГД-1,2	1	4	60÷12 000	14	60	0,25
4ГД-7	1	4	60÷12 000	15	60	0,25
5ГД-1	1	5	80÷10 000	15	65	0,4
1ГД-18	2	1	100÷10 000	15	100	0,23
0,5ГД-10, 11, 12	3	0,5	150÷7000	14	150	0,23; 0,23—0,3
1ГД-11	3	1	150÷7000	15	120	0,2
1ГД-5	3	1	150÷600	15	120	0,2
0,5ГД-14	4	0,5	250÷3500	15	200	0,23
0,1ГД-3	4	0,1	400÷3000	16	500	0,13
0,25ГД-1,2	4	0,25	300÷3000	18	300	0,2

§ 4.3. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗВУЧАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ ПРЯМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Полоса частот, воспроизводимая электродинамическим громкоговорителем прямого излучения, составляет примерно от 80÷÷100 Гц до 6÷7 кГц с довольно большой неравномерностью порядка 10—14 дБ.

В целях расширения этой полосы в сторону низких и высоких частот, а также уменьшения неравномерности применяются раз-

личные меры, улучшающие качественные показатели громкоговорителя, совершенствование способов его акустического оформления и некоторое усложнение его конструкции.

Существует два основных способа такого оформления: либо громкоговоритель укрепляется в отверстии плоского экрана или в передней стенке ящика, открытого сзади (рис. 4.10), либо в отверстии полностью закрытого ящика, внутри которого помещается

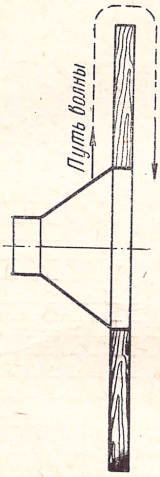


Рис. 4.10. Громкоговоритель в щите

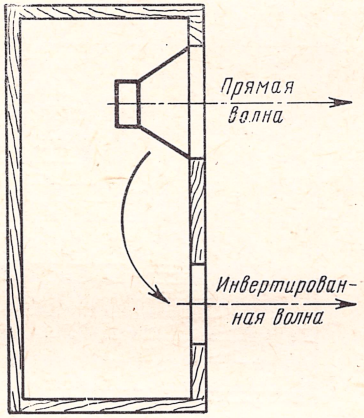


Рис. 4.11. Фазоинвертор

звукопоглощающий материал для подавления собственных колебаний воздушного объема. В первом случае громкоговоритель работает как двусторонний поршень, причем звуковые волны, огибающие экран, значительно ослабляют одна другую при наложении. При достижении частоты $f \approx 170/d$, Гц (для воздуха), где d — размер экрана, м, интерференция переднего и обратного излучения не играет заметной роли и громкоговоритель излучает бо́льшую мощность. На частотах выше $f \approx \frac{8 \cdot 10^5}{R}$, где R — радиус основания конуса, диффузор перестает работать как поршень, и излучаемая мощность при этом резко падает. В закрытом ящике конусный гормкоговоритель работает как односторонний поршень в области низких частот, и явление интерференции на его работе не сказывается.

Для устранения вредного влияния излучения оборотной стороны диффузора и использования энергии этого излучения применяется ящик специальной конструкции, называемый фазоинвертором. Фазоинвертор имеет дополнительное отверстие (см. рис. 4.11), которое является вторым излучателем.

Расчет объема ящика и площади отверстия в нем в зависимости от частоты его резонанса и при учете соотношения сторон отверстия для определенной толщины материала, из которого выполнен ящик, возможен по номограмме (рис. 4.12). Пусть диффу-

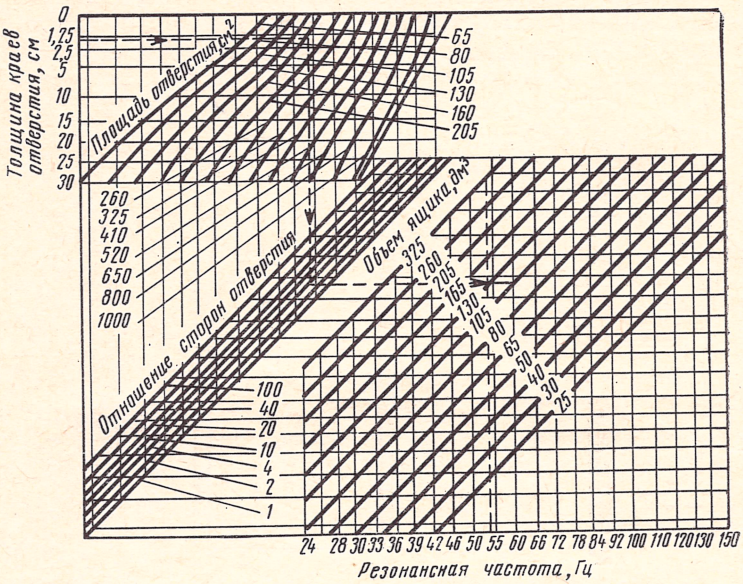


Рис. 4.12. Номограмма для расчета объема ящика фазоинвертора

зор имеет диаметр 16 см и резонансную частоту 60 Гц. Отношение сторон отверстия 4, а толщина материала ящика 15 см. Подсчитаем эффективную площадь диффузора $S_{эфф} = 0{,}63 \cdot 16^2 = 161{,}3$ см².

Пунктирная линия на номограмме, проходящая через принятые данные, показывает, что объем ящика 130 дм³. Площадь отверстия должна быть приблизительно равна эффективной площади диффузора 161,3 см².

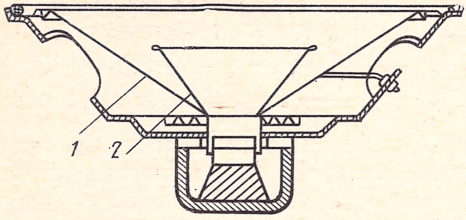


Рис. 4.13. Двухдиффузорный громкоговоритель

Для расширения полосы частот в сторону высоких частот применяются двухдиффузорные громкоговорители (рис. 4.13). На низких и средних частотах оба диффузора колеблются как одно целое, однако в области средних частот внутренний диффузор *1* действует как рассеивающее тело, способствуя расширению диаграммы направленности и, следовательно, более равномерному распределению звуковой энергии в пространстве.

Начиная с частот порядка нескольких килогерц (>2000 Гц), функция звукоизлучения постепенно переходит к малому диффузору. Этот диффузор, будучи очень легким и жестким, способен эффективно излучать вплоть до частот порядка 12÷15 кГц; большой диффузор в этой области практически неподвижен и играет роль рефлектора.

§ 4.4. РУПОРНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Назначение и форма рупора. Рупор представляет собой звуковод с неподвижными стенками, площадь поперечного сечения которого от входа к выходу непрерывно увеличивается. Если громкоговоритель сочленить с началом рупора, то можно согласовать сопротивления механической системы и входного отверстия рупора и выходного отверстия рупора с сопротивлением излучения, что значительно повышает эффективность излучения. При работе излучателя на рупор функция звукоизлучения в неограниченную среду переходит к оконечному отверстию рупора. Размеры этого отверстия должны быть достаточно большими. Оптимальной формой рупора считают такую, при которой сечение рупора возрастает по экспоненциальному закону. Требуемые размеры оконечного отверстия должны достигаться при умеренной длине рупора.

В настоящее время широко применяются громкоговорители с экспоненциальным рупором (рис. 4.14), площадь выходного отверстия которого определяются как $S_i = S_0 l^{\beta l}$, где S_0 — площадь входного отверстия; l — длина рупора; β — показатель расширения

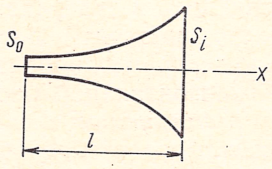


Рис. 4.14. Экспоненциальный рупор

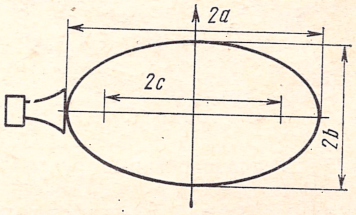


Рис. 4.15. Диаграмма направленности рупора

рупора; этот показатель определяет относительное возрастание сечения рупора на единицу его длины:

$$\beta = \frac{1}{S}\frac{dS}{dx},$$

откуда длина рупора

$$l = \frac{1}{\beta}\ln\frac{S_i}{S_0} = \frac{c}{2\omega_{кр}}\ln\frac{S_i}{S_0},$$

где c — скорость звука; $\omega_{кр} = \beta c/2$ — критическая частота рупора.

Часто для увеличения длины рупора и сокращения компактной конструкции применяют рупоры свернутого типа. Диаграмма направленности рупора представляет собой эллипсоид вращения

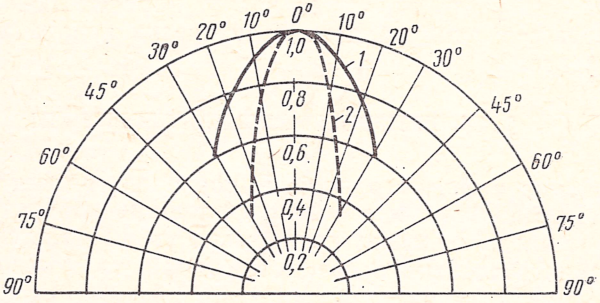


Рис. 4.16. Диаграмма направленности рупора в различных плоскостях

(рис. 4.15). Если рупор имеет не круглую, а форму вытянутого прямоугольника, то диаграмма направленности в различных плоскостях различна (рис. 4.16). С ростом частоты происходит заострение диаграммы направленности. В некоторых случаях для ослабления этого эффекта применяют секционированные рупоры (рис. 4.17). На рисунке изображен рупорный громкоговоритель с двумя головками, работающими на десять рупоров, объединенных общей конструкцией в два ряда. Это позволяет получить более широкую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости.

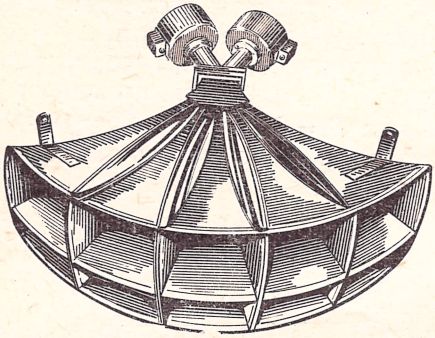


Рис. 4.17. Секционированный рупор

Конструкции рупорных громкоговорителей. Существует два типа наиболее распространенных рупорных громкоговорителей: широкогорлые и узкогорлые (рис. 4.18).

В некоторых широкогорлых громкоговорителях (см. рис. 4.18*а*) излучателем служит обычный громкоговоритель электродинамического типа прямого излучения, диффузор которого повернут в сторону, обратную лицевой стороне рупора. Звуковая волна огибает корпус громкоговорителя и проходит вдоль рупора, площадь поперечного сечения которого увеличивается по экспоненциальному закону.

В узкогорлом рупорном громкоговорителе, показанном на рис. 4.18*б*, излучателем служит вогнутая диафрагма *Д* с гофрированным воротником, диаметр которой тоньше диаметра входного

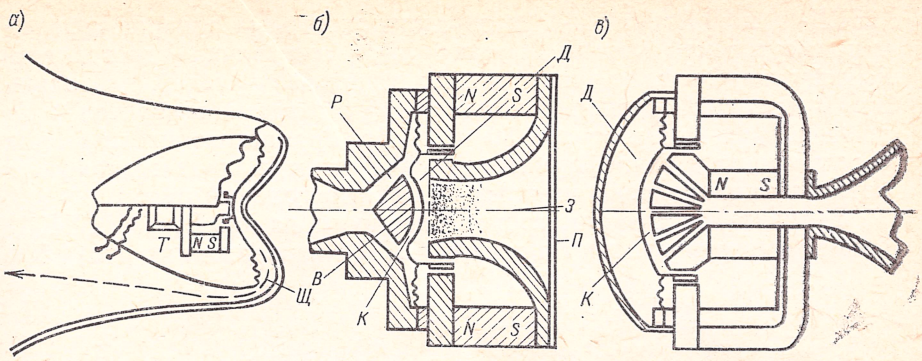


Рис. 4.18. Типы рупорных громкоговорителей

отверстия рупора, и между диафрагмой и рупором имеется предрупорная камера. Отношение площадей входного отверстия рупора S_0 и диафрагмы S называется коэффициентом трансформации предрупорной камеры $n = S_0/S$. Наличие трансформации позволяет

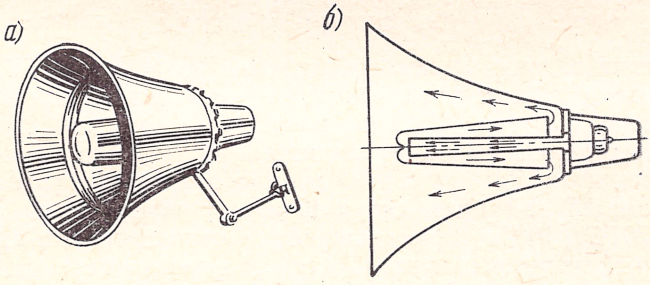


Рис. 4.19. Рупорный громкоговоритель типа 10ГРД-5 с нормальным рупором:
а) внешний вид; *б)* конструкция

поставить излучатель в более выгодные условия излучения, повышая кпд громкоговорителя.

Предрупорная камера может быть источником искажений, обусловленных интерференционными явлениями на высоких частотах, для устранения которых служат вкладыш B и специальные каналы в керне магнитной системы K (рис. 4.18*в*). Конструкцию с вкладышем имеет громкоговоритель типа 10ГРД-5 (рис. 4.19). В громкоговорителе используется свернутый рупор.

Примером широкогорлых рупорных громкоговорителей может служить группа мощных громкоговорителей типа 25ГРД-1, 50ГРД-8, 100ГРД-1.

Группа мощных громкоговорителей в основном состоит из двух диффузорных громкоговорителей номинальной мощности 25 Вт

(25ГД-1) и 50 Вт (50ГД-1) и двух широкогорлых рупоров круглой и прямоугольной формы. Из этих узлов составляют одноголовочный излучатель или группу из двух таких излучателей, позволяющих иметь пять разновидностей рупорных громкоговорителей на номинальную мощность 25, 50 и 100 Вт. Громкоговорители вместе с согласующим трансформатором заключены в круглый кожух, к которому прикреплены круглый или прямоугольный рупор.

Вариант конструкции громкоговорителя на 100 Вт (100ГРД-1) с круглыми рупорами и головками 50ГД-1 изображен на рис. 4.20*а*.

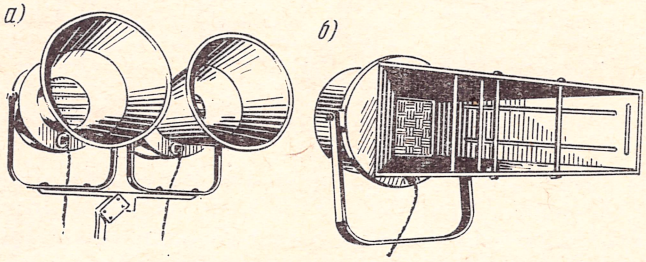


Рис. 4.20. Внешний вид мощных громкоговорителей с направляющим рупором:
а) 100ГРД-1; *б*) 25ГРД-1

Он состоит из двух громкоговорителей по 50 Вт (50ГРД-8), установленных в общем креплении, предусматривающем возможность поворота их на угол 90°. Этим достигается возможность получения различных диаграмм направленности во взаимно перпендикулярных плоскостях. Замена в этих громкоговорителях головок 50ГД-1 головками 25ГД-1 приводит к варианту конструкции мощностью 50 Вт (50ГРД-9), которая внешне не отличается от предыдущей. Одиночный громкоговоритель этой группы имеет номинальную

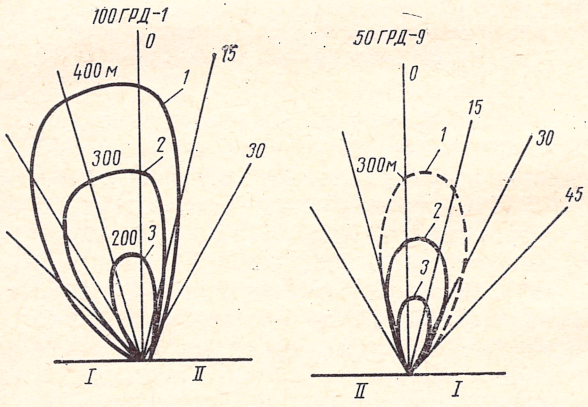


Рис. 4.21. Диаграммы направленного рупорного громкоговорителя для различных точек от него (*1, 2, 3*):
I — в горизонтальной плоскости; *II* — в вертикальной плоскости

мощность 25 Вт и маркировку 25ГРД-2. Для получения в одиночном громкоговорителе возможности изменять диаграмму направленности он снабжен рупором прямоугольного сечения. Такой громкоговоритель мощностью 25 Вт (25ГРД-1) изображен на рис. 4.20*б*.

Типовые диаграммы направленности громкоговорителей 100ГРД-1, 50ГРД-9 приведены на рис. 4.21. При повороте громкоговорителей на 90° диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях взаимно меняются местами. Основные данные и параметры рупорных громкоговорителей приведены в табл. 4.2.

ТАБЛИЦА 4,2

Тип громкоговорителя	Номинальная мощность (общая), Вт	Рабочий диапазон частот, Гц	Неравномерность частотной характеристики, дБ	Среднее звуковое давление на расстоянии 1 м при номинальной мощности, Па	Средняя чувст. фронт—тыл, дБ	Полное сопротивление на частоте 1000 Гц при напряжении, Ом		
						30 В	120 В	240 В
Рупорные громкоговорители								
10ГРД-5	10	200÷4000	15	12,0	—	90	1440	5760
25ГРД-1	25	100÷6000	15	12,5	—	36	576	2300
50ГРД-8	50	120÷5500	15	22,0	—	18	288	
50ГРД-9	50	100÷6000	15	33,5	—	18	288	1150
100ГРД-1	100	120÷5500	15	47,5	—	9	144	576
Звуковые колонки								
8КЗ-1	8	180÷6000	15	2,7	8	112	1800	—
10КЗ-1	10	120÷8000	15	2,5	10	90	1440	5760
25КЗ-1	25	100÷8000	15	5,0	10	36	576	2300
Радиальные громкоговорители								
10ГДН-1	10	80÷8000	15	2,2	—	90	1540	5760
25ГДН-1	25	80÷8000	15	4,0	—	36	576	2300
ДГР-25	25	150÷5000	20	3,8	—	—	576	2300

§ 4.5. ЗВУКОВЫЕ КОЛОНКИ И РАДИАЛЬНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Звуковые колонки. Высокое качество современных диффузорных громкоговорителей в сочетании с надлежащим оформлением позволило создать групповой излучатель с высокими акустически-

ми качествами и соответствующими диаграммами направленности как в горизонтальной *2*, так и в вертикальной *1* плоскостях (рис. 4.22). Групповые излучатели, состоящие из нескольких типовых

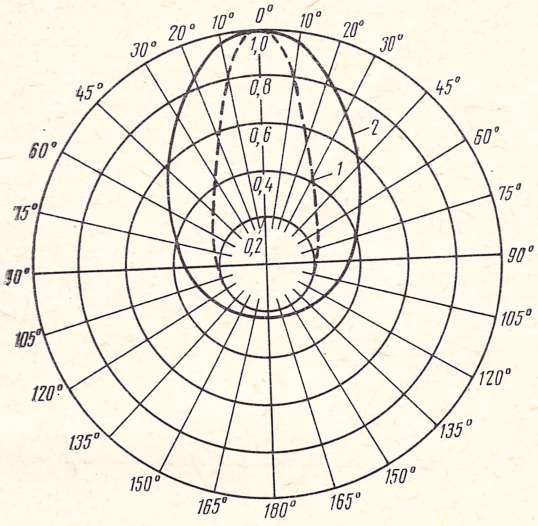


Рис. 4.22. Типовые диаграммы направленности звуковых колонок:
1 — вертикальной плоскости; *2* — в горизонтальной плоскости

диффузорных громкоговорителей, располагаемых в один, два или три ряда, получили название звуковых колонок. Внешний вид и расположение громкоговорителей в одной из колонок показаны на рис. 4.23.

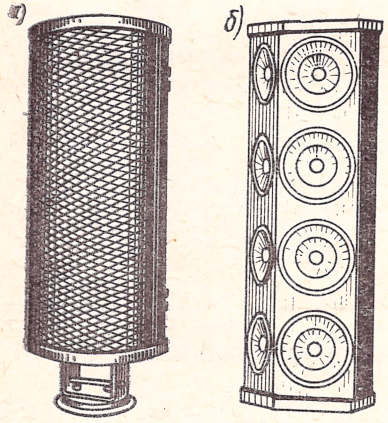


Рис. 4.23. Десятиваттная звуковая колонка

В настоящее время разработаны и производятся звуковые колонки мощностью от 8 до 100 Вт в деревянном и металлическом оформлении (стационарные и переносные). Они предназначены для работы в закрытых помещениях и на открытых пространствах. Условное обозначение звуковых колонок 25КЗ-2, где первая цифра означает номинальную мощность, последняя цифра указывает вид оформления (металлическое — *1*, деревянное—*2*). В зависимости от мощности колонки комплектуются типовыми 2-, 4- или 10-ваттными громкого-

ворителями и согласующим трансформатором, позволяющим включать колонку в трансляционные сети напряжением 30, 120 или 240 В. Звуковая колонка типа 10КЗ-2 комплектуется восемью диффузорными громкоговорителями типа 2ГД-3, а звуковая колонка 25КЗ-2 — восьмью громкоговорителями типа 4ГД-1. Кроме того, звуковая колонка может быть включена на желаемую мощность. Звуковая колонка типа 10КЗ-2 может быть при соответствующем переключении включена на мощность 10, 5 и 2,5 Вт; колонка типа 25КЗ-2 — на 25; 12,5 и 6,25 Вт.

Особенность звуковых колонок — в достаточно эффективном излучении низших частот из-за большого числа громкоговорителей и пониженном излучении с обратной стороны. Последнее обусловлено применением закрытого ящика. Перепад уровней громкости по «фронту» и «тылу» у всех перечисленных колонок не менее 8—10 дБ. Это преимущество делает звуковые колонки незаменимыми во многих случаях организации звукоусиления.

Основные данные звуковых колонок приведены в табл. 4.2.

Радиальные громкоговорители. Для озвучения открытых пространств применяется специальная конструкция ненаправленных громкоговорителей, так называемых радиальных (рис. 4.24*а*). К ним относятся громкоговорители типов 10ГДН-1, 25ГДН-1.

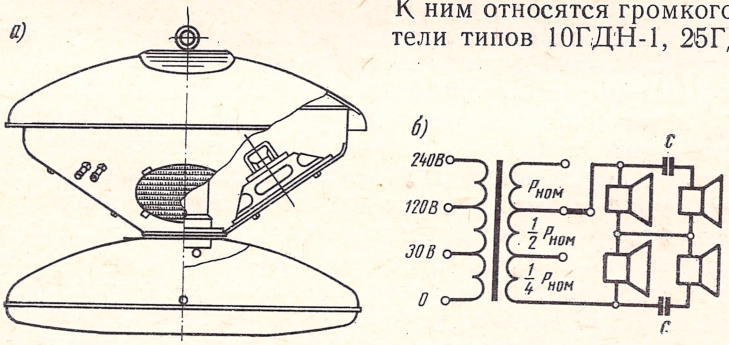


Рис. 4.24. Радиальные громкоговорители

Конструкции обоих громкоговорителей одинаковы и различаются они только габаритами, весом и типами головок. Громкоговоритель 10ГДН-1 содержит четыре 4-ваттные головки; громкоговоритель 25ГДН-1 — такое же количество 10-ваттных. Они установлены в общем кожухе и расположены симметрично по окружности с наклоном под углом 35°. Для достижения наиболее равномерного распределения звуковой энергии по озвучиваемой площади под кожухом излучателя имеется специальный рассеиватель-рефлектор. С этой же целью две диаметрально противоположные головки подключены к двум другим через низкочастотный фильтр (конденсаторы *С* на схеме рис. 4.24*б*). Низкочастотный фильтр ослабляет излучение низших частот. Это необходимо для выравнивания создаваемого звукового поля в диапазоне частот, так как диаграмма

направленности громкоговорителя на высоких частотах уже, чем на низких частотах.

Громкоговорители имеют согласующий трансформатор для подключения к трансляционной сети со стандартным напряжением 30, 120 или 240 В.

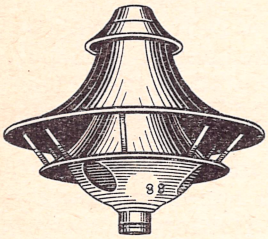


Рис. 4.25. Громкоговоритель типа ДГР-25

Несколько по-другому сконструирован громкоговоритель типа ДГР-25 (рис. 4.25). Для воспроизведения низких частот громкоговоритель имеет излучатель рупорного типа и для воспроизведения высоких частот три электродинамических диффузорных громкоговорителя, расположенных по окружности под углом 120° друг к другу для равномерного распределения звуковой энергии вч. Оси этих громкоговорителей имеют наклон, поскольку громкоговоритель располагается на некоторой высоте (например, на мачте). Основные параметры радиальных громкоговорителей даны в табл. 4.2.

§ 4.6. АКУСТИЧЕСКИЕ АГРЕГАТЫ

Выше мы познакомились с особенностями двух типов электродинамических громкоговорителей: прямого излучения и рупорных. Каким условиям должен удовлетворять каждый тип громкоговорителя для хорошего воспроизведения низких и высоких частот? Громкоговорители прямого излучения для хорошей передачи низких частот должны иметь диффузор больших размеров. Большой диффузор должен быть прочным, а следовательно, тяжелым. А для эффективного излучения высоких частот громкоговоритель должен иметь диффузор и звуковую катушку малых размеров и веса. Отсюда громкоговоритель прямого излучения не может обеспечить высокое качество воспроизведения всего частотного диапазона.

В обычном рупорном громкоговорителе также совершенно противоположны требования, предъявляемые к основным элементам его конструкции для хорошего воспроизведения низких или высоких частот. Таким образом, независимо от типа громкоговорителя совместить требования для эффективного излучения низких и высоких частот невозможно.

Для высококачественного воспроизведения широкого частотного диапазона в настоящее время применяются акустические (звуковые) агрегаты. Высокое качество воспроизведения звука в них достигается разделением частотного диапазона, который необходимо разделить на две или три полосы частот. Каждую полосу частот воспроизводят разные громкоговорители или их группы. Разделение всего частотного диапазона на полосы нижних, средних и высоких частот осуществляется с помощью разделительных фильтров. Структурная схема двухполосного акустического агрегата показана на рис. 4.26.

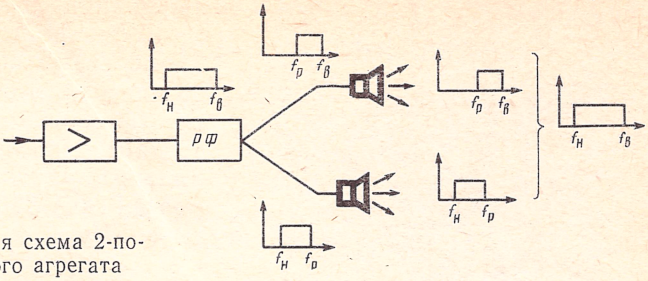


Рис. 4.26. Структурная схема 2-полосного акустического агрегата

Простейшие схемы разделительных фильтров представлены на рис. 4.27. Частота разделения, общая для обоих громкоговорителей, выбирается такой, чтобы средние мощности звукового сигнала распределялись между ними примерно одинаково (рис. 4.28).

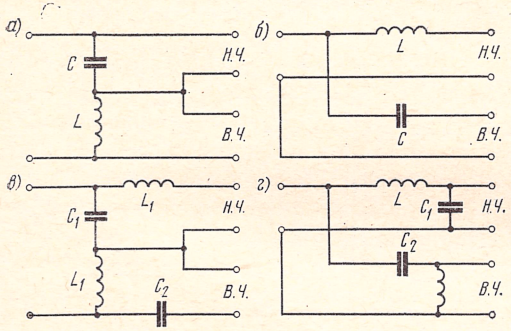


Рис. 4.27. Схемы разделительных фильтров

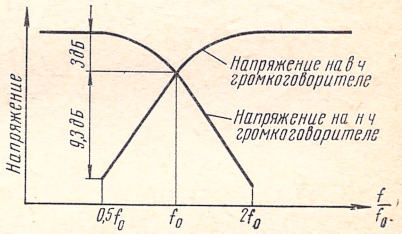


Рис. 4.28. Частотная характеристика разделительного фильтра (*РФ*)

Акустические агрегаты типа КА-810М или АКЗ-3 имеют рабочий диапазон частот 40÷18 000 Гц, а типа Н922 (ВНР) — 30÷÷20 000 Гц.

§ 4.7. ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ ДЛЯ РАДИОТРАНСЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Громкоговорители для радиотрансляционной сети называют абонентскими громкоговорителями. Абонентский громкоговоритель для однопрограммных РТС представляет собой обычный электродинамический громкоговоритель прямого излучения, вмонтированный в специальный корпус с трансформатором и регулятором громкости. Электродинамические громкоговорители выбирают мощностью от 0,5 до 4 В·А. Трансформатор служит для преобразования низкоомного сопротивления звуковой катушки в высокоомное с тем, чтобы иметь возможность включать большое количество абонентских громкоговорителей в радиотрансляционную сеть. В качестве регулятора громкости используется переменное сопротивление либо сам согласующий трансформатор, который делают секционированным. Внутренний вид абонентского громкоговорителя показан на рис. 4.29. Электрические схемы абонентских громкоговори-

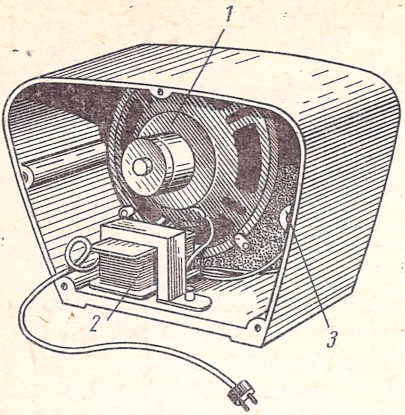


Рис. 4.29. Внутренний вид абонентского громкоговорителя:
1 — громкоговоритель; *2* — согласующий трансформатор; *3* — регулятор громкости

телей приведены на рис. 4.30.

Абонентские громкоговорители по своим качественным показателям делятся на четыре класса (высший, первый, второй и третий). Их основные параметры должны удовлетворять требованиям ГОСТ 5961—59 (табл. 4.3).

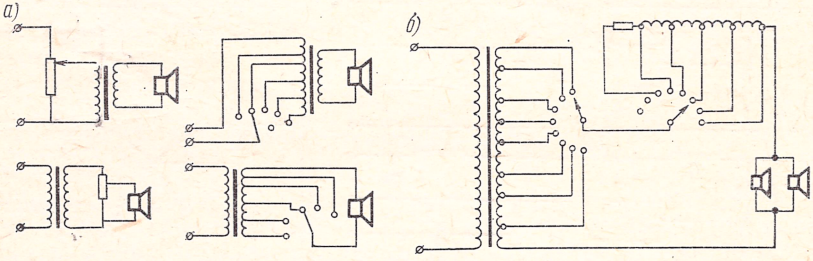


Рис. 4.30. Электрические схемы абонентских громкоговорителей II и III классов

ТАБЛИЦА 4.3

Параметр	Класс громкоговорителя			
	высший	первый	второй	третий
Рабочий диапазон частот, Гц	50÷15 000	80÷10 000	100÷6000	150÷5000
Неравномерность частотной характеристики в рабочем диапазоне частот, дБ	12	15	15	15
Коэффициент нелинейных искажений, %, при номинальном звуковом давлении на частотах:				
до 200 Гц	5	7	10	—
выше 200 Гц	5	7	7	7
Среднее стандартное звуковое давление, Па	1,2	0,45	0,3	0,35

Контрольные вопросы

1. Основные параметры громкоговорителя.
2. Опишите принцип действия электродинамического громкоговорителя прямого излучения.
3. Объясните ход частотной характеристики входного сопротивления громкоговорителя.
4. Укажите противоречие в требованиях, предъявляемых к громкоговорителю любого типа для хорошего излучения высших и низших звуковых частот.
5. Какова роль акустического оформления громкоговорителя?
6. Назначение рупора. Конструкции рупорных громкоговорителей.
7. Какие искажения сопровождают работу громкоговорителя?
8. Расскажите об особенностях громкоговорителей для проводного вещания.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

§ 5.1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗВУКА

Общие сведения. Звукозапись широко применяется в современном радиовещании. Значительная часть программ радиовещания (в отдельных случаях до 90%) предварительно записывается.

Без применения звукозаписи нельзя было бы познакомить слушателей с исполнением крупнейших мастеров мира (певцов, музыкантов, дирижеров). Звукозапись применяется в радиовещании для репетиционной работы, консервации звучаний на короткое или длительное время и для контрольных целей. Целесообразно применение звукозаписи для обмена программами между отдаленными пунктами, имеющими большую разницу в поясном времени, когда трудно найти время, одинаково удобное для обеих сторон, а также для международного обмена.

Наиболее широкое распространение получили два способа звукозаписи: электромеханический и магнитный.

Электромеханическая звукозапись — это способ звукозаписи, при котором звуковые колебания превращаются в механические колебания резца, вырезающего на равномерно движущемся звуконосителе канавку, являющуюся механической фонограммой.

Механическая звукозапись изобретена в 1877 г. французским изобретателем Ш. Кромом, предложившим наносить спиральную канавку на вращающийся диск или цилиндр. При вращении диска (цилиндра) звукозаписывающий резец совершает небольшие колебания вдоль радиуса диска или оси цилиндра, в результате чего получается спиральная зигзагообразная канавка (поперечная запись). Поперечная запись на диск нашла широкое применение при изготовлении граммофонных пластинок.

Механическая звукозапись осуществима также путем сообщения резцу колебаний, перпендикулярных поверхности диска, вследствие чего получается механическая фонограмма переменной глубины (глубинная запись). Этот вид записи в 1877 г. впервые осуществлен на фонографе американского изобретателя Т. Эдиссона. В современных аппаратах механической записи записываемые звуковые колебания превращаются микрофоном в соответствующие электрические напряжения, которые после их усиления подаются на электромеханический преобразователь — рекордер, превращающий переменное электрическое напряжение в соответствующие механические колебания резца.

Таким образом, аппарат для механической звукозаписи состоит из микрофона, усилительного тракта, рекордера и станка записи. Станок для звукозаписи (рис. 5.1) имеет массивную планшайбу *1*, служащую опорой для диска *6* и вращаемую синхронным электродвигателем переменного тока с постоянной скоростью. Скорость

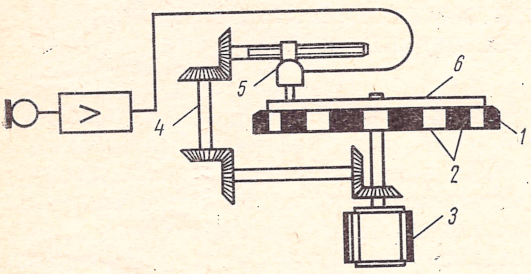


Рис. 5.1. Станок для звукозаписи

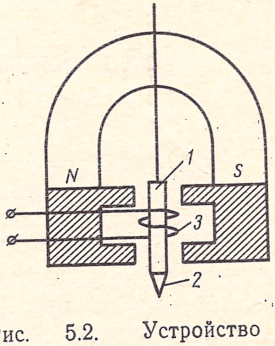


Рис. 5.2. Устройство электромагнитного рекордера

контролируется при помощи стробоскопа по темным и светлым полоскам *2* на планшайбе. Вал электродвигателя *3* имеет сцепление с механизмом *4*, дающим равномерное поступательное движение супорту, несущему рекордер *5*; при каждом обороте планшайбы супорт с рекордером смещается на одну и ту же величину (шаг записи).

Устройство и принцип действия рекордера. В настоящее время наибольшее распространение получили электромагнитный и пьезоэлектрический рекордеры.

На рис. 5.2 приведено устройство электромагнитного рекордера. Между полюсными наконечниками *N* и *S* постоянного магнита расположен якорь *1* (с резцом *2*), укрепленный на сильноцентрирующей пружине и расположенный в отверстии звуковой катушки *3*. При пропускании через эту катушку тока звуковой частоты, колебания которого записываются, якорь колеблется между полюсами постоянного магнита и приводит в движение резец. Благодаря дифференциальному устройству магнитной системы отклонения конца резца пропорциональны силе тока, проходящего через рекордер. При звукозаписи резаньем рекордер снабжается резцом из сапфира, искусственного алмаза, стали или твердых сплавов. При звукозаписи давлением применяется стальной или сапфировый резец.

Устройство и принцип действия пьезоэлектрического и электромагнитного звукоснимателей. Воспроизведение механической записи основано на том, что канавка, являющаяся профилированным поводком конца воспроизводящей иглы, вызывает при своем движении колебания иглы звукоснимателя соответственно записанным звукам. Колебания иглы с помощью электромеханического

преобразователя (электромагнитного или пьезоэлектрического типа) превращаются в электрическое напряжение, которое затем усиливается и воспроизводится. Пьезоэлектрические звукосниматели удобнее и легче (меньше изнашивают пластинку) электромагнитных, поэтому они получили в последнее время значительное распространение.

С принципом действия пьезоэлектрического преобразователя мы познакомились раньше в разделах, посвященных громкоговорителям и микрофонам. Пьезоэлектрический звукосниматель показан на рис. 5.3. Воспроизводящая игла *1* соединена с пьезоэлементом *2*,

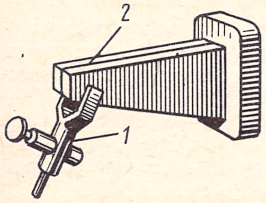


Рис. 5.3. Устройство электромагнитного звукоснимателя

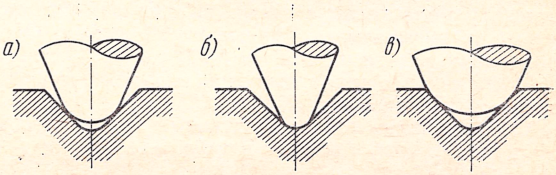


Рис. 5.4. Положение иглы в канавке: *а)* игла с нормальным радиусом закругления; *б)* игла с малым радиусом закругления; *в)* игла с большим радиусом закругления

и ее механические колебания деформируют пьезоэлемент. При деформации пьезоэлемента на его обкладках создается напряжение, пропорциональное колебаниям иглы.

В зависимости от материала пьезоэлемента головки звукоснимателя делятся на кристаллические и керамические.

В кристаллических головках применяют пьезоэлементы из водорастворимых кристаллов (сегнетовая соль и дигидрофосфат аммония). Эти пьезоэлементы хрупки и гигроскопичны, поэтому они используются мало. Керамические головки изготавливают из керамик различного состава, преимущественно из цирконата-титаната свинца. В процессе изготовления для получения требуемых пьезоэлектрических свойств керамические пьезоэлементы выдерживают в постоянном электрическом поле. Этот процесс называется поляризацией. Механическая прочность и стабильность параметров в широком интервале температур и влажности обусловили их широкое использование. В электромагнитных звукоснимателях (см. рис. 5.2) между полюсами магнита находится подвижный сердечник, соединенный с иглой. Движение иглы отклоняет якорь к одному или другому полюсу магнита, благодаря чему в катушке наводится переменное напряжение, пропорциональное скорости колебания сердечника.

При воспроизведении игла должна опираться на стенки канавки, не касаясь ее дна (рис. 5.4*а*). Игла с радиусом закругления,

меньшим радиуса закругления дна канавки (рис. 5.4*б*), будет скользить по дну, не следуя всем извилинам канавки, и воспроизведение будет искаженным. С другой стороны, при чрезмерно большом радиусе закругления иглы (рис. 5.4*в*) она не будет огибать канавки при воспроизведении записи высоких частот, что также приведет к искажениям и, кроме того, нарушит надежный контакт иглы с канавкой.

В современных звукоснимателях применяются корундовые или алмазные иглы. Алмазные служат примерно в 10 раз дольше корундовых. Так как при механической записи резец рекордера расположен под таким же углом или близким к нему, игла звукоснимателя должна быть наклонена к пластинке.

Грампластинки. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются грампластинки с тремя видами записи: стереофонические, долгоиграющие и так называемые обычные на 78 об/мин. Обозначение пластинок соответствует виду записи: С, МУ и МШ, где С — стереофоническая запись; МУ — монофоническая с узкой канавкой или долгоиграющая; МШ — монофоническая с широкой канавкой или обычная.

Сравнительные размеры звуковых канавок обычной (*а*) и долгоиграющей (*б*) грампластинок показаны в табл. 5.1.

ТАБЛИЦА 5.1

Параметр	Значение параметра для записи		
	обычной	долгоиграющей	стереофонической
Ширина бороздки, мкм	150—160	50—60	45
Глубина бороздки, мкм	~60	~25	
Шаг записи, мкм	~260	~95	
Плотность записи (число бороздок на 1 см)	~38	~100	
Максимальная амплитуда смещения, мкм	~50	~20	
Время звучания, мин	10—15	23	

Процесс изготовления пластинок следующий: записанная поверхность воскового диска покрывается методом вакуум-катодного напыления тончайшим слоем золота для придания проводимости этой поверхности. С металлизированного таким путем воскового диска в гальванической ванне снимается медная негативная копия — первый оригинал. На негативной копии вместо канавок будут соответствующие им выступы, воспроизводящие запись.

С негативной копии можно прессовать пластинки, поверхность которых будет соответствовать поверхности воскового диска. Так как тиражность медного оригинала невелика, то с него гальванопластическим путем получают несколько позитивных копий вторых оригиналов, а затем с каждого второго оригинала гальванопластически снимают несколько негативных копий. Рабочая поверхность этих негативных копий покрывается для увеличения срока службы слоем никеля, поверх которого наносится тонкий слой хрома.

С полученных таким способом матриц на особых прессах при температуре 150° и давлении 150 ат из специальной массы прессуют пластинки. Каждая матрица позволяет сделать 1000 прессований.

§ 5.2. МАГНИТНАЯ ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

Магнитная запись основана на свойстве ферромагнитного материала сохранять остаточную намагниченность, соответствующую напряженности магнитного поля, которое на него действовало. Магнитная запись осуществляется на ферромагнитной ленте, стальной проволоке, стальной ленте и т. д., которые называются в этом случае звуконосителями.

Для магнитной записи звука и его воспроизведения применяются магнитофоны. На рис. 5.5 изображена упрощенная структурная схема магнитофона для записи и воспроизведения звуковых вещательных программ. Сигнал, подлежащий записи, подается на вход усилителя записи (*УЗ*). После необходимого усиления (и коррекции) сигнал поступает в обмотку записывающей головки *1*. В зазоре записывающей головки образуется магнитное поле, величина напряженности которого изменяется во времени в соответствии со значениями записываемого сигнала.

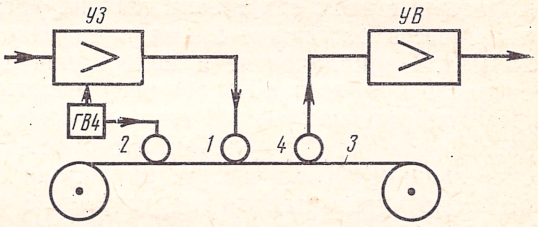


Рис. 5.5. Упрощенная структурная схема магнитофона

Таким образом, разные участки движущегося звуконосителя *3* намагничиваются в разной степени и на звуконосителе образуются участки с различной остаточной намагниченностью.

Перед тем, как пройти мимо записывающей головки, лента подвергается воздействию поля стирающей головки *2*. По обмотке этой головки пропускается ток высокой частоты, получаемый от генератора высокой частоты (*ГВЧ*). Под воздействием этого поля звуконоситель практически полностью размагничивается (стирается старая запись, уничтожается случайная намагниченность звуконосителя, которая может вызвать шумы при воспроизведении). Одновременно ток высокой частоты, но меньшей амплитуды подается в обмотку записывающей головки. Этот ток (называемый током подмагничивания) способствует повышению качества записи.

При прохождении звуконосителя *3* с записью мимо воспроизводящей головки *4* образовавшиеся в результате записи области остаточной намагниченности создают в обмотке воспроизводящей головки эдс, соответствующую записанным звуковым колебаниям. С обмотки воспроизводящей головки напряжение подается на усилитель воспроизведения (*УВ*), на выходе которого появляется сигнал, соответствующий тому, который был записан.

При записи и воспроизведении звука в настоящее время используется одно из следующих стандартизованных значений линейной скорости продвижения ленты: 76,2; 38,1; 19,05 или 9,53; 4,75; 2,4 см/с.

§ 5.3. ЛЕНТОПРОТЯЖНЫЙ МЕХАНИЗМ

Системы лентопротяжного механизма различаются по количеству применяемых в них электродвигателей: с тремя, с двумя и с одним двигателем.

Лентопротяжный механизм должен обеспечить равномерную скорость движения звуконосителя, быстроту перемотки, отсутствие механической перегрузки ленты при пуске и остановке.

Отклонения средней скорости от номинального значения не должны превышать 0,2%, так как бо́льшие отклонения уже воспринимаются в виде искажений тональности звучания. Самый неблагоприятный в этом отношении случай, когда монтируются ленты, записанные в различное время и на разных лентопротяжных механизмах. Периодические и непериодические колебания мгновенной скорости приводят к колебаниям высоты тона (к детонации), которые воспринимаются на слух в виде «плавания», «дробления» звука (при частоте колебаний скорости менее 10 Гц) или «хриплости» звучания (при частоте колебания скорости выше 25 Гц). Ухо особенно чувствительно к детонации с частотой порядка 4 Гц. Детонация определяется как $\Delta v/v \cdot 100\%$. Δv — максимальная величина отклонения скорости от ее среднеарифметического значения.

Натяжение ленты при записи и воспроизведении должно быть по возможности постоянным с тем, чтобы обеспечивалась равномерность контакта ленты с рабочей щелью головки.

Лентопротяжный механизм с тремя двигателями наилучшим образом выполняет указанные выше требования. Этот тип лентопротяжного механизма используется преимущественно в профессиональных (студийных) магнитофонах. Каждый из трех двигателей выполняет определенную функцию. Один — для намотки и

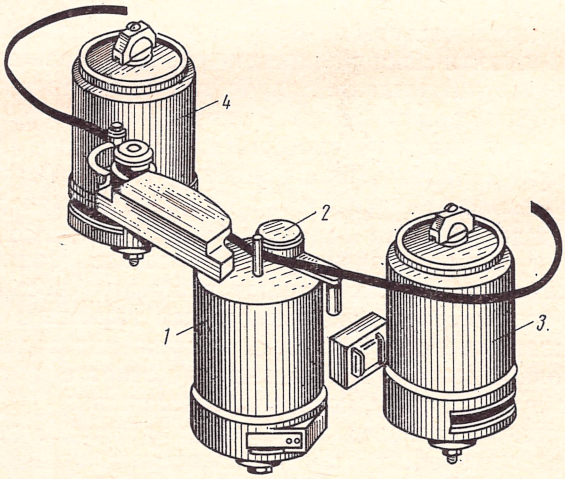


Рис. 5.6. Лентопротяжный механизм с тремя двигателями

быстрого хода вперед, другой — для быстрой перемотки назад и третий — ведущий — определяет скорость движения ленты.

На рис. 5.6 показан лентопротяжный механизм с тремя электродвигателями. Ведущий двигатель *1* типа ДВС-0 10/5-4 является самозапускающимся синхронно-реактивным конденсаторным. Верхний конец вала двигателя снабжен сменной насадкой, предназначенной для приведения в движение звуконосителя в режиме рабочего хода (запись, воспроизведение); при этом лента прижимается свободно вращающимся резиновым прижимным роликом *2* к насадке ведущего двигателя. Боковые двигатели типа *3, 4* ДПА-0 10/5-4 являются асинхронными конденсаторными.

В режиме рабочего хода наматывание ленты на сердечник осуществляется правым двигателем, левый двигатель при этом служит электрическим тормозом и обеспечивает необходимое натяжение ленты на участке левый двигатель — ведущий двигатель.

Обратная перемотка ленты производится на повышенной скорости левым двигателем; правый двигатель при этом слегка притормаживается, ведущий двигатель выключается и прижимной ролик отходит от его насадки. Аналогично осуществляется и быстрый ход вперед с той лишь разницей, что перемотка ленты производится на повышенной скорости правым двигателем.

Конструкция одномоторного лентопротяжного механизма приведена на рис. 5.7. Как видно из рисунка, конструкция лентопротяжного механизма симметрична относительно ведущей оси *1*, яв-

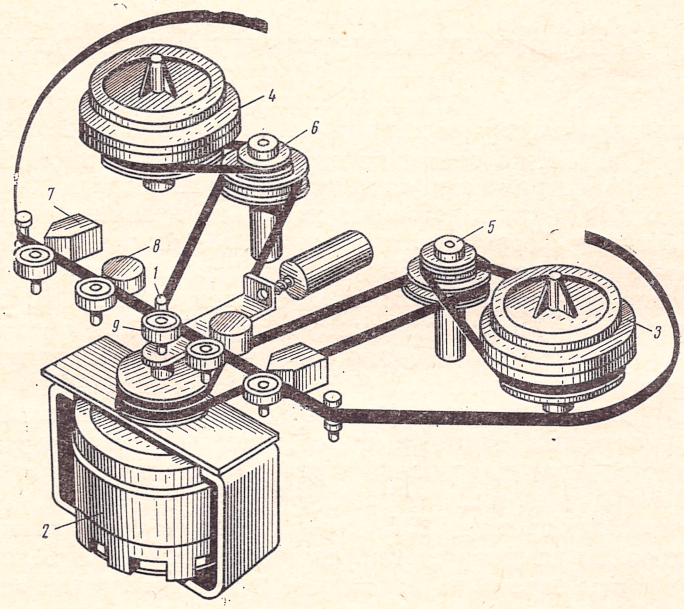


Рис. 5.7. Лентопротяжный механизм с одним двигателем

ляющейся продолжением оси двухскоростного двигателя *2* типа МД-2. Узлы подмотки *3* и обратной перемотки *4* имеют одинаковую конструкцию с применением электромагнитных муфт. Передача вращения к узлам подмотки и обратной перемотки осуществляется посредством пассиков через промежуточные узлы «механические детекторы» *5* и *6*.

При записи и воспроизведении лента сматывается с катушки, установленной на подтарельнике узла *4*, поступает на магнитные головки *7*, протягивается ведущим валом *1* и прижимным роликом *9* и подматывается катушкой, установленной на подтарельнике узла *3*. В этом режиме усилие от двигателя передается через «механический детектор» *5* только на узел *3*. Усилие на узел *4* не передается, так как «механический детектор» *6* включен в обратном направлении.

По мере подмотки ленты происходит проскальзывание подтарельника относительно шкива, на который передается усилие от «механического детектора», так как электромагнитные муфты в режиме «запись-воспроизведение» выключены.

Ускоренная перемотка звуконосителя в обоих направлениях осуществляется жесткой связью подтарельника со шкивом, на который передается усилие от двигателя, благодаря включению электромагнитной муфты. Натяжение ленты при рабочем ходе и ускоренных перемотках происходит путем проскальзывания муфт подтарельников. Торможение производится электромагнитными муфтами.

§ 5.4. МАГНИТНЫЕ ЗВУКОНОСИТЕЛИ И МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ

Магнитные звуконосители. В настоящее время в системе вещания используются звуконосители преимущественно в виде ферромагнитной ленты, которая позволяет легко осуществлять монтаж различных фонограмм при помощи склеивания.

Магнитные ленты изготовляются большей частью двуслойные.

Двуслойная ферромагнитная лента представляет собой синтетическую немагнитную основу, на которую нанесен слой лака с равномерно размещенным порошком окиси железа (Fe_2O_3).

Наилучшими физико-механическими свойствами обладают ленты с полиэтиленовыми основами (полиэтилентерефталатная основа имеет различные названия: в СССР — лавсан, в США — майлар, в ФРГ — хостафан и др.). Они характеризуются высокой механической прочностью, термо- и влагостойкостью. Высокие механические качества этих материалов позволяют изготовлять ферромагнитные ленты до 12 мкм толщины.

В настоящее время в СССР выпускается лента типа 6 на ацетатной основе. Налаживается выпуск ленты типа 10. Это лента с порошком ленты типа 6 на лавсановой основе. Толщина ее порядка 37 мкм. Ферромагнитные ленты при скоростях движения 38 и 19 см/с обеспечивают запись частот до 16 000 Гц, а при скорости

9,53 см/с — до 10 000 Гц. Ленты, используемые в радиовещании, имеют ширину 6,25±0,05 мм и общую толщину от 27 до 55 мкм при толщине рабочего слоя 10—18 мкм. Ленты, используемые в бытовых магнитофонах, имеют общую толщину 18—37 мкм и более тонкий рабочий слой 6—10 мкм.

Запись и воспроизведение и стирание можно осуществить при помощи одной и той же головки. Однако для повышения качества магнитной записи и удобства контроля в радиовещательных магнитофонах применяют раздельные головки, так как требования, предъявляемые к каждому из процессов (запись, стирание, воспроизведение), обусловливают и некоторые конструктивные отличия головок. Кроме того, наличие отдельных головок для записи и воспроизведения позволяет осуществлять контроль в процессе записи, без чего запись радиовещательных программ была бы практически невозможна. В настоящее время в магнитофонах используется головка кольцевого типа. Она представляет собой тороидальный сердечник, состоящий из двух отдельных полуколец, на каждом из которых находится обмотка (рис. 5.8).

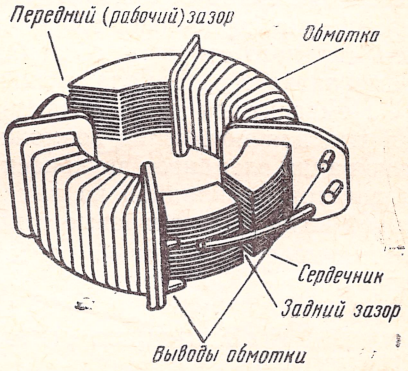


Рис. 5.8. Конструкция магнитной головки

Сердечники магнитных головок для уменьшения потерь на вихревые токи собираются из отдельных пластин, изготовленных из магнитомягких материалов с большой магнитной проницаемостью и сравнительно малой индукцией насыщения (пермаллой, феррит, альфенол). Толщина пластин берется 0,02 см и тоньше. Подобное устройство сердечника имеют все типы кольцевых головок, однако каждый тип головок имеет и свои особенности, связанные с их основным назначением.

Записывающая головка. Наличие в обмотке записывающей головки тока звуковой частоты сигнала и тока высокочастотного подмагничивания определяет некоторые особенности этой головки.

Размеры сердечника должны быть достаточно большими, чтобы исключить возможность насыщения сердечника значительным магнитным полем подмагничивания. В режиме насыщения нарушается пропорциональность между током подмагничивания и напряженностью поля в зазоре головки и возникают искажения формы тока подмагничивания. Чтобы избежать насыщения сердечника, в записывающей головке, кроме рабочего зазора, имеется и дополнительный (задний) зазор, что повышает магнитное сопротивление сердечника. Наличие дополнительного зазора способствует линейной зависимости величины магнитной индукции в сердечнике от тока записи, что уменьшает нелинейные искажения. Ширина это-

го зазора 0,04 см. Ширина рабочего зазора записывающей головки радиовещательного магнитофона выбирается обычно порядка 6—20 мкм.

Воспроизводящая головка. Магнитное поле фонограммы имеет сравнительно малую интенсивность, поэтому воспроизводящая головка должна быть чувствительной и защищенной от внешних помех: электродвигателей, дросселей, трансформаторов. Воспроизводящую головку экранируют двумя экранами: медным и пермаллоевым. Экраны защищают головку и от внешних магнитных полей. Рабочий зазор заполняется немагнитной прокладкой, а дополнительный зазор устраняется сборкой полусердечников встык.

Стирающая головка. В качестве материала для пластин стирающих головок чаще всего применяют кремнистую сталь благодаря ее сравнительно большой индукции насыщения. Большая индукция насыщения сердечника стирающей головки необходима для создания сильного стирающего поля, достаточного для насыщения ферромагнитного материала звуконосителя.

Немагнитный зазор делают достаточно широким, порядка 0,2—0,5 мм, для получения возможно большего числа циклов перемагничивания элементов звуконосителя в процессе стирания. Зазор заполняется прокладкой из немагнитной бериллиевой бронзы, в которой возникают вихревые токи, и магнитное поле, созданное ими, выталкивает магнитный поток из зазора в размагничиваемую ленту.

§ 5.5. ПРОЦЕСС СТИРАНИЯ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

Для многократного использования звуконосителя необходимо стирать предыдущую запись.

Стирание может быть осуществлено доведением звуконосителя либо до насыщения, либо до размагниченного состояния. В магнитофонах для радиовещания применяется метод стирания током высокой частоты, который приводит звуконоситель к размагниченному состоянию. При прохождении по стирающей головке тока высокой частоты в зоне зазора головки возникает переменное магнитное поле, амплитуда напряженности которого в каждый данный момент максимальна над серединой зазора и постепенно уменьшается в обе стороны от зазора.

На рис. 5.9 показана зависимость величины остаточной намагниченности носителя B_r от напряженности H магнитного поля стирающей головки. Каждый элемент ферромагнитной ленты подвергается циклическому перемагничиванию: входя в переменное магнитное поле, постепенно нарастающее по амплитуде, элемент звуконосителя будет постепенно намагничиваться до значения, обусловленного максимумом амплитуды напряженности $H_{макс}$ (рис. 5.10) в середине зазора. Пройдя участок поля с максимумом напряженности $H_{макс}$, каждый элемент звуконосителя подвергается воздействию второй половины поля с постепенно спадающей ампли-

тудой напряженности. При уменьшении амплитуды напряженности H магнитного поля петли гистерезиса постепенно сужаются и как бы стягиваются в начало координат, обеспечивая в конечном счете $B_r = 0$.

Для полного размагничивания звуконосителя необходимо выполнение следующих требований:

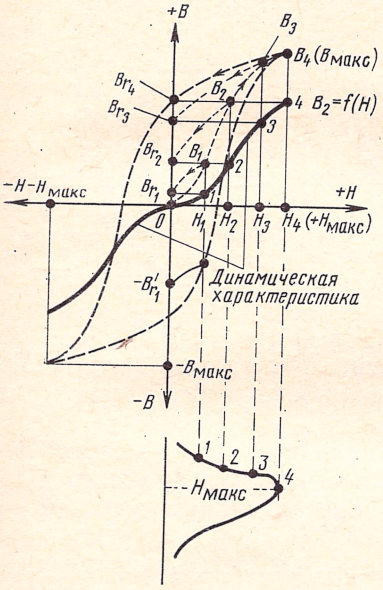


Рис. 5.9. Схема стирания магнитной записи намагничиванием постоянным током звуконосителя до его насыщения

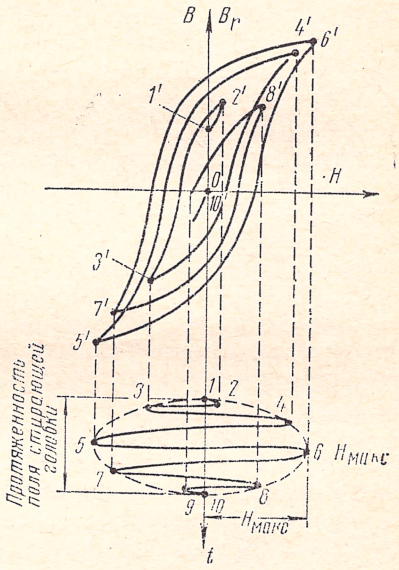


Рис. 5.10. Циклическое перемагничивание высокочастотным полем

1) максимальное значение амплитуды напряженности переменного размагничивающего поля должно быть достаточно большим для достижения индукции насыщения ферромагнитного материала;

2) уменьшение амплитуды напряженности переменного магнитного поля по мере удаления от середины зазора должно происходить плавно и настолько, чтобы каждый элемент звуконосителя за время прохождения в этом поле успел многократно перемагнититься. Из этих соображений частоту тока стирания выбирают равной 60÷80 кГц.

§ 5.6. ПРОЦЕСС ЗАПИСИ

В настоящее время различают следующие виды записи звука:

а) запись с продольным намагничиванием — способ записи, при котором направление основного магнитного потока в рабочем

зазоре записывающей головки параллельно направлению перемещения записывающей головки относительно направления движения звуконосителя (рис. 5.11*а*);

б) запись с поперечным намагничиванием — способ записи, при котором направление основного магнитного потока в рабочем зазоре записывающей головки перпендикулярно направлению пере-

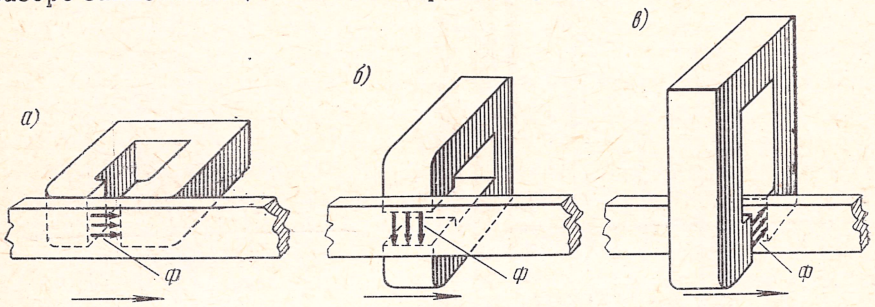


Рис. 5.11. Способы записи

мещения записывающей головки относительно направления движения звуконосителя и параллельно его рабочей поверхности (рис. 5.11*б*);

в) запись с перпендикулярным намагничиванием — способ записи, при котором направление основного магнитного потока в рабочем зазоре записывающей головки перпендикулярно рабочей поверхности звуконосителя (рис. 5.11*в*).

Таким образом, направление записи определяется направлением относительного перемещения головки и звуконосителя, а направление намагничивания — направлением поля в зазоре головки и направлением движения звуконосителя.

В радиовещательных магнитофонах используется продольная запись с продольным намагничиванием, в видеомагнитофонах — наклонная (почти поперечная) запись с поперечным намагничиванием. В процессе магнитной записи на звуконоситель действует намагничивающее поле. Напряженность H магнитного поля прямо пропорциональна величине тока I, протекающего через катушку головки записи, числу витков катушки W и обратно пропорциональна длине провода катушки l. При движении звуконосителя относительно зазора записывающей головки в ферромагнитном слое создается индукция B, зависимость которой от напряженности H магнитного поля определяется кривой намагничивания звуконосителя. Когда звуконоситель выходит из зоны действия головки записи (см. 5.9), то индукция $B_{макс}$, созданная в звуконосителе, снижается до величины остаточной индукции $B_{r\,макс}$ ($B_{r\,4}$).

Таким образом, эффект записи определяется зависимостью остаточной индукции B_r от напряженности H записывающего поля или тока записи, называемой динамической характеристикой ферромагнитного материала (см. рис. 5.9) $B_r = \varphi(H)$.

С помощью динамической характеристики можно определить, как изменяется магнитный след (остаточная индукция B_r) в ферромагнитном слое звуконосителя по его длине в зависимости от изменения во времени напряженности записывающего поля, определяемого изменением тока записи в обмотке магнитной головки.

Рассмотрим способ построения динамической характеристики ферромагнитного материала для наиболее простого случая, когда звуконоситель полностью размагничен, т. е. его остаточная индукция $B_r=0$ (см. рис. 5.9). Намагничивание будет происходить по закону начальной кривой намагничивания. Начальная кривая и петля гистерезиса показаны на рисунке штриховыми линиями. Напряженность H_1 поля головки создает в звуконосителе индукцию B_1. Когда этот намагниченный участок ленты выйдет из зоны действия магнитного поля головки, индукция упадет до значения остаточной индукции B_{r1}.

Аналогично напряженности намагничивающего поля H_2, H_3, H_4 и т. д. будут обусловливать остаточные индукции звуконосителя B_{r2}, B_{r3}, B_{r4} и т. д. Отрицательным значениям H будут соответствовать отрицательные значения B: $-B_{r1}$, $-B_{r2}$, $-B_{r3}$ и т. д. Соединив плавной кривой точки пересечений значений H и B_r, получаем динамическую характеристику. Познакомимся с режимами записи.

Допустим, ведется запись на предварительно размагниченный звуконоситель, динамическая характеристика которого показана на рис. 5.12. Для простоты рассмотрим случай, когда через обмотку записывающей магнитной головки проходит синусоидальный ток. Напряженность H поля записывающей головки также будет изменяться по синусоидальному закону, что показано в нижней левой части рисунка.

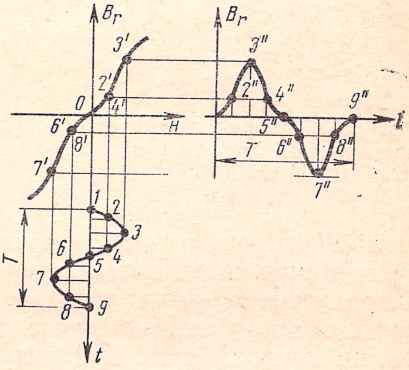


Рис. 5.12. Режим записи на полностью размагниченный звуконоситель (без подмагничивания)

В правой части рис. 5.12 показан график изменения остаточной индукции B_r по длине звуконосителя. Из рисунка видно, что изменения остаточной индукции B_r по длине l звуконосителя не соответствуют изменению напряженности H записывающего поля магнитной головки. Следовательно, в процессе магнитной записи сигнала на размагниченный звуконоситель возникают нелинейные искажения. Воспроизведенный с такой магнитной фонограммы звук будет искаженным. Такой способ записи, при котором через обмотку записывающей головки проходит только ток записываемого сигнала, называется **записью без подмагничивания** (без смещения рабочей точки). Она характеризуется большими нелинейными искажения-

ми и поэтому в настоящее время не применяется. Очевидно, что если использовать линейный участок динамической характеристики, то запись не будет сопровождаться нелинейными искажениями. Для этого необходимо рабочую точку сместить на линейный участок характеристики.

Такой режим записи называется режимом записи со смещением. Смещение рабочей точки по характеристике достигается пропусканием через обмотку записывающей головки, кроме тока записываемого сигнала, еще некоторого подмагничивающего (смещающего) тока.

Физические явления, происходящие при записи с подмагничиванием постоянным током, можно пояснить с помощью рис. 5.13. Пропуская через обмотку записывающей головки, кроме синусоидального, еще и постоянный ток, создающий постоянную напряжен-

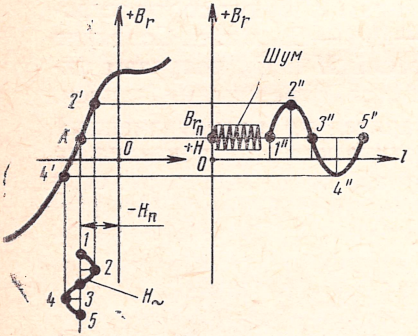


Рис. 5.13. Режим записи на намагниченный до насыщения звуконоситель с подмагничиванием постоянным током

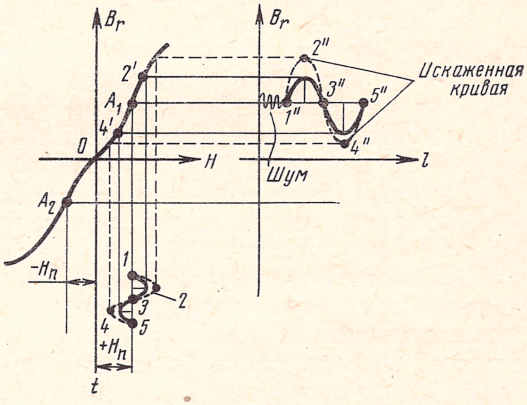


Рис. 5.14. Режим записи со смещением на предварительно полностью размагниченном звуконосителе

ность $H_п$, смещают рабочую точку A в середине прямолинейного участка динамической характеристики. Если амплитуда переменной напряженности магнитного записывающего поля не выходит за пределы прямолинейного участка динамической характеристики, то форма кривой остаточной индукции будет соответствовать форме кривой изменения напряженности H записывающего магнитного поля.

Неискаженную магнитную запись можно получить и при использовании предварительно размагниченного звуконосителя, динамическая характеристика которого тоже имеет прямолинейные участки (рис. 5.14).

Методы записи, при которых в обмотку записывающей головки, кроме записываемого сигнала, подается постоянный смещающий ток, называются записью со смещением (подмагничиванием) постоянным током. Однако этим методам присущи недостатки.

Во-первых, запись со смещением постоянным током характеризуется большим уровнем собственного шума. Это объясняется тем, что в момент паузы в сигнале в обмотку головки записи не подается ток записи, напряженность магнитного поля не равна нулю, а имеет значение, равное $H_п$ (плюс или минус). Эта подмагничивающая напряженность $H_п$ создает остаточную индукцию $B_{rп}$. В результате магнитной неоднородности ферромагнитного слоя звуконосителя остаточная индукция будет нерегулярно изменяться вдоль звуконосителя, что при воспроизведении является причиной шума (см. рис. 5.13).

Во-вторых, максимальный уровень записываемого сигнала ограничивается протяженностью прямолинейных участков динамической характеристики.

§ 5.7. ЗАПИСЬ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

При записи с высокочастотным подмагничиванием через обмотку записывающей головки одновременно с током звуковой частоты

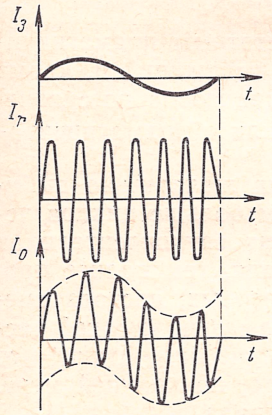


Рис. 5.15. Картина наложения низкочастотных колебаний на высокочастотные колебания

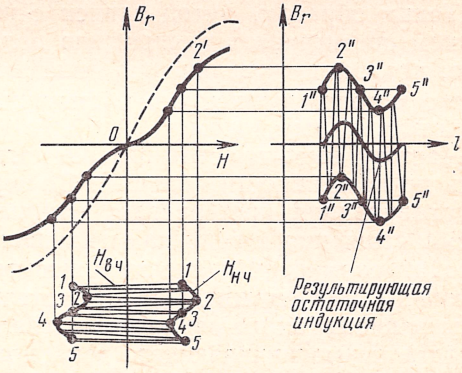


Рис. 5.16. Режим записи с высокочастотным смещением на предварительно размагниченный звуконоситель

пропускают от специального высокочастотного генератора ток высокой (ультразвуковой) частоты, в результате чего происходит так называемое наложение колебаний (рис. 5.15).

Суммарный, результирующий ток I_0, проходящий по обмотке головки записи, создает соответствующую напряженность магнитного поля записывающей головки, в котором движется звуконоситель.

Остаточная индукция, которую приобретает каждый элементарный участок звуконосителя, определяется максимальным значением напряженности намагничивающего суммарного поля. Подробное и

строгое изложение этих явлений достаточно сложно. Однако явления, происходящие при записи с высокочастотным подмагничиванием, с достаточной наглядностью можно пояснить с помощью уже известной динамической характеристики (рис. 5.16). На рис. 5.16 приведена динамическая характеристика предварительно размагниченного звуконосителя, на который действует результирующая напряженность H магнитного поля, создаваемого суммарным током I_c, протекающим по обмотке головки записи.

Сигнал высокочастотного тока головки записи практически на звуконосителе не записывается, так как за время прохождения элементарного участка ленты в магнитном поле происходит многократное перемагничивание этого участка с постепенным уменьшением напряженности поля за счет удаления элемента звуконосителя из зоны действия намагничивающего поля. Последнее аналогично процессу размагничивания звуконосителя и приводит к спрямлению динамической характеристики.

В результате использования более протяженного прямолинейного участка спрямленной динамической характеристики нелинейные искажения при записи малы.

Таким образом, метод записи с высокочастотным подмагничиванием обеспечивает уменьшение нелинейных искажений и, кроме того, приводит к увеличению динамического диапазона по сравнению с методом записи без подмагничивания или с подмагничиванием постоянным током.

Частоту высокочастотного подмагничивания желательно выбирать по возможности бо́льшей. Во-первых, чем больше циклов перемагничивания претерпевает каждый элемент звуконосителя за время движения в зоне намагничивающего поля, тем полнее происходит размагничивание звуконосителя. Во-вторых, частота смещающего тока должна быть существенно выше самой высокой частоты записываемого звукового сигнала. Практически считают, что частота подмагничивающего тока должна быть, по крайней мере, в пять раз выше верхней частоты звукового сигнала.

Например, при записи звуковых сигналов с верхней частотой 12 кГц частота высокочастотного подмагничивания должна составлять 60 кГц.

§ 5.8. ПРОЦЕСС ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ. ФОНОГРАММА

Записанный на звуконосителе звуковой сигнал, пригодный для последующего воспроизведения, называют фонограммой.

При записи синусоидального сигнала магнитная фонограмма представляет собой как бы цепочку отдельных элементарных магнитиков, расположенных вдоль звуконосителя, области которых определяются частотой записи. Чем выше частота, тем эти области меньше. На рис. 5.17 условно показана магнитная фонограмма. Штриховыми линиями изображены силовые магнитные линии каждого элементарного магнитика, замыкающиеся через воздуш-

ное пространство и характеризующие индукцию (напряженность) внешнего магнитного поля фонограммы. Чем выше частота записанного на звуконосителе сигнала, тем на меньшее расстояние от его поверхности простирается внешнее магнитное поле и, следовательно, тем резче падает напряженность магнитного поля звуконосителя по мере удаления от его поверхности сравнительно с магнитным полем, обусловленным низкочастотной записью. Теперь перейдем к рассмотрению процесса воспроизведения.

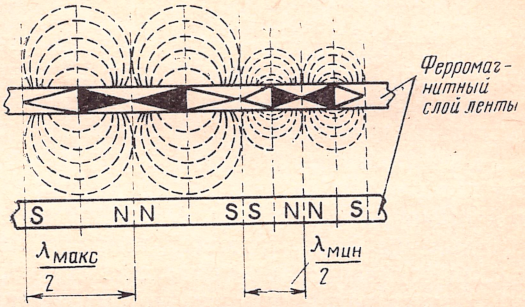


Рис. 5.17. Магнитная фонограмма

Магнитные силовые линии внешнего магнитного поля фонограммы «сцепляются» с сердечником головки воспроизведения, на котором размещены обмотки, и в сердечнике образуется переменный магнитный поток. Изменения магнитного потока в сердечнике вызывают индуцирование в обмотке головки эдс, которая и воспроизводит записанный сигнал. Индуктируемая в обмотке головки воспроизведения эдс пропорциональна амплитуде индукции внешнего магнитного поля фонограммы, числу W витков обмотки и скорости движения звуконосителя или скорости изменения внешнего магнитного поля фонограммы.

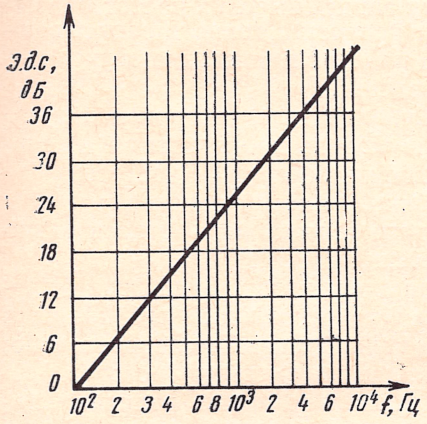


Рис. 5.18. Идеальная частотная характеристика эдс воспроизводящей головки

Скорость изменения внешнего магнитного поля фонограммы будет зависеть от частоты сигнала, записанного на звуконосителе.

Действительно, при записанном сигнале частотой 100 Гц внешнее магнитное поле фонограммы будет изменяться по величине и по направлению 100 раз в 1 с. При воспроизведении же записанного сигнала частотой 200 Гц эти изменения будут соответственно происходить 200 раз за 1 с. Следовательно, увеличение частоты записанного сигнала вдвое приведет к увеличению скорости изменения магнитного потока в сердечнике головки также вдвое, что приведет к удвоению величины индуктируемой в обмотках эдс, т. е. эдс увеличивается на 6 дБ на каждую октаву. Значение 6 дБ получается следующим

образом: если отношение величин эдс на данных частотах равно 2, то логарифм этого отношения равен 0,3 ($20 \lg 2 = 20 \cdot 0{,}3 = 6$ дБ). Таким образом, идеальная частотная характеристика эдс воспроизводящей головки — прямая линия (рис. 5.18).

§ 5.9. ИСКАЖЕНИЯ ПРИ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

Магнитная запись звука, как мы уже видели, сопровождается нелинейными искажениями при неправильно выбранном режиме записи. Кроме нелинейных искажений при записи звука, возникают частотные искажения, помехи, шумы и т. д.

Частотные искажения без принятия соответствующих мер возникают как при записи, так и в процессе воспроизведения. Рассмотрим причины частотных искажений при записи. Электрическое сопротивление записывающей головки носит индуктивный характер и если ток записи не поддерживать постоянным при изменении частоты, то эффективность намагничивания звуконосителя будет уменьшаться с возрастанием частоты записываемого сигнала. И частотная характеристика записи будет иметь завал высоких частот.

Потеря высоких частот при записи происходит и за счет того, что магнитное поле высоких частот быстрее ослабевает, чем магнитное поле низких частот, и поэтому запись высоких частот оказывается хуже, чем низких, даже при равенстве токов в записывающей головке. Поэтому очень важно плотное прилегание звуконосителя к головкам записи и воспроизведения.

Когда сигнал уже записан на звуконосителе, то происходит его саморазмагничивание. Саморазмагничивание проявляется в уменьшении амплитуды остаточной индукции и зависит от частоты.

Известно, что саморазмагничивание намагниченного тела тем значительнее, чем меньше длина этого тела и чем относительно больше площадь его поперечного сечения.

При повышении частоты сигнала происходит уменьшение длины участка намагниченности, из-за чего отношение его длины к площади его поперечного сечения уменьшается. И, следовательно, и эффект саморазмагничивания больше на высоких частотах.

При воспроизведении, как было показано выше, величина напряжения на зажимах воспроизводящей головки с повышением частоты растет. Рост этот ограничивается наличием так называемого щелевого эффекта. Вспомним, как происходит процесс воспроизведения: магнитные силовые линии внешнего магнитного поля фонограммы «сцепляются» с сердечником головки воспроизведения и тогда только возникает в обмотках головки эдс.

Однако есть условия, при которых «сцепление» не происходит и эдс не возникает. Это наблюдается при определенном соотношении ширины зазора воспроизводящей головки и длины волны (частоты) записанного сигнала.

На рис. 5.19. показан ход частотных характеристик отдельных звеньев тракта магнитной записи и воспроизведения звука. Для выравнивания частотной характеристики в тракты записи и воспроизведения вводят специальные корректирующие контуры. Сигнал, записанный на ленту, сопровождается помехами и специфи-

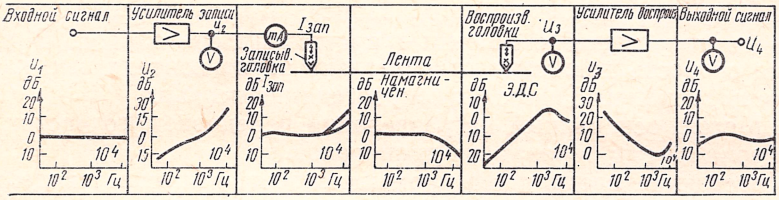


Рис. 5.19. Частотные характеристики отдельных звеньев магнитофона

ческими искажениями, связанными с копир-эффектом. Помехи могут быть вызваны наводками от цепей питания, лентопротяжного механизма, собственными шумами звуконосителя, перекрестным влиянием соседних дорожек записи, самим процессом записи.

§ 5.10. ПРИНЦИПЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ

Магнитный метод записи изображения имеет большие преимущества перед другими методами. При нем отпадает необходимость в процессах фотообработки и фотокопировки. Изображение записывается в виде электрического сигнала, что позволяет осуществлять контроль записи, воспроизводя ее немедленно с магнитной ленты на экране кинескопа.

Записанное изображение можно транслировать по линиям связи. Это особенно важно при передаче телевизионных программ в пункты с различным поясным временем.

Сигналы телевизионного изображения занимают полосу частот от 50 Гц до 3÷5 МГц. Запись такого широкого диапазона частот связана с некоторыми специфическими требованиям к тракту магнитной записи. Известно, что минимальные длины волн, которые возможно записать при данной скорости движения звуконосителя, определяются в основном разрешающей способностью магнитных головок.

Если принять скорость движения звуконосителя, например 38,1 См/с, и записывать полосу частот до 10 кГц, то наименьшая длина волны на ленте будет порядка 38 мкм. Если сохранить эту величину при полосе частот, достигающих 3,5÷5 МГц, то придется увеличить скорость движения звуконосителя в 400 раз, т. е. до 140 м/с. Это следует из известной зависимости $\lambda = v/f$, где λ — длина волны записанных колебаний; f — частота колебаний и v —

скорость движения звуконосителя. Такая скорость практически почти неосуществима.

В настоящее время применяется в основном три метода записи телевизионного изображения:

1. Метод прямой записи. Сигналы телевизионного изображения непосредственно записываются на звуконоситель с высокой скоростью движения.

2. Поперечно-строчной метод записи. Запись производится поперек звуконосителя с помощью вращающихся головок. В этом случае скорость движения относительно звуконосителя высокая, а скорость движения самого звуконосителя невысокая.

3. Метод, основанный на разделении передаваемого частотного диапазона на ряд более узких диапазонов.

В настоящее время наша промышленность выпускает видеомагнитофон, использующий метод поперечно-строчной записи. В видеомагнитофоне применяется частотная модуляция с тем, чтобы иметь возможность записать и низкие, и высокие частоты. Видеомагнитофон состоит из лентопротяжного механизма с блоком магнитных головок, системы автоматического регулирования, каналов видеозаписи и звукового сопровождения. Структурная схема видеоканала магнитофона «Кадр» показана на рис. 5.20. Лента с

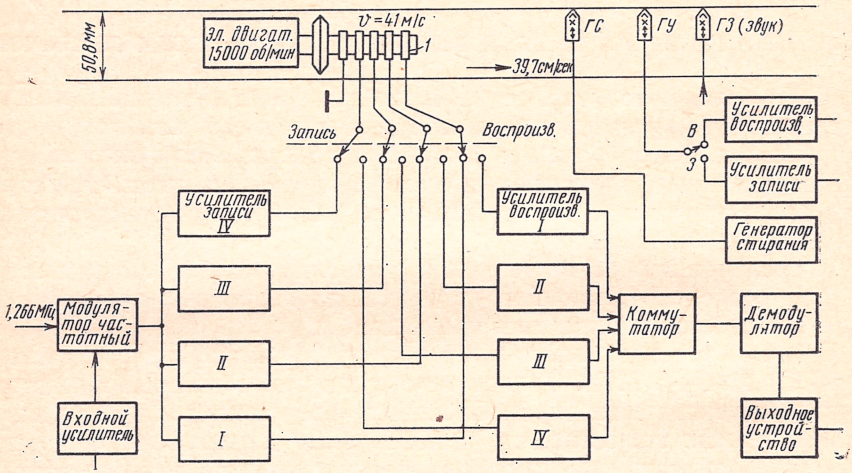


Рис. 5.20. Структурная схема видеоканала и магнитофона «Кадр»

шириной 50,8 мм проходит мимо вращающегося блока с четырьмя головками *1* (условно показанными раздельно). Головки расположены по окружности и разнесены на 90°. Блок головок вращается со скоростью 1500 об/мин, а лента движется со скоростью 39,7 см/с. Сигнал изображения подается через входной усилитель на частотный модулятор. Сигнал преобразуется и подается на четыре усилителя записи и затем на головки. Воспроизведение про-

исходит с помощью этого же блока головок, сигнал усиливается, проходит электронный переключатель и восстанавливается демодулятором. Стирается запись отдельной головкой *(ГС)*. Имеется головка, записывающая сигнал управления *(ГУ)*, который считывается при воспроизведении и управляет системой авторегулирования. Система авторегулирования служит для синхронизации работы видеомагнитофона. Сигнал звукового сопровождения записывается специальной головкой *(ГЗ)*, которая наносит сигнал в верхней части ленты.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о принципе записи и воспроизведении звука при электромеханическом способе записи.
2. Как осуществляется магнитная запись с применением ультразвукового смещения?
3. Нарисуйте структурную схему магнитофона и расскажите о назначении и устройстве его элементов.
4. От чего зависит выбор частоты тока стирания и тока смещения?
5. В чем заключается процесс стирания и процесс воспроизведения магнитной записи звука?
6. Какие искажения возможны при записи и воспроизведении?

Раздел II.
Студии. Звукофикация открытых пространств и закрытых помещений

ГЛАВА ШЕСТАЯ

СТУДИИ

§ 6.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ПОМЕЩЕНИИ

В однородной среде распространение звука происходит прямолинейно во все стороны, поэтому в свободном пространстве звук распространяется в виде сферических волн.

Прямолинейное распространение звуковой волны может быть нарушено каким-либо препятствием, и тогда звук, в зависимости от величины препятствия, либо отражается им, либо огибает его. Если размеры препятствия больше длины волны звука, то звук преимущественно отражается, если же препятствие невелико, то звук огибает его. Препятствие шириной 1 м велико для звука с частотой 1000 Гц (длина волны 0,34 м), но невелико для звука с частотой 100 Гц (длина волны 3,4 м). Явление огибания звука принято называть дифракцией звука.

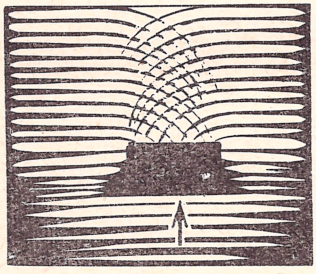


Рис. 6.1. Картина дифракции

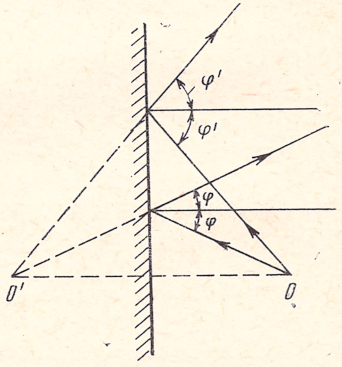


Рис. 6.2. Отражение волн от плоскости

Препятствия изменяют картину звукового поля (рис. 6.1). Помещения имеют ограничивающие поверхности, которые препятствуют распространению звуковой волны, вызывая образование отраженных волн. Познакомимся с этими явлениями.

Отражение звука. Звуковые волны, падая на поверхность под углами φ и φ' (рис. 6.2), отражаются от нее под теми же углами и кажутся наблюдателю выходящими из точки O', которая представляет собой зеркальное отображение источника звука O, называемое мнимым источником. Таким построением можно пользоваться только в том случае, когда отражающая поверхность имеет размеры, бóльшие, чем длина звуковой волны. Если это не так, то важную роль начинает играть явление дифракции.

Волны на поверхности воды при одновременном падении двух камней распространяются независимо друг от друга, и мы говорим о наложении волн; то же самое имеет место и для звуковых волн. Среда может передавать одновременно самые разнообразные звуки различной частоты и амплитуды, идущие по разным направлениям.

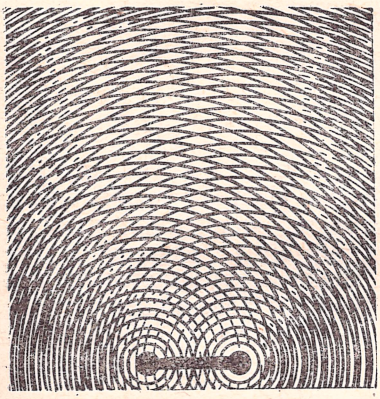


Рис. 6.3. Картина интерференции

В результате наложения двух или бóльшего числа распространяю-

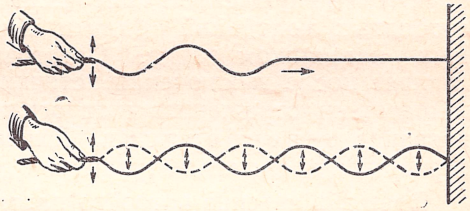


Рис. 6.4. Образование стоячих волн

щихся в воздухе звуковых волн, имеющих одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз, в каждой точке среды образуется новое суммарное колебание. Этот процесс называется интерференцией (рис. 6.3).

Результатом интерференции является, например, образование стоячих волн при отражении. Как образуются стоячие волны, можно наглядно проследить на простом примере. Возьмем кусок веревки в несколько метров длиной и прикрепим один ее конец к стенке, а другой возьмем в руку (рис. 6.4). Если сделать рукой резкое движение вверх и вниз, то по веревке побежит одиночная волна, которая отразится от закрепленного конца и побежит обратно, достигнет руки, отразится от нее и опять побежит к стенке. Если подбрасывать веревку периодически, то получается два ряда волн, налагающихся друг на друга: волны, идущие к стенке, и отраженные волны, идущие от стены. Наложение этих волн приводит к сложной и изменяющейся форме колебаний веревки, но при некоторых значениях периода подбрасываний мы получим так называемые стоячие волны. Более сложная картина образования сто-

ячих волн получается, когда звук распространяется в закрытых помещениях, трубах и вообще в замкнутых объемах.

В помещениях подобное явление носит название «порхающее» эхо. «Порхающее» эхо образуется, когда звуковые волны многократно отражаются двумя или несколькими поверхностями и возвращаются повторно в исходный пункт. Простейшие условия возникновения «порхающего» эха существуют, когда в закрытом помещении поверхности двух параллельных стен отражают, а поверхность остальных стен поглощает звук. Чаще всего такое явление наблюдаетя в вестибюлях, где оно возникает между потолком и полом, покрытым в большинстве случаев плитками, в то время как поверхности боковых стен прерываются лестницами, стеллажами и т. д.

§ 6.2. РЕВЕРБЕРАЦИЯ

Под действием источника звука в помещении возникают свободные и вынужденные колебания воздуха. Частоты возникающих свободных колебаний близки к частотам колебаний, излучаемых источником звука. Остаточное звучание, медленно затухающее после выключения источника звука и обусловленное многократными отражениями от ограждающих поверхностей, носит название р е в е р б е р а ц и и. Длительность этого процесса характеризуется временем затухания.

Время, в течение которого плотность звуковой энергии убывает в 10^6 раз, н а з ы в а е т с я в р е м е н е м с т а н д а р т н о й р е в е р б е р а ц и и или просто временем р е в е р б е р а ц и и. Зависимость времени реверберации от геометрических размеров помещений и от общего количества звукопоглощения в нем определяется формулой Эйринга:

$$T = 0{,}161 \frac{V}{-\ln(1-\alpha_{ср})\, S_{\Sigma}}.$$

Величина $-\ln(1-\alpha_{ср}) \approx \alpha_{ср}$ при $\alpha_{ср}=0{,}2$. Поэтому часто пользуются формулой Сэбина:

$$T = \frac{0{,}161V}{\alpha_{ср}\, S_{\Sigma}}.$$

С увеличением объема помещения увеличивается время пробега волн между двумя последующими волнами и поэтому увеличивается время реверберации; с увеличением звукопоглощения время реверберации уменьшается. Помимо звукопоглощающего действия ограждающих поверхностей, обстановки и находящихся в помещении людей, необходимо учитывать поглощение звука воздухом на высоких частотах (>2000 Гц) в больших по объему помещениях.