

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра систем телекоммуникаций

В. И. Шалатонин

***ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОФОРМЛЕНИЯ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ***

Лабораторный практикум по дисциплине
«Радиовещание и электроакустика»
для студентов специальности
1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения»
дневной формы обучения

УДК 534.86 + 621.395.623.78(075.8)
ББК 32.87 + 32.884.8 я73
Ш 18

Шалатонин, В. И.

Ш 18 Влияние акустического оформления на характеристики электродинамических громкоговорителей: лаб. практикум по дисц. «Радиовещание и электроакустика» для студ. спец. 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» днев. формы обуч. / В. И. Шалатонин. – Минск : БГУИР, 2008. – 32 с. : ил.
ISBN 978–985–488–322–9

Приведено описание лабораторной работы, связанной с изучением влияния акустического оформления на характеристики электродинамических (ЭД) громкоговорителей. Рассмотрены устройство, принцип работы и технические характеристики ЭД громкоговорителей. Приведены основные математические соотношения и эквивалентные схемы, описывающие их работу.

УДК 534.86 + 621.395.623.78(075.8)
ББК 32.87 + 32.884.8 я73

ISBN 978–985–488–322–9

© Шалатонин В. И., 2008
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2008

Цель лабораторной работы

Ознакомиться с методами улучшения показателей качества электродинамических громкоговорителей с помощью акустического оформления. Определить влияние акустического оформления на частотный диапазон и КПД громкоговорителей.

Задание к работе

1. Изучить устройство, принцип работы, технические характеристики громкоговорителей, причины и способы их акустического оформления.
2. Ознакомиться с основными проблемами, которые возникают при создании широкополосных электродинамических громкоговорителей (электроакустические резонансные эффекты, явление акустического короткого замыкания, многорезонансный характер колебательной системы в высокочастотной части звукового диапазона и др.).
3. Изучить принцип измерения и структурную схему лабораторной установки. Ознакомиться с назначением и основными характеристиками устройств и приборов, входящих в лабораторную установку.
4. Выполнить необходимые измерения входного сопротивления и частоты механического резонанса для единичного громкоговорителя в заданном частотном диапазоне: а) без акустического оформления, б) в случае использования закрытого корпуса с фазоинвертором.
5. Построить частотные зависимости входного сопротивления.
6. Провести анализ полученных результатов.

1. Основные теоретические сведения и соотношения

1.1. Физические принципы электроакустического преобразования

Электроакустические преобразователи (ЭП) – это устройства, преобразующие электрическую энергию в акустическую (энергию упругих колебаний среды) и обратно. В зависимости от направления преобразования ЭП могут быть излучателями или приёмниками акустического сигнала. Наибольшее распространение получили электродинамические и электростатические излучатели, которые представляют собой линейные устройства, благодаря чему возбуждают акустическую волну той же формы, что и электриче-

ский сигнал. Кроме того, эти устройства обратимы, т.е. могут работать как излучатели и как приемники звука.

Принцип действия электродинамических преобразователей, наиболее часто встречающихся на практике, основан на использовании закона индукции. На рис. 1.1 показана конструкция электродинамического преобразователя.

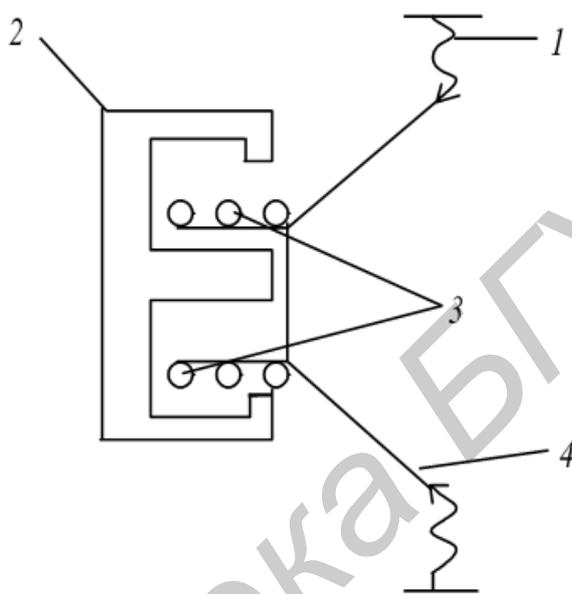


Рис. 1.1. Конструкция электродинамического преобразователя

Звуковая катушка 3, на которую подается входной сигнал, помещается в зазор между полюсами постоянного магнита 2. К каркасу катушки 3 жестко прикреплена мембрана 4, укрепленная на упругой подвеске 1. В соответствии с законом Био–Савара, в результате взаимодействия постоянного поля магнита 2 и переменного магнитного поля, возникающего в катушке при подаче входного напряжения, возникает механическая сила F , равная

$$F = B_0 I l, \quad (1.1)$$

где B_0 – величина магнитной индукции в зазоре постоянного магнита, l – длина провода звуковой катушки, I – переменный ток звуковой частоты через катушку. Эта сила приводит в движение катушку и мембрану. На этом принципе основана работа электродинамического громкоговорителя.

С другой стороны, если находящийся в магнитном поле проводник будет приведен в движение со скоростью v , то в нем возникнет ЭДС

$$E_0 = B_0lv. \quad (1.2)$$

На этом принципе основана работа электродинамического микрофона. Из выражений (1.1) и (1.2) можно определить коэффициент K электромеханической связи для электродинамических преобразователей:

$$K = Bl. \quad (1.3)$$

1.2. Термины и определения. Классификация

В соответствии с общепринятой классификацией термин «громкоговоритель» определяется как преобразователь, позволяющий получить акустические волны из электрических колебаний и предназначенный для излучения акустической мощности в окружающую среду. Этот термин может применяться как к единичным громкоговорителям (ГГ), так и акустическим системам. Под «единичным ГГ» понимается ЭП без какого-либо оформления (loudspeaker unit). Под «акустической системой» понимается устройство, состоящее из акустического оформления (корпуса), одного или нескольких единичных ГГ и других сопутствующих устройств, таких, как фильтры, трансформаторы, регуляторы громкости и тембра и другие пассивные устройства (acoustical system).

Классификация единичных ГГ (далее – просто громкоговорителей) может быть произведена по различным признакам:

- *принципу действия* (электродинамические, электростатические, пьезокерамические, плазменные и др.);
- *способу излучения* (прямого излучения, рупорные);
- *полосе передаваемых частот*: низкочастотные (16...30 – 1500..3000 Гц), среднечастотные (от 200...800 Гц до 5...8 кГц), высокочастотные (от 2...5 до 16...18 кГц и более) и широкополосные (от 50...100 Гц до 16...20 кГц);
- *области применения* (телевизионные, автомобильные, студийные и др.).

В свою очередь электродинамические громкоговорители можно подразделить на катушечные, ленточные и изодинамические. Тип громкоговорителя указывается в его названии: например, 70ГДН – громкоговоритель электродинамический низкочастотный с паспортной мощностью 70 Вт;

20ГДИВ – громкоговоритель изодинамический высоко-частотный с мощностью 20 Вт. Основные параметры ГГ приведены в приложении. Наибольшее распространение в бытовой и профессиональной технике получили электродинамические громкоговорители катушечные конусные (диффузорные) или купольные прямого излучения.

Следует отметить, что единичный ГГ (акустическая система) является последним звеном любого электроакустического тракта и его характеристики часто являются определяющими для всего тракта в целом.

1.3. Устройство электродинамических громкоговорителей

На рис. 1.2 приведена типичная конструкция электродинамического катушечного ГГ.

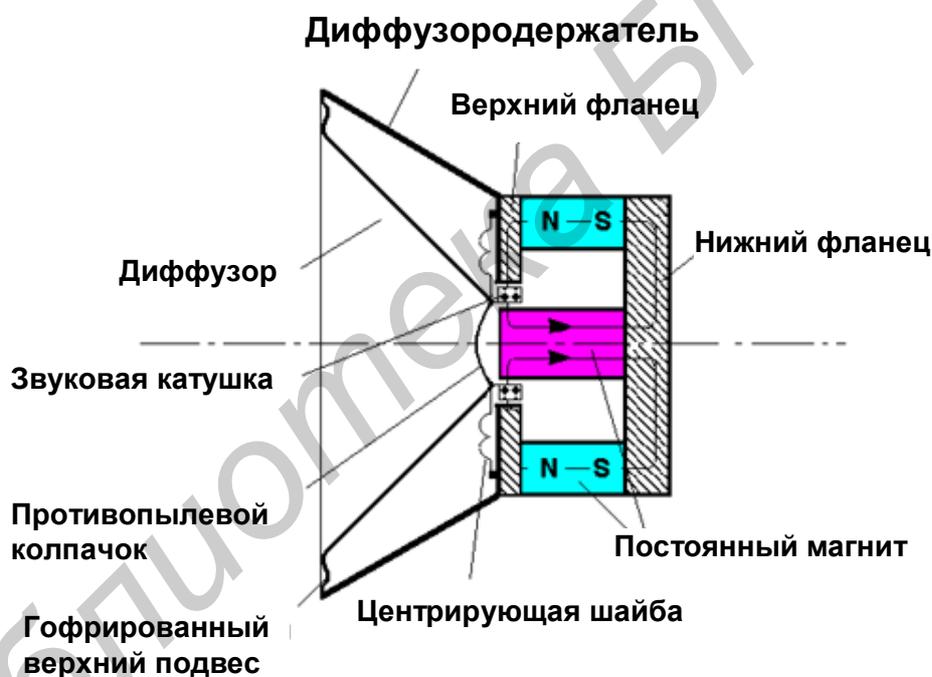


Рис. 1.2. Конструкция электродинамического катушечного громкоговорителя

Звуковая катушка, образованная круглым цилиндрическим каркасом с намотанным на него медным проводом, располагается в кольцевом зазоре магнитной системы. Магнитная система, состоящая из постоянного магнита и магнитопровода (нижний и верхний фланцы, полюсный наконечник в центре), создает в воздушном кольцевом зазоре постоянный магнитный поток. Ток звуковой частоты, проходя через катушку и взаимодействуя с постоянным потоком, создает силу F (1.1), которая приводит в движение катушку и

скрепленную с ней мембрану (диффузор). Диффузор, обычно бумажный, удерживается в нужном положении гибкой центрирующей шайбой, а по внешнему краю – гофрированным подвесом. В подвижную часть ГГ входит также противопоылевой колпачок. Все элементы конструкции соединяются с помощью диффузородержателя. Колебания диффузора передаются в окружающую среду, вызывая возмущение, которое распространяется от ГГ в виде звуковой волны.

Детальный анализ работы ГГ является сложной задачей, связанной с изучением взаимодействия электрических, механических и акустических процессов и явлений в широком диапазоне частот. При моделировании работы ГГ широко применяется метод электромеханических аналогий. В основе этого метода лежит сходство между уравнениями, описывающими колебательные явления разной физической природы – электрические и механические. Элементы заданной механической системы рассматриваются как аналоги элементов некоторой эквивалентной электрической схемы. Анализ эквивалентной схемы производится по известным законам, описывающим процессы в электрических цепях. Этот метод позволяет подойти к расчету сложных ЭП, которыми являются ГГ и микрофоны с позиций электротехники и радиотехники. Система взаимных аналогов – электрических и механических – приводится в литературе по данной тематике. Найденные аналоги носят не только формальный характер, но и имеют определенный физический смысл. Так, аналогия между массой и индуктивностью объясняется тем, что инерция массы препятствует мгновенному изменению скорости при изменении силы, а индуктивность препятствует мгновенному изменению тока при изменении напряжения в цепи.

Энергия заряженного конденсатора аналогична энергии сжатой пружины, пропорциональной степени ее упругости. Часть колебательной электрической энергии расходуется (превращается в тепловую энергию) на активном сопротивлении цепи, а в механической системе из-за трения часть механической энергии колебаний превращается в тепло. Существует также определенная аналогия соединений электрических и механических элементов. Так, аналогом последовательного соединения механических элементов является параллельное соединение соответствующих электрических элементов, а аналогом параллельного соединения механических элементов (узлов) является последовательное соединение соответствующих электрических.

Анализ конструкции электродинамического ГГ (см. рис. 1.2) показывает, что в ее основе лежит последовательная механическая колебательная систе-

ма, состоящая из следующих элементов: массы (диффузор с катушкой), упругости (упругость подвеса диффузора и упругость центрирующей шайбы) и сопротивления потерь в этих элементах. Нижняя граничная частота диапазона воспроизводимых частот в значительной степени определяется частотой механического резонанса излучающей системы. Резонансные частоты современных низкочастотных электродинамических ГГ находятся в диапазоне 25 – 50 Гц.

1.4. Акустическое оформление громкоговорителей

1.4.1. Явление акустического короткого замыкания

Работа электродинамического громкоговорителя характеризуется тем, что излучение звуковой энергии происходит от обеих сторон диффузора. На низких частотах (НЧ), т.е. на тех частотах, где диаметр диффузора много меньше длины излучаемой волны, диффузор колеблется как жесткий поршень, каждая точка которого движется синфазно с одинаковой колебательной скоростью. Другими словами, на НЧ громкоговоритель можно рассматривать как систему с сосредоточенными параметрами. Будем называть волны, излучаемые правой и левой сторонами такого поршня (диффузора), соответственно прямой и обратной волной. При движении поршня, например вправо, с правой его стороны образуется сжатие частиц среды. В это же время с левой его стороны произойдет их расширение. При обратном ходе поршня картина изменится на обратную.

Таким образом, можно утверждать, что прямая и обратная волны всегда находятся в противофазе. Назовем этот сдвиг по фазе начальным ($\varphi_{\text{нач}} = \pi$).

Работа ГГ в области НЧ усложняется тем, что обратная волна огибает излучающий поршень и, попадая, например, в правое полупространство, складывается с прямой волной в той или иной фазе. При их синфазном сложении произойдет усиление колебаний, при противофазном – ослабление.

Огибая диффузор, обратная волна проходит дополнительный путь $\delta r \approx 2r_d$, где r_d – радиус излучающего поршня (диффузора). При этом у обратной волны происходит дополнительный сдвиг по фазе $\varphi_{\text{доп}} = 2\pi\delta r/\lambda$. Таким образом, суммарный сдвиг по фазе между прямой и обратной волнами составит

$$\varphi_{\text{сум}} = \varphi_{\text{нач}} + \varphi_{\text{доп}} = \pi + 2\pi\delta r/\lambda. \quad (1.4)$$

В области НЧ $\delta r \ll \lambda$, поэтому дополнительный сдвиг $\varphi_{\text{доп}} \cong 0$. Следовательно, суммарная разность фаз между прямой и обратной волнами $\varphi_{\text{сум}} = 0$, т.е. обратная волна будет находиться в противофазе с прямой и полностью ее погасит. Это означает, что звуковое давление будет близко к нулю, и соответственно процесса переноса звуковой энергии от излучателя не возникнет.

Такое явление называется акустическим коротким замыканием (АКЗ). Описанное явление будет иметь место во всей области НЧ, где соблюдается условие

$$\delta r \ll \lambda. \quad (1.5)$$

При повышении частоты длина волны λ уменьшается, и на некоторой частоте f_1 дополнительный путь обратной волны станет равным половине длины волны, т.е. $\delta r = \lambda/2$. В этом случае, как следует из (1.4), $\varphi_{\text{доп}} = \pi$ и, следовательно, $\varphi_{\text{сум}} = \varphi_{\text{нач}} + \varphi_{\text{доп}} = 2\pi$. Это означает, что обе волны находятся в фазе, что приведет к усилению колебаний.

Если δr станет равным двум полуволнам (частота f_2 на рис. 1.3), то $\varphi_{\text{доп}} = \pi$, а $\varphi_{\text{сум}} = \pi + 2\pi = 3\pi$. Это равносильно тому, что обе волны будут находиться в противофазе и произойдет ослабление колебаний.

Этот процесс будет происходить периодически до тех пор, пока с повышением частоты не станет выполняться условие

$$\delta r > \lambda. \quad (1.6)$$

В этом случае размеры излучателя станут больше длины волны, и она в состоянии обогнуть излучатель (диффузор). С исчезновением дифракции исчезнет и явление АКЗ.

Если принять во внимание только явление АКЗ, то частотная характеристика (ЧХ) создаваемого излучателем звукового давления будет иметь вид, изображенный на рис. 1.3. Как видно из этого рисунка, во всей области НЧ звуковое давление практически отсутствует вплоть до частоты f_1 .

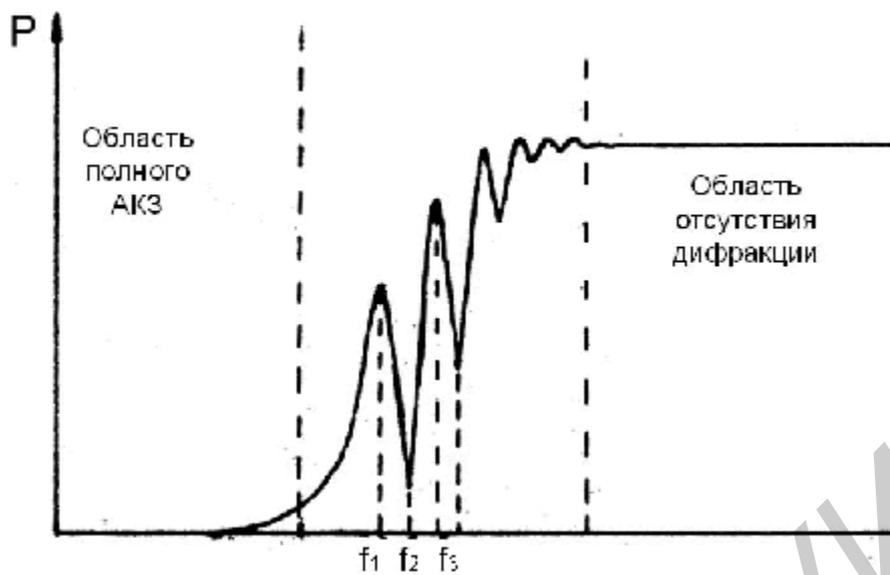


Рис. 1.3. Частотная характеристика звукового давления излучающего поршня (диффузора) для низких и средних частот

Если взять единичный ГГ с диаметром диффузора, например 25 см, то частота f_1 , на которой произойдет первое усиление колебаний, составит 680 Гц. Действительно, из вышеизложенного следует, что $\delta r = 25 \text{ см} = \lambda/2$, отсюда $\lambda = 50 \text{ см}$ и $f_1 = c/\lambda = 340/0,5 = 680 \text{ Гц}$ ($c = 340 \text{ м/с}$ – скорость звука в воздушной среде). Это означает, что у такого ГГ эффективность излучения будет весьма низкой вплоть до частоты $f_1 = 680 \text{ Гц}$. В следующем разделе будет показано, что если бы не явление АКЗ, то ГГ мог бы достаточно эффективно излучать звуковую энергию во всем диапазоне НЧ, начиная с частоты f_m механического резонанса подвижной системы ГГ. Как уже отмечалось в подразд. 1.3, эта частота составляет 25–50 Гц для низкочастотных ГГ.

Специальное акустическое оформление единичных ГГ позволяет либо исключить явление АКЗ, либо значительно уменьшить его воздействие. Рассмотрим кратко основные виды акустического оформления единичных громкоговорителей.

1.4.2. Акустический экран

Этот вид оформления представляет собой щит определенных размеров с отверстием, в котором установлен ГГ. Идея применения акустического экрана состоит в увеличении дополнительного пути δr обратной волны с его помощью до такой величины, чтобы первое усиление колебаний произошло на нижней частоте f_n рабочего диапазона частот. При этом график ЧХ, изображенный на рис. 1.3, сместится влево, в область более низких частот, так

чтобы частоты f_n и f_1 совпадали. Однако для обеспечения необходимых значений δr необходимы экраны с неприемлемо большими размерами. Для уменьшения габаритов края экрана заворачивают, т.е. получают ящик с открытой задней стенкой.

Неприятным фактом является также значительная неравномерность частотной характеристики на частотах, превышающих f_1 . Для уменьшения неравномерности ЧХ громкоговоритель размещают в отверстии, выполненном несимметрично относительно центра экрана. При этом пути δr со всех сторон будут разными, что приведет к более равномерной ЧХ.

1.4.3. Акустическое оформление закрытого типа

Закрытый корпус (рис. 1.4) обеспечивает полное разделение звуковых полей, образуемых передней и задней сторонами поверхности диффузора ГГ, что является его основным достоинством. При таком оформлении явление АКЗ отсутствует во всем диапазоне частот.

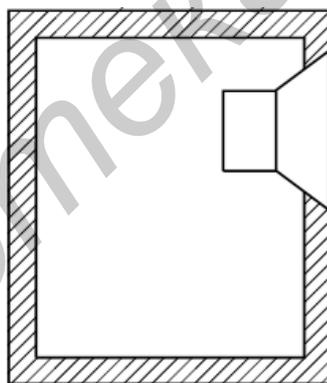


Рис. 1.4. Акустическое оформление закрытого типа

Однако закрытые корпуса имеют и недостаток, заключающийся в том, что в процессе излучения волны диффузор должен преодолевать дополнительную упругость воздуха в объеме ящика. Наличие этой дополнительной упругости приводит к тому, что повышается резонансная частота подвижной системы ГГ. А так как именно она является нижней рабочей частотой акустической системы (АС), то это означает сужение частотного диапазона со стороны низких частот, причем тем больше, чем меньше внутренний объем ящика.

Наличие замкнутого объема воздуха неприятно еще и тем, что внутри ящика возникают резонансные колебания воздушного объема в области частот, где его размеры сравнимы с длиной волны или больше ее. Возникающие резонансные колебания значительно увеличивают неравномерность частотной характеристики громкоговорителя. На резонансных частотах появляются так называемые пики и провалы. Для борьбы с этими явлениями внутреннюю поверхность ящика покрывают слоем звукопоглощающего материала или им заполняется весь внутренний объем. В качестве поглотителя используют капроновую вату, базальтовое волокно и т.п. В некоторых АС для борьбы с внутренними отражениями и резонансами используют специальные структуры из клиньев, помещенных внутрь корпуса. Эта идея заимствована у конструкторов безэховых звуковых камер и дает хорошие результаты.

Заполнение внутреннего объема поглотителем одновременно обеспечивает и акустическое демпфирование подвижной системы ГГ, что улучшает ее переходную характеристику за счет увеличения затухания системы. При слабом демпфировании затухание собственных колебаний подвижной системы ГГ после подачи на катушку электрического импульса продолжается довольно долго (0,1 – 0,5 с), искажая форму импульсов речи или музыки. Затухающие колебания могут попасть на следующий звуковой импульс и тем самым значительно исказить первичный сигнал, сопровождая его призвуками, отсутствующими в оригинальном сигнале.

Демпфирующее влияние на подвижную систему ГГ оказывает и выходной каскад усилителя. Чем меньше его выходное сопротивление, тем больше будет величина тока ЭДС, наводящейся в катушке при ее движении, и соответственно больше будет и тормозящая сила, образованная этим током. Поэтому современные усилители звуковой частоты выполняются, как правило, с малым выходным сопротивлением.

Таким образом, преимуществом такого оформления являются простота и хорошие переходные характеристики акустической системы, недостатком – сложность получения достаточно низкой граничной рабочей частоты. Причина этого уже упоминалась выше и заключается в том, что общая упругость системы повышается, а это приводит к увеличению частоты механического резонанса громкоговорителя и соответственно к повышению нижней граничной частоты диапазона рабочих частот акустической системы. Этот недостаток акустического оформления во многом удалось преодолеть в акустических системах с фазоинвертором.

1.4.4. Акустическая система с фазоинвертором

Этот вид акустического оформления представляет собой закрытый ящик с двумя отверстиями. В одном отверстии устанавливается ГГ, второе отверстие, обычно снабженное отрезком трубы, остается открытым (рис. 1.5). В такой конструкции за счет упругости воздуха в ящике и массе воздуха в трубе создается вторая колебательная система (резонатор Гельмгольца). Упругость объема воздуха в ящике резонирует на определенной частоте с массой воздуха в отверстии. Эта частота называется резонансной частотой f_{ϕ} фазоинвертора. Можно показать, что подвижная система ГГ ведет себя как последовательный колебательный контур, а фазоинвертор – как параллельный. Обратная волна, возбуждаемая в объеме ящика, как уже отмечалось в п. 1.4.1, находится в противофазе с прямой волной, излучаемой передней стороной диффузора, т.е. $\phi_{\text{нач}} = \pi$.

Идея использования фазоинвертора состоит в том, чтобы повернуть фазу обратной волны еще на π , т.е. на $\phi_{\text{доп}} = \pi$. В результате обратная волна, излучаемая слоем воздуха в отверстии, оказалась бы в фазе с прямой. В таком устройстве получилось бы два излучателя, работающих синфазно при

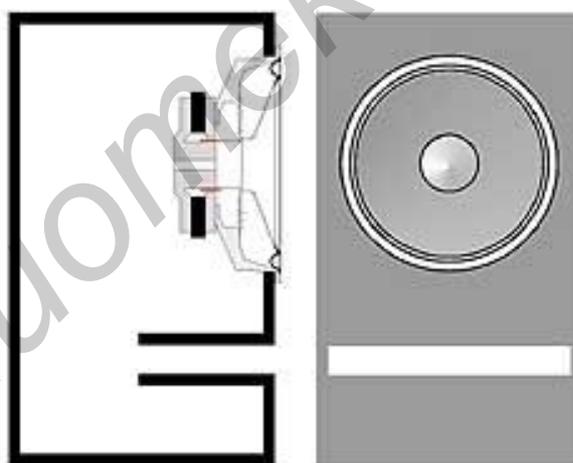


Рис. 1.5. Конструкция фазоинвертора

использовании только одного ГГ. Одним из них являлся бы сам диффузор ГГ, другим – слой воздуха в отверстии. При равенстве площадей диффузора и слоя воздуха в отверстии можно добиться почти удвоения звукового давления на акустической оси и, таким образом, значительного увеличения КПД единичного ГГ в диапазоне НЧ.

Необходимое изменение фазы обратной волны достигается с помощью резонатора Гельмгольца, о формировании которого в приведенной конструк-

ции упоминалось выше. Обычно параметры резонатора фазоинвертора подбирают таким образом, чтобы его резонансная частота f_ϕ равнялась частоте f_m механического резонанса подвижной части ГГ. Из теории электрических цепей известно, что в двух связанных контурах помимо основного резонанса появляются две дополнительные резонансные частоты, расположенные ниже и выше частоты основного резонанса $f_\phi = f_m$. Можно показать, что и в этом случае лицевая поверхность диффузора и слой воздуха в отверстии колеблются синфазно не только на резонансной частоте фазоинвертора, но и на примыкающих (более низкой и более высокой) частотах. Это позволяет расширить рабочий диапазон работы ГГ в сторону более низких частот. При дальнейшем увеличении частоты все больше сказывается инерционность воздуха в канале фазоинвертора и его наличие на СЧ и ВЧ практически не влияет на работу акустической системы. Для подавления резонансов воздушного объема ящика в области средних и высоких частот его внутренняя поверхность покрывается (как и в случае закрытого корпуса) звукопоглощающим материалом.

Описанное конструктивное решение позволяет существенно понизить нижнюю граничную частоту рабочего диапазона АС. При одинаковом КПД и равных размерах корпуса закрытой и фазоинверсной АС акустическая система с фазоинвертором имеет в 1,26 раза меньшую нижнюю граничную частоту. Если же сконструировать оба типа АС так, чтобы у них были одинаковые размеры корпуса и равные нижние граничные частоты, то акустическая система с фазоинвертором будет иметь на 3 дБ больший КПД, чем АС закрытого типа.

Существенно также, что при одинаковом КПД и равных нижних рабочих частотах АС с фазоинвертором будет иметь существенно меньшие размеры в сравнении с АС закрытого типа. Необходимо однако отметить, что использование акустического оформления с фазоинвертором ухудшает (по сравнению с АС закрытого типа) переходные характеристики и усложняет согласование АС с усилителем звуковой частоты.

Разновидностью акустического оформления фазоинверсных АС являются акустические системы с пассивным излучателем (диффузором). Для повышения уровня звукового давления на низких частотах в них используется дополнительный пассивный излучатель, представляющий собой часть громкоговорителя (без звуковой катушки и магнитной системы). Принцип действия этого излучателя подобен работе описанного выше фазоинвертора. Путем изменения массы диффузора и гибкости его подвеса частота резонанса

пассивного излучателя настраивается на нижнюю рабочую частоту ГГ. Звуковая волна, возбуждаемая этим излучателем, складывается со звуковой волной, излучаемой ГГ, что существенно повышает уровень звукового давления акустической системы на нижних частотах.

Помимо перечисленных существуют и другие, реже используемые виды акустического оформления громкоговорителей.

2. Моделирование работы электродинамических громкоговорителей

2.1. Частотная характеристика излучаемой акустической мощности

Электрическая мощность, подводимая к ГГ, в значительной степени теряется в обмотке звуковой катушки и расходуется на преодоление силы трения в подвижной системе. Только небольшая ее часть (не более 5 %) излучается в воздух в виде акустической мощности P_a . Используя метод электромеханических аналогий, можно записать, что

$$P_a = 0,5 v^2 r_s, \quad (2.1)$$

где v – колебательная скорость частиц среды около диффузора, r_s – активная составляющая сопротивления излучения. Как известно, активная составляющая сопротивления излучения r_s определяется волновым сопротивлением среды, равным произведению $rc_{зв}$ (r – плотность воздуха, $c_{зв}$ – скорость звука), площадью излучающей поверхности $S_{\Pi} = \pi r_d^2$, волновыми размерами источника, т.е.

$$r_s = rc_{зв} S_{\Pi} k^2 r_d^2 / (1 + k^2 r_d^2), \quad (2.2)$$

где $r = 1,29$ кг/м³, $k = 2\pi/\lambda$, r_d – радиус диффузора. Учитывая выражение (1.2), а также то, что механическое сопротивление $z = F/n$, можно записать

$$P_a = 0,5 F^2 r_s / |z|^2. \quad (2.3)$$

Величина тока, потребляемого электродинамическим преобразователем, равна

$$I = U/|Z|, \quad (2.4)$$

где U – напряжение входного сигнала, $|Z|$ – модуль полного электрического сопротивления преобразователя. С учетом (1.1) силу, действующую на катушку, можно представить в виде

$$F_0 = B_0 l U/|Z|. \quad (2.5)$$

Акустическая мощность, излучаемая ГГ, получается подстановкой (2.5) в (2.3):

$$P_a = 0,5 r_s (B_0 l U / |Z| |z|)^2. \quad (2.6)$$

Полное электрическое сопротивление электродинамических преобразователей Z зависит от индуктивности L звуковой катушки, активного сопротивления R и внесенного электрического сопротивления, которое определяется длиной провода катушки (l) и индукцией магнитной цепи (B). С учетом изложенного выражение для полного электрического сопротивления может быть записано в виде

$$Z = R + j 2\pi f l + (B_0 l)^2/z. \quad (2.7)$$

Для области частот, меньших частоты f_m механического резонанса, анализ выражения (2.1) приводит к следующей зависимости акустической мощности от частоты входного сигнала:

$$P_a = C_1 f^4, \quad (2.8)$$

где C_1 – величина, не зависящая от частоты. Таким образом, излучаемая акустическая мощность в диапазоне от низших частот до f_m растет примерно пропорционально четвертой степени частоты (12 дБ на октаву). На участке в области резонанса излучаемая мощность максимальна.

На средних частотах обычно $|Z| \approx R$, и анализ изменения акустической мощности излучения показывает, что

$$P_a = C_2, \quad (2.9)$$

где C_2 – величина, не зависящая от частоты. Теоретически в этой области частотная характеристика горизонтальна, т.е. мощность сохраняется постоянной.

На высоких частотах возрастает влияние индуктивной составляющей электрического сопротивления звуковой катушки в соответствии с выражением (2.7), а активная составляющая сопротивления излучения остается постоянной. При этом акустическая мощность излучения

$$P_a = C_3/f^2, \quad (2.10)$$

где C_3 – величина, не зависящая от частоты. Это равносильно уменьшению мощности излучения на 6 дБ на октаву.

Рассмотренная характеристика $P_a(f)$ не учитывает распределенный характер колебательной системы и связанные с этим резонансные явления. Необходимо также учитывать, что более информативной является частотная характеристика звукового давления p , так как она определяет субъективное восприятие громкости на различных частотах звукового диапазона.

В области низких и частично средних частот, где $r_d \ll \lambda$, диффузор колеблется как жесткий поршень, каждая точка которого движется синфазно с одинаковой колебательной скоростью. Эффективность излучения мала, а характеристика направленности мало отличается от сферы и зависимость звукового давления от частоты $p(f)$ примерно совпадает с зависимостью $P_a(f)$ излучаемой мощности от частоты.

В области критической частоты, где $r_d \approx \lambda$, и на более высоких частотах диффузор теряет свою жесткость и отдельные его части могут колебаться в противофазе. Это приводит к появлению резких пиков и провалов в зависимости $p(f)$, особенно когда в противофазе колеблются диффузор и его гибкий подвес, так как их площади соизмеримы.

На высоких частотах, когда $r_d \gg \lambda$, диффузор уже нельзя рассматривать как идеальный поршневой излучатель и моделирование механизма излучения ГГ значительно усложняется. На частотной характеристике наблюдается значительное количество мелких пиков и провалов, обусловленных сложным характером колебаний диффузора. Потери на вихревые токи в магнитной системе, а также электрическое и механическое сопротивления подвижной системы растут с ростом частоты, что приводит к резкому спаду зависимости $p(f)$.

На рис. 2.1 показан визуализированный характер колебаний диффузора (метод голографической интерферометрии): на низких частотах (от нижней частоты рабочего диапазона до частоты примерно 300 – 400 Гц для конусных

ГГ средних размеров) колебания диффузора носят поршневой характер; на средних частотах (примерно 300–1500 Гц) на диффузоре формируется волновая картина распределения амплитуд и фаз с радиальными узловыми линиями; на высоких частотах (более 1500 Гц) формируются резонансы с радиальными узловыми линиями, которые с ростом частоты постепенно смещаются к наружному подвесу, амплитуда их уменьшается и, начиная с частоты примерно 2000 Гц, они перестают играть существенную роль. Основное влияние на АЧХ оказывают резонансы с окружными узловыми линиями (рис. 2.1, в). Этим резонансным частотам обычно соответствуют пики и провалы на АЧХ в области средних и высоких частот. На них обычно накладываются интерференционные пики и провалы на АЧХ за счет дифракционных процессов вблизи диффузора ГГ (см. рис. 1.3). Для уменьшения



Рис. 2.1. Картина колебаний диффузора ГГ:

а – область низких частот (НЧ); б – область средних частот (СЧ);
в – область высоких частот (ВЧ)

амплитуды колебательных процессов применяются различные меры с целью увеличения демпфирования в материале диффузора (пропитка, смазка, выбор оптимальной формы образующей и т.д.).

2.2. Входное электрическое сопротивление электродинамических громкоговорителей

Важной характеристикой громкоговорителей, во многом определяющей их частотные и энергетические характеристики, является частотная зависимость входного электрического сопротивления (2.7):

$$Z = Z_{\text{к}} + Z_{\text{вн}} = Z_{\text{к}} + B_0^2 l^2 / z, \quad (2.11)$$

где $Z_k = R + j\omega L$ – собственное сопротивление звуковой катушки ГГ, а $Z_{вн} = B_0^2 l^2 / z$ – внесенное сопротивление. В общем случае величина $Z_{вн}$ является комплексной величиной и зависит как от длины провода катушки и индукции в магнитной цепи, так и от полной механической проводимости, учитывающей влияние активных и реактивных проводимостей механической части ГГ и акустической среды. Известно, что сопротивление механической системы с одной степенью свободы записывается в виде

$$z = r_m + r_s + j\omega m + 1/j\omega c, \quad (2.12)$$

где r_m, r_s – активные составляющие механического сопротивления ГГ и акустического сопротивления излучения (2.2) соответственно; $m = m_m + m_s$, где m_m – механическая масса подвижной части ГГ, m_s – присоединенная (колеблющаяся совместно с диффузором) масса воздуха; c – суммарная гибкость подвеса подвижной части ГГ. Тогда внесенное сопротивление, обусловленное электромеханическим преобразованием, запишется как

$$Z_{вн} = B_0^2 l^2 / z = B_0^2 l^2 / [(r_m + r_s + j\omega m + 1/(j\omega c))]. \quad (2.13)$$

Из последнего выражения легко получить, что вносимая проводимость $Y_{вн} = 1/Z_{вн}$ может быть записана как

$$Y_{вн} = 1/R\zeta + j\omega C\zeta + 1/j\omega L\zeta \quad (2.14)$$

где $R\zeta = B_0^2 l^2 / (r_m + r_s)$ – внесенное активное сопротивление, $C\zeta = (m_m + m_s) / (B_0^2 l^2)$ – внесенная емкость, $L\zeta = B_0^2 l^2 c$ – внесенная индуктивность.

Таким образом, для анализа частотной зависимости входного сопротивления ГГ необходимо учитывать электрические, механические и акустические процессы, происходящие при работе электродинамического преобразователя. На рис. 2.2 представлена упрощенная эквивалентная электрическая схема единичного ГГ в бесконечном акустическом экране. Из анализа этой схемы можно определить частотную зависимость полного электрического сопротивления ГГ. Типичное изменение модуля полного входного сопротивления $|Z|$ приведено на рис. 2.3. По горизонтальной оси отложено от-

ношение f/f_M , где f_M – частота механического резонанса ГГ, обусловленная элементами L и C' , т.е. $f_M = 1/2\pi (mc)^{1/2} = 1/2\pi(LC')^{1/2}$. (2.15)

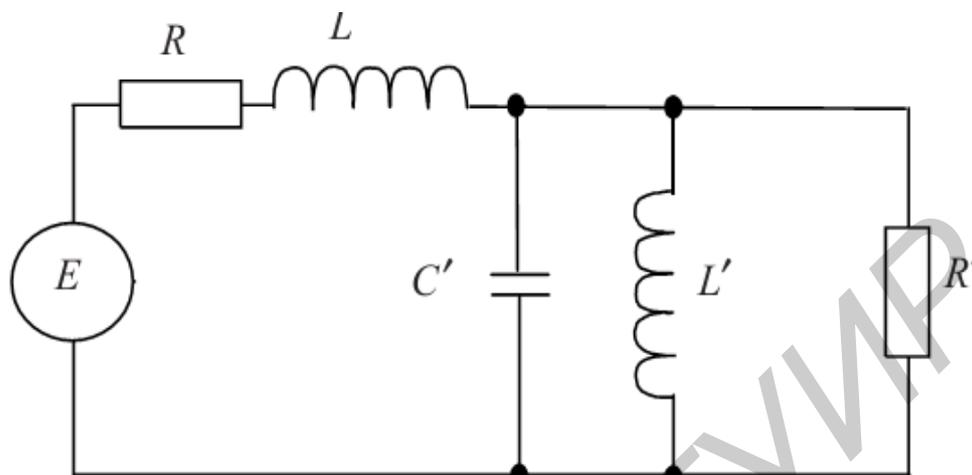


Рис. 2.2. Эквивалентная электрическая схема единичного громкоговорителя в бесконечном акустическом экране

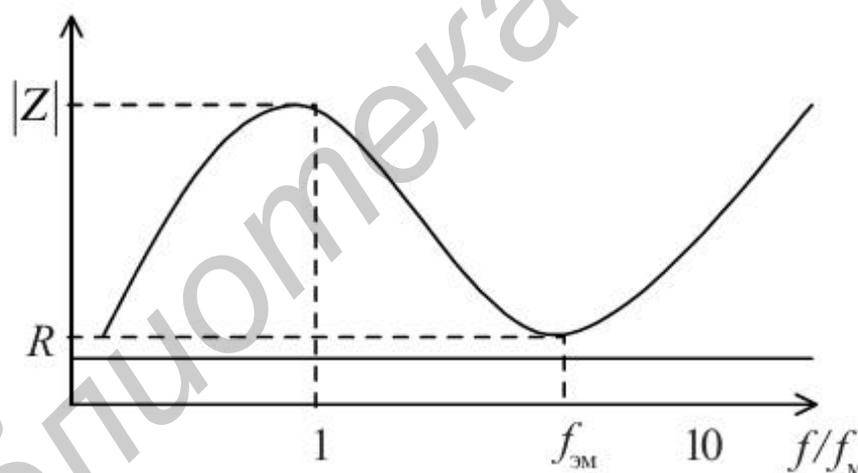


Рис. 2.3. Типичная частотная зависимость входного сопротивления громкоговорителя

При $f = 0$, т.е. на постоянном токе, входное сопротивление минимально и равно активному сопротивлению звуковой катушки. С ростом частоты возрастает и $|Z|$, достигая максимума на частоте механического резонанса (2.15). Этот максимум соответствует частоте основного резонанса подвижной системы ГГ. Физически этот максимум объясняется тем, что на частоте резонанса подвижная система колеблется с максимальной амплитудой скорости и противоэлектродвижущая сила, индуцируемая при движении катушки в магнитном поле (1.2), дос-

тигает максимума. При переходе через резонансную частоту f_m с ростом f/f_m реактивная компонента Z меняет характер с индуктивного на емкостное сопротивление. При этом $|Z|$ падает из-за того, что наступает электромеханический резонанс в последовательном контуре, состоящем из индуктивного сопротивления катушки L и вносимого емкостного сопротивления C . Минимальное значение $|Z|$ достигается на частоте $f_{эм}$ электромеханического резонанса. Далее к высоким частотам доминирующим становится индуктивное сопротивление звуковой катушки и входное сопротивление ГГ увеличивается. В конструкциях ГГ, выпускаемых промышленностью, электромеханический резонанс выражен весьма слабо: модуль входного сопротивления достигает минимального значения, которое обычно нормируется и с ростом частоты величина R практически не изменяется в большей части рабочего диапазона частот. И только на частотах, где эффективность работы ГГ заметно уменьшается, наблюдается рост входного сопротивления. Входное сопротивление ГГ, т.е. сопротивление на частоте механического резонанса, обычно приводится в паспорте. В соответствии с принятыми стандартами оно выбирается из следующих значений: 2, 4, 8, 15, 25 и 50 Ом (см. приложение).

Частотная зависимость входного сопротивления ГГ с акустическим оформлением типа «фазоинвертор» не имеет столь выраженного неравномерного характера. Это связано с тем, что, как уже отмечалось в п. 1.4.4, в колебательной системе из двух связанных контуров помимо основного резонанса имеются дополнительные резонансы, частоты которых расположены ниже и выше частоты $f_{ф} = f_m$. При этом важно, что резонаторы, формирующие эти частоты, являются параллельными. Это приводит к росту входного сопротивления ГГ на этих частотах. В то же время, как указывалось в п. 1.4.4, резонатор фазиинвертора является последовательным. Это вызывает значительное уменьшение сопротивления ГГ на частоте f_m (см. рис. 2.3). Таким образом, частотная зависимость входного сопротивления ГГ в АС с фазиинвертором имеет более равномерный характер в области НЧ. В области средних и высоких частот эта зависимость останется неизменной (см. п. 1.4.4).

3. Лабораторная установка для исследования частотной зависимости входного сопротивления электродинамических громкоговорителей

В лабораторной работе используется следующее оборудование: звуковой генератор гармонических сигналов ГЗ-109, цифровой измеритель сопротивления В7-46 (2 прибора), двухканальный осциллограф С1-137, работаю-

щий в режиме осциллографа, проволочное переменное сопротивление, плавно регулируемое в диапазоне от 1 до 60 Ом, единичный громкоговоритель 8ГДШ-2 (или другого типа) и такой же ГГ с акустическим оформлением закрытого типа с фазоинвертором. Перечисленные приборы, подключенные в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.1, позволяют провести необходимые измерения.

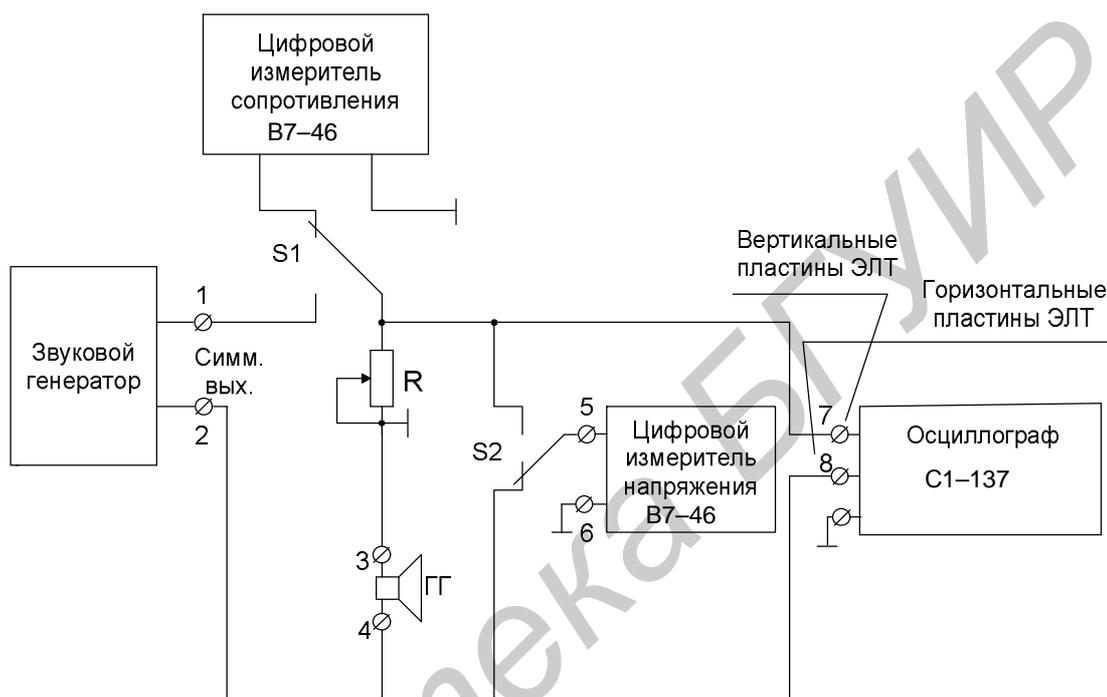


Рис. 3.1. Структурная схема лабораторной установки для измерения входного сопротивления громкоговорителя

В лабораторной установке используется метод замещения, рекомендуемый ГОСТ 16122 – 87. Сущность этого метода заключается в том, что с помощью специальной установки, путем выполнения необходимых регулировок и измерений добиваются равенства двух последовательно соединенных сопротивлений: одно из которых представляет собой обычный резистивный потенциометр (перестраиваемое сопротивление), а второе – является модулем активного сопротивления ГГ на некоторой частоте. После этого величина сопротивления потенциометра, которая равна модулю входного сопротивления ГГ, измеряется на постоянном токе обычным измерителем сопротивления.

В соответствии с рис. 3.1 гармонический сигнал с выхода генератора через переключатель S1 (нижнее положение) может подаваться на последовательно соединенные потенциометр R и звуковую катушку ГГ. В верхнем

положении этого переключателя звуковой генератор отключается от схемы и одновременно потенциометр R подключается к измерителю сопротивления В7-46. Процесс измерения заключается в следующем. После включения приборов и подачи необходимого сигнала с выхода звукового генератора (переключатель $S1$ в нижнем положении), необходимо с помощью вольтметра, подключенного к зажимам 5–6, измерить напряжение на потенциометре R (переключатель $S2$ в верхнем положении) и на звуковой катушке ГГ (переключатель $S2$ в нижнем положении). Измеренные напряжения, как правило, не равны друг другу. Для определения значения входного сопротивления ГГ необходимо добиться их равенства. Нетрудно заметить, что в этом случае величина сопротивления потенциометра R становится равной модулю входного сопротивления ГГ на частоте подаваемого сигнала.

Движок потенциометра R выведен на переднюю панель лабораторного макета, поэтому путем соответствующей регулировки и контроля указанных напряжений нетрудно добиться их примерного равенства. После завершения процесса регулировки значение сопротивления ГГ может быть получено с помощью измерителя сопротивления (переключатель $S1$ в верхнем положении). Для проведения измерений используется многофункциональный прибор В7-46, работающий в режиме измерения сопротивления. Аналогичные измерения проводятся и для других значений частоты генератора при сохранении уровня напряжения на его выходе. Осциллограф С1-137, на экране которого появляются фигуры Лиссажу, позволяет получить более точное значение частоты механического резонанса ГГ.

4. Порядок выполнения работы

1. Внимательно изучить предыдущие разделы. Проверить степень подготовки с помощью контрольных вопросов.
2. Проверить правильность подключения приборов к лабораторному макету. Установить регулятор выхода генератора ГЗ-109 в крайнее левое положение.
3. Подключить единичный громкоговоритель 8ГДШ-2 (или другого типа, по согласованию с преподавателем) к соответствующим гнездам макета. Громкоговоритель установить таким образом, чтобы расстояние от его диффузора до отражающей поверхности было не менее 0,5 метра.
4. Поставить движок потенциометра R в среднее положение. Поставить переключатель $S1$ в положение Ген.

5. Установить одинаковый уровень усиления обоих каналов осциллографа. Значение уровня усиления выбрать исходя из предполагаемой величины напряжения на выходе генератора (см. ниже, п. 7).

6. Включить измерительные приборы и осциллограф. Отключить развертку обоих каналов осциллографа.

7. Установить необходимые параметры сигнала на выходе генератора: выходное напряжение $U = 1$ В, нижняя граничная частота $F = 20$ Гц. При использовании другого типа ГГ приведенные значения напряжения и нижней граничной частоты могут быть изменены.

8. Еще раз внимательно прочитать п. 3. Используя изложенную там методику, измерить величину входного сопротивления ГГ.

9. После консультации с преподавателем, убедившись в правильности полученного результата, продолжить измерения для более высоких частот. Наименьший частотный интервал между измеряемыми значениями частотной зависимости (порядка 10 – 15 Гц) необходимо обеспечить в области частоты механического резонанса. В этой области небольшие изменения частоты приводят к значительным изменениям величины входного сопротивления ГГ (см. рис. 2.3). С ростом частоты частотный интервал между измерениями можно постепенно увеличивать. Это связано с тем, что исследуемая зависимость на этих частотах имеет плавный характер. Измерения необходимо закончить на частоте, соответствующей значению R , в 3 – 4 раза большему минимального значения измеренного сопротивления.

10. Выставить частоту сигнала генератора, приблизительно равную измеренной частоте механического резонанса ГГ, т.е. частоте, на которой модуль входного сопротивления достигает наибольшего значения. С помощью фигуры Лиссажу на экране осциллографа убедиться, что выставленная частота действительно является частотой механического резонанса. В случае резонанса на экране должна наблюдаться прямая линия, наклоненная примерно под углом 45 градусов к горизонтальной линии. Это означает, что при одном и том же токе через потенциометр и звуковую катушку напряжения и их фазы на этих элементах также равны. В случае наличия другой фигуры, например эллипса, необходимо подстройкой частоты генератора добиться прямой линии на экране. Записать полученное более точное значение частоты механического резонанса.

11. Установить регулятор уровня выхода генератора в крайнее левое положение. Вместо единичного ГГ подключить к макету ГГ с акустическим оформлением закрытого типа с фазоинвертором.

12. Смотри п. 7.
13. Измерить частотную зависимость входного сопротивления ГГ с акустическим оформлением от частоты (см. пп. 8,9).
14. С помощью осциллографа, аналогично п. 10, уточнить значения дополнительных резонансных частот (ниже и выше частоты механического резонанса единичного ГГ).
15. Привести органы регулировки лабораторного макета в исходное состояние. Выключить оборудование.

5. Содержание отчета

1. Цель работы и метод измерений.
2. Структурная схема измерительной установки с указанием типа используемого оборудования и громкоговорителей.
3. Результаты измерений, представленные в виде таблицы.
4. Частотные зависимости, построенные по результатам измерений. При построении частотной оси использовать логарифмический масштаб.
5. Значение частоты механического резонанса единичного громкоговорителя. Сравнить полученную величину со значением, приведенным в паспорте на громкоговоритель.
6. Выводы, объясняющие результаты, полученные при выполнении исследований по пп. 9, 10, 13.

6. Контрольные вопросы

1. Каким методом измеряется модуль полного входного сопротивления электродинамического громкоговорителя?
2. Какими элементами конструкции громкоговорителя определяются частоты механического и электромеханического резонансов?
3. Назначение и принцип действия фазоинвертора.
4. Как выбрать резонансную частоту фазоинвертора?
5. Приведите схему электрического аналога электродинамического громкоговорителя с акустическим оформлением закрытого типа. Поясните физические процессы, которые моделируют элементы схемы.
6. Составьте схему электрического аналога механоакустической колебательной системы громкоговорителя, работающего в закрытом корпусе с фазоинвертором. Поясните назначение элементов схемы.

7. Какими элементами определяется входное сопротивление громкоговорителя на низких и высоких частотах рабочего диапазона?

8. Объясните работу схемы измерений входного сопротивления громкоговорителя.

9. Какова природа акустического короткого замыкания, на каких частотах оно проявляется и почему?

10. Каковы особенности работы громкоговорителя в закрытом корпусе?

11. Назовите основные преимущества и недостатки фазоинверсной акустической системы.

Литература

1. Радиовещание и электроакустика: учеб. пособие для вузов связи / С. И. Алябьев [и др.]; под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Радио и связь, 2002. – 792 с.

2. Алдошина, И. А. Электродинамические громкоговорители / И. А. Алдошина. – М. : Радио и связь, 1989. – 272 с.

3. Шкритек, П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике / П. Шкритек; пер. с нем. – М. : Мир, 1991. – 446 с.

4. Акустика: справочник / А. П. Ефимов [и др.]; под ред. М. А. Сапожкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 336 с.

5. Шалатонін, В. І. Электраакустыка і радыёвяшчанне: Асноўныя ўласцівасці маўлення і слыху : вучэб. дапаможнік. / В. І. Шалатонін. – Мінск : БДУІР, 1997. – 79 с.

6. Петров, П. Н. Акустика. Электроакустические преобразователи : учеб. пособие / П. Н. Петров. – СПб. : ГУАП, 2003. – 80 с.

Основные параметры громкоговорителей

Параметры качества громкоговорителей, приведенные ниже, определены в ГОСТ 16122-78, ГОСТ 23262-83, а также в рекомендациях МЭК 268-5 и 581-7.

Неравномерность АЧХ звукового давления – это отношение максимального значения звукового давления к минимальному в заданном диапазоне частот. Ее обычно выражают в децибелах. В рекомендациях МЭК 581-7, определяющих минимальные требования к аппаратуре Hi-Fi, указано, что неравномерность АЧХ звукового давления не должна превышать ± 4 дБ в полосе частот 100...8000 Гц. В лучших моделях акустических систем класса Hi-Fi достигнуто значение ± 2 дБ.

Среднее звуковое давление рассчитывается по результатам измерений на тональных сигналах звукового давления в диапазоне частот

$$p_{\text{cp}} = [n^{-1} (p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2)]^{0,5},$$

где $p_1 \dots p_n$ – звуковое давление, измеренное на n частотах, входящих в заданный диапазон частот, выбранных с интервалом 1/3 октавы.

Среднее стандартное звуковое давление $p_{\text{ст}}$ – среднее звуковое давление, развиваемое в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии l от рабочего центра при подведении к громкоговорителю напряжения, соответствующего подводимой электрической мощности 0,1 Вт.

Рабочий центр ГГ – обычно геометрический центр симметрии выходного отверстия излучателя. Для сложных излучателей рабочий центр указывается в описании громкоговорителей.

Рабочая ось ГГ – обычно совпадает с геометрической осью излучателя; для сложных излучателей указывается в описании ГГ.

В справочниках иногда приводится номинальное звуковое давление $p_{\text{ном}}$, отличающееся от среднего стандартного тем, что оно определяется при подведении номинальной электрической мощности $P_{\text{ном}}$.

Эффективно воспроизводимый диапазон частот – это диапазон частот, в пределах которого уровень звукового давления понижается на некоторое заданное значение по отношению к уровню, усредненному в определенной полосе частот. Иначе говоря, АЧХ уровня звукового давления не должна выходить за пределы заданного поля допусков. Измерения АЧХ выполняют в заглушенной камере в условиях дальнего звукового поля, т.е. на расстоянии более 0,5...1,0 м. В ряде моделей акустических систем класса Hi-Fi диапазон частот достигает 20...40 000 Гц, в среднем же он составляет 35...20 000 Гц.

Характеристическая чувствительность E_x – отношение среднего звукового давления $p_{ср}$, развиваемого громкоговорителем в номинальном диапазоне частот на рабочей оси на расстоянии 1 м от рабочего центра, к корню квадратному из подводимой электрической мощности P_e .

Для расчетов часто пользуются понятием осевой чувствительности громкоговорителя по напряжению. Обычно ее называют просто чувствительностью, под которой понимают отношение звукового давления p_1 , развиваемого на рабочей оси на расстоянии l метров от рабочего центра громкоговорителя в свободном поле, к подводимому напряжению, т.е. $E_{ос} = p_1/U$. Эта чувствительность зависит от частоты. Характеристическую чувствительность чаще всего выражают в децибелах по отношению к стандартному порогу слышимости, равному $2 \cdot 10^{-5}$ Па. В большинстве моделей АС класса Hi-Fi уровень характеристической чувствительности составляет 86...90 дБ (его часто записывают, например, как 86...90 дБ/м/Вт). В отдельных высококачественных широкополосных моделях АС он может составлять 93...95 дБ/м/Вт. В АС категории Hi-Fi, предназначенных для стереофонического воспроизведения, нормируется также расхождение АЧХ каналов стереопары. Оно не должно превышать 2 дБ при сравнении уровней звукового давления, усредненных в одинаковых октавах в диапазоне частот 250...8000 Гц. Фазочастотные и переходные характеристики громкоговорителей пока не нормируются, хотя они и важны для слухового восприятия.

Нелинейные искажения. Гармонические искажения в соответствии с рекомендацией МЭК оцениваются суммарным коэффициентом гармоник. Его определяют как корень квадратный из отношения суммы квадратов значений звукового давления всех гармоник, начиная со второй, к значению суммы квадратов звуковых давлений всех составляющих и выражают в процентах.

Измерения выполняются в заглушенной камере на синусоидальном сигнале при мощности, соответствующей среднему уровню звукового давления, равного 90 дБ (усреднение производят в диапазоне частот 100...8000 Гц). При измерениях обычно ограничиваются суммированием по второй и третьей гармоникам. Для АС класса Hi-Fi минимальные требования по этому параметру предъявляются в полосе частот 250...1000 Гц – около 2 %, затем линейный спад от 2 до 1 % в полосе частот 1...2 кГц и далее 1 % в полосе частот от 2 до 6,3 кГц. Измерения коэффициента гармоник на верхних частотах не дают достоверной оценки нелинейных искажений, так как продукты нелинейности оказываются за пределами рабочей полосы частот АС. Для получения дополнительной информации измеряют также коэффициент интермодуляционных искажений. Наряду с суммарным коэффициентом гармоник для оценки АС используют также коэффициенты гармоник n -го порядка (чаще всего второго и третьего).

Характеристика направленности – зависимость звукового давления p , развиваемого громкоговорителем в точках свободного поля (находящихся на одинаковом расстоянии от рабочего центра), от угла между рабочей осью громкоговорителя и направлением на указанную точку. Обычно эту характеристику нормируют по отношению к осевому звуковому давлению $p_{ос}$:

$$R(q) = P_q / P_{ос}, \text{ при } r = \text{const.}$$

Характеристика направленности изменяется в зависимости от частоты, поэтому ее измеряют или на ряде частот, или для заданной полосы частот. Характеристику направленности, снятую в плоскости, называют диаграммой направленности. Диаграмму направленности обычно изображают в полярных координатах. При этом радиус-вектор соответствует величине $R(q)$. Иногда диаграмма направленности строится для значений $20 \lg R(q)$, т.е. в децибелах. Ее определяют для ряда плоскостей, проходящих через рабочую ось. Если излучатель громкоговорителя имеет осевую симметрию, то его характеристика направленности тоже будет иметь осевую симметрию. В этом случае достаточно иметь характеристику направленности только для одной плоскости. В большинстве случаев достаточно иметь диаграммы направленности для двух взаимно перпендикулярных плоскостей.

Направленность ГГ характеризуют коэффициентом осевой концентрации W . Коэффициентом осевой концентрации называют отношение квадратов величин звукового давления, измеренных в условиях свободного поля на

определенном расстоянии от рабочего центра громкоговорителя: на рабочей оси (P_{oc}^2) и усредненного по всем радиальным направлениям ($P_{ср}^2$), исходящим из рабочего центра:

$$W = P_{oc}^2 / P_{ср}^2.$$

Следовательно, для ненаправленных громкоговорителей коэффициент осевой концентрации равен единице, так как $P_{ср} = P_{oc}$, а для направленных – больше.

В рекомендациях МЭК 581-7 характеристика направленности нормируется при измерениях АЧХ под углами $\pm(20...30)$ градусов в горизонтальной плоскости и $\pm(5...10)$ градусов в вертикальной плоскости. При этом отклонения от АЧХ, измеренной на оси в диапазоне частот 250...8000 Гц, не должны превышать ± 4 дБ.

Электрические мощности. В ГОСТ 16122-78, ГОСТ 23262-83 нормируются две мощности: номинальная и паспортная.

Номинальная электрическая мощность определяется нормируемым коэффициентом гармоник. Обычно ее величину указывают в наименовании акустической системы, например, 35АС-012 – номинальная мощность 35 Вт.

Паспортная электрическая мощность определяется тепловой и механической прочностью громкоговорителя и проверяется при подведении к нему в течение 100 ч специально взвешенного корректирующей цепью сигнала типа розового шума с пик-фактором, равным двум. Обычно ее величина выше номинальной мощности (например, для акустической системы типа 35АС-012 паспортная мощность составляет 90 Вт).

В рекомендациях МЭК используют следующие виды электрических мощностей:

- характеристическая, при которой АС обеспечивает заданный уровень среднего звукового давления, равный 94 дБ на расстоянии 1 м;
- паспортная, при которой АС может длительное время работать без механических и тепловых повреждений при подведении специального шумового сигнала (совпадает с паспортной мощностью, определенной в вышеуказанных документах);
- максимальная синусоидальная мощность – мощность непрерывного синусоидального сигнала в заданном диапазоне частот, при которой АС может длительное время работать без механических и тепловых повреждений;

- долговременная максимальная мощность – мощность, которую АС выдерживает без механических и тепловых повреждений в течение 1 мин при таком же испытательном сигнале, как и при оценке паспортной мощности;
- кратковременная максимальная мощность – мощность, которую АС выдерживает при испытаниях на сигнале типа розового шума в течение 1 с. Испытания повторяются 60 раз с интервалом в 1 мин.

Номинальное электрическое сопротивление (входное сопротивление $Z_{вх}$) имеет важное значение при выборе усилителя мощности. Обычно оно составляет 4 или 8 Ом. В АС это сопротивление имеет комплексный характер и зависит от частоты. При этом минимальное значение модуля полного электрического сопротивления АС не должно отличаться от заданного номинального значения более чем на 20 %. По частотной характеристике модуля полного электрического сопротивления можно определить частоту основного механического резонанса f_m громкоговорителя. На этой частоте модуль полного электрического сопротивления громкоговорителя имеет максимальное значение.

Коэффициент полезного действия громкоговорителя. В паспортных данных КПД громкоговорителя обычно не приводится. Вместо него указывают стандартное звуковое давление или характеристическую чувствительность, однозначно связанные между собой и с акустической мощностью. Если подвести к громкоговорителю электрическую мощность $P_э=0,1$ Вт, то согласно определению стандартного звукового давления $P_{oc}=P_{cm}$. Типичное значение КПД громкоговорителя находится в пределах нескольких процентов.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель лабораторной работы.....	3
Задание к работе.....	3
1. Основные теоретические сведения и соотношения	3
1.1. Физические принципы электроакустического преобразования.....	3
1.2. Термины и определения. Классификация.....	5
1.3. Устройство электродинамических громкоговорителей.....	6
1.4. Акустическое оформление громкоговорителей.....	8
1.4.1. Явление акустического короткого замыкания.....	8
1.4.2. Акустический экран.....	10
1.4.3. Акустическое оформление закрытого типа.....	11
1.4.4. Акустическая система с фазоинвертором.....	13
2. Моделирование работы электродинамических громкоговорителей	15
2.1. Частотная характеристика излучаемой акустической мощности	15
2.2. Входное электрическое сопротивление электродинамических громкоговорителей.....	18
3. Лабораторная установка для исследования частотной зависимости входного сопротивления электродинамических громкоговорителей	21
4. Порядок выполнения работы.....	23
5. Содержание отчета.....	25
6. Контрольные вопросы.....	25
Литература.....	26
Приложение. Основные параметры громкоговорителей.....	27

Учебное издание

Шалатонин Валерий Иванович

***ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОФОРМЛЕНИЯ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ***

Лабораторный практикум по дисциплине
«Радиовещание и электроакустика» для студентов специальности
1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения»
дневной формы обучения

Редактор Т. Н. Крюкова
Корректор Е. Н. Батурчик
Компьютерная верстка Е. Г. Бабичева

Подписано в печать 09.10.2008.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,9.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 50 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,98.
Заказ 163.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6