

УДК 621.3.535.2

К ВОПРОСУ О РАВНОЙ ГРОМКОСТИ ЗВУКОВ РАЗНЫХ ЧАСТОТ

© 2023 г. В. А. Зверев^а, И. Н. Диденкулов^{а, *}, В. Н. Голубев^а^аИнститут прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: diniap@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2023 г.

После доработки 12.03.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Обсуждаются кривые равной громкости звуков разных частот и частотные характеристики слуха. Показано, что кривые равной громкости не описывают частотную характеристику слуха и применимы только к тональным сигналам. Частотная характеристика слуха является адаптивной к спектру звука. Для музыки формируется широкополосная частотная характеристика, для речи используется частотная характеристика с подавлением низких частот.

Ключевые слова: кривые равной громкости, слух, частотная характеристика, адаптивность

DOI: 10.31857/S0320791923600336, EDN: QSFCJQ

ВВЕДЕНИЕ

Кривые равной громкости разных частот [1–4] представляют собой ансамбль частотных характеристик (ЧХ) слуха, полученных на тональных сигналах (рис. 1) и неявно считаются ЧХ слуха для всех типов сигналов. Обращает на себя внимание тот факт, что полученные таким образом ЧХ слуха зависят от уровня входного сигнала. В обычных линейных системах этого нет, и ЧХ определяются обычно по тональным сигналам. Поэтому мы выполнили ряд опытов по проверке ЧХ слуха и их связи с кривыми равной громкости. Результаты этих опытов показывают, что ЧХ слуха не описывается кривыми равной громкости и изменяется в зависимости не только от уровня звука, а и от формы спектра входного сигнала. Другими словами, частотная характеристика слуха является адаптивной, которая формируется для того, чтобы услышать интересующий нас звук. Такая же ситуация возникает в задачах оптимального приема сигналов любой природы, в результате чего формируется ЧХ, которая подавляет помеху и выделяет интересующий сигнал [5].

ПАРАДОКС ФОРТЕПИАНО

Парадокс фортепиано продемонстрируем на примере синтезатора, на котором звуки рояля извлекаются из записей звуков концертного рояля. Почему мы выбрали электронный инструмент, а не традиционный механический? Есть два преимущества электронного рояля перед механическим. Первое и главное в том, что у синтезатора есть возможность изменять уровень звучания в

широких пределах от максимума до нуля. Второе преимущество в том, что мы точно знаем, что звук синтезатора создается громкоговорителями, обладающими ограниченной мощностью и не способными издавать звуки выше уровня 100 дБ.

Прежде всего, заметим, что музыкальный звук рояля не является тональным сигналом, а содержит широкий спектр обертонов, каждый из которых представляет собой тональный сигнал. В связи с этим возможны две концепции применения кривых равной громкости к звукам рояля. В звуке рояля, согласно [1–4], мы слышим основной тон, а обертоны придают тону тембр. Можно применять кривые равной громкости к слышимому нами основному тону. С другой стороны, кривые равной громкости получены на тональных сигналах и возможно их применение к каждому тону спектра звука ноты [3]. Это вторая концепция использования кривых равной громкости. Рассмотрим обе концепции.

Согласно первой концепции применим кривые равной громкости к слышимому нами основному тону Ля субконтроктавы, имеющему основную частоту 27.5 Гц. Пусть этот звук слышен нами с такой же громкостью, что и громкая речь 80 дБ. Такого уровня звука можно легко добиться от электронного инструмента. Для получения звука такой слышимой громкости на частоте 27.5 Гц, уровень производимого звука должен превышать 100 дБ. Парадокс состоит в том, что этот инструмент такого мощного звука издать не может.

Попробуем сделать невероятное предположение, что синтезатор издает звук на частоте 27.5 Гц на 30 дБ громче, чем на частоте ноты Ля первой

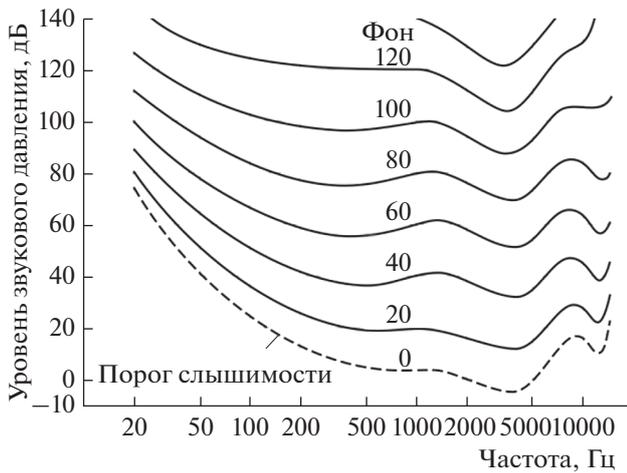


Рис. 1. Кривые равной громкости.

октавы частоты 440 Гц. Теперь при этом предположении убавим общую громкость звучания инструмента на 60 дБ, перейдя на кривую 20 дБ.

Извлечем звук ноты Ля первой октавы частоты 440 Гц на уровне 20 дБ. Это чуть слышимый звук. Посмотрим теперь на рис. 1, чтобы узнать, что мы услышим на частоте 27.5 Гц. На этой частоте при уровне звука, на 30 дБ превышающем уровень 20 дБ, уже нет кривых равной громкости, так как уровень громкости 50 дБ лежит ниже порога слышимости на частоте 27.5 Гц. Таким образом, нажимая на клавишу ноты Ля субконтроктавы частотой 27.5 Гц, мы ничего не должны слышать. Но этот звук слышен примерно с той же громкостью, что и звук ноты Ля первой октавы частотой 440 Гц. Этот факт явно противоречит тому, что следует из кривых равной громкости.

Мы показали парадокс фортепиано на звуке одной ноты. А как он будет проявляться в музыке? Действие кривых равной громкости на музыку описано в [1], где Э.И. Вологдин предупреждает, что если запись музыки слушать тихо с меньшим уровнем громкости, чем она была при записи, то пропадет или значительно ослабнет низкочастотный аккомпанемент. Покажем, что это не так. Нам на помощь приходит Бетховен.

Бетховен написал знаменитую “Аппассионату” как бы специально для того, чтобы проверить парадокс фортепиано. В начале сонаты мелодия звучит то очень низко, то высоко или идет вверх и

вниз. Мы предлагаем всем послушать запись начала “Аппассионаты” Бетховена громко и предельно тихо, чтобы убедиться, что музыка звучит практически одинаково, без явных потерь, что также противоречит кривым равной громкости. Согласно кривым равной громкости мы не должны слышать “Аппассионату” целиком при ее тихом исполнении, а ее слышно, в чем каждый может лично убедиться.

ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЛУХА ФОРМИРУЕТСЯ С УЧЕТОМ СПЕКТРА ЗВУКА

Перейдем к объяснению парадоксов, связанных с кривыми равной громкости. На основе описанных выше парадоксов можно сделать вывод, что кривые равной громкости на самом деле значительно сложнее, чем это принято считать. Они зависят не только от уровня звука, а и от того, что это за звук, каков его спектр, что невозможно отобразить на одном простом графике.

Если, например, мы хотим услышать шум листвы, то для этого формируется ЧХ, обладающая максимумом в области низких частот, где сосредоточен спектр шума листвы. Для музыки формируется иная ЧХ, а именно, близкая к плоской в широком диапазоне.

Как это происходит? Это сложный вопрос физиологии и психологии слуха, на который пока нет ответа.

Таким образом, можно утверждать, что ЧХ слуха, определяемая классическим методом по тональному сигналу, не является истинной ЧХ слуха. На самом деле, ЧХ слуха является адаптивной, т.е. формируется с учетом спектра принимаемых звуковых сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вологдин Э.И. Слух и восприятие звука. Курс лекций. СПб., 2012.
2. Галембо А.С. Фортепиано. Качество звучания. М.: Легпромбытиздат, 1987. 168 с.
3. Алдошина И.А. Основы психоакустики. 1999.
4. Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. Учебник для вузов. СПб.: Композитор-Санкт-Петербург, 2017. 720 с.
5. Зверев В.А., Стромков П.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.