

О чувствительности акустических систем и связанных вещах

Для начала введём несколько величин. 😊

Амплитуда звукового давления p - максимальное дополнительное давление, возникающее в среде при прохождении звуковых волн, выражается в Паскалях (Па).

Колебательная скорость v - произведение амплитуды колебаний частиц среды на угловую частоту, единица - метр в секунду (м/с). При замене частиц среды на диффузор динамика получим амплитуду скорости движения диффузора.

Сила звука I - отношение потока звуковой энергии через поверхность, перпендикулярную направлению распространения звука, к площади этой поверхности, единица - ватт на квадратный метр (Вт/м^2). Сила звука I равна произведению амплитуды звукового давления на колебательную скорость: $I = pv$.

Удельное акустическое сопротивление Z_s - отношение амплитуды звукового давления к колебательной скорости: $Z_s = p/v$, единица - паскаль-секунда на метр ($\text{Па}\cdot\text{с/м}$). Удельное акустическое сопротивление Z_s является характеристикой среды и для газа в идеальном случае равно произведению его плотности на скорость звука в нём (для "среднего" воздуха имеем $340.3 \text{ м/с} \cdot 1.225 \text{ кг/м}^3 = 417 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$).

Таким образом, сила звука пропорциональна квадрату амплитуды звукового давления:

$$I = p^2/Z_s.$$

Интенсивность звука J - величина, подобная силе звука, однако не идентичная ей. Примерно такую же ситуацию мы наблюдаем для силы света (единица - Кандела) и силы излучения (единица - Ватт на стерадиан) соответственно. Саму интенсивность звука используют лишь качественно.

Стандартная интенсивность звука соответствует силе звука $I = 1 \text{ пВт/м}^2$ при частоте сигнала 1 кГц и амплитуде звукового давления $p = 20 \text{ мкПа}$ (при этом Z_s равно $p^2/I = 400 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$ - величина, близкая к характерной для воздуха). Сравните это определение с определением единицы силы света:

"Кандела равна силе света в заданном направлении монохроматического источника при частоте излучения 540 ТГц и силе излучения в этом направлении $1/683 \text{ Вт/ср}$ ".

Громкость звука – субъективная характеристика, она определяется интенсивностью звука, пропорциональной квадрату амплитуды звукового давления, и восприимчивостью органа слуха, зависящей от частоты звука. Для заданной частоты **уровень восприятия в первом приближении линейно связан с логарифмом интенсивности**. В акустике не учитывают зависимость восприимчивости от частоты и измеряют **уровень громкости звука (SPL, Sound Power Level)** по относительной шкале. Нулевой уровень SPL соответствует стандартной интенсивности звука. Как и любую относительную величину, SPL измеряют в децибелах (дБ): десять децибел, или один бел, соответствуют увеличению интенсивности в 10 раз, 20 дБ – в 100 раз и т.д. Таким образом, **при увеличении амплитуды звукового давления в 2 раза интенсивность звука растёт в 4 раза, а уровень громкости растёт примерно на 6.02 дБ**.

Неразбериха возникает из-за того, что амплитуду звукового давления называют просто звуковым давлением, путая её с интенсивностью звука, которую, в свою очередь, иногда называют интенсивностью звукового давления (расшифровывая SPL как Sound Pressure Level), а её логарифм в 2 раза больше логарифма амплитуды звукового давления.

Амплитуда звукового давления, создаваемая динамиком, в идеальном случае

пропорциональна амплитуде электрического сигнала (напряжения), подаваемого на него, при этом **интенсивность звука пропорциональна квадрату амплитуды электрического сигнала**. Подводимая мощность при этом пропорциональна квадрату напряжения, так же, как и интенсивность звука, и поэтому **мощность пропорциональна интенсивности звука**.

Аналогия между акустическим и электрическим сигналами может быть проиллюстрирована формулами:

$P \sim U^2/R = I^2 \cdot R$, P - подводимая мощность, U - амплитуда напряжения, I - амплитуда силы тока, R - сопротивление динамика;

$J \sim p^2/Z_s = v^2 \cdot Z_s$, J - интенсивность звука, p - амплитуда звукового давления, v - амплитуда скорости частиц среды (колебательная скорость), Z_s - удельное акустическое сопротивление среды.

Таким образом, **отношение** интенсивности звука (на фиксированном расстоянии от источника) к подводимой мощности постоянно, и логарифм этого отношения соответствует **чувствительности источника** (динамика).

Дополнительная неразбериха возникает из-за измерения чувствительности в **дБ/(Вт/м)**: на самом деле в децибелах измеряется уровень громкости, соответствующий логарифму интенсивности звука, который, в отличие от самой интенсивности, не пропорционален мощности, и отношение "дБ/Вт" на самом деле не имеет физического смысла. Здесь подразумевается, что перед отнесением к мощности **уровень громкости нужно потенцировать по основанию $10^{0.1} = 1.2589254...$** . Т.е., если на динамик подали сигнал мощностью 1 Вт, и на расстоянии 1 м он создал уровень громкости 85 дБ, то при подаче 2 Вт от создаст не 170, а 88.01 дБ SPL, поскольку $2 \cdot 10^{8.5} = 10^{8.801}$. Кроме того, **условность есть и в том, что метр входит в знаменатель, причём в минус первой степени**: здесь подразумевается, что SPL измеряется на расстоянии 1 метр, но не учитывается то, что интенсивность звука ослабевает пропорционально **квадрату расстояния до источника**. Т.е., если наш динамик создал 85 дБ SPL при мощности 1 Вт на расстоянии 1 м, то для того, чтобы он создал те же 85 дБ на расстоянии 2 м, необходимо подать не 2, а 4 Вт. Таким образом, **удобнее всего выражать чувствительность в дБ/Вт**, исключая метры из единицы измерения, но подразумевая, что SPL измеряется на расстоянии 1 м от источника. **Иногда используют единицу дБ/(Вт/м²)**, что формально отражает квадратичную зависимость от расстояния, но **также неверно с точки зрения физического смысла**, т.к. чувствительность определяется лишь логарифмом отношения интенсивности звука к подводимой мощности, и при этом **никакого деления мощности на площадь не происходит**, просто мы логарифмируем размерную величину (так уж повелось, да простят нас физики; впрочем, всегда можно прикрыться домножением интенсивности на квадрат расстояния до источника). Отношение к площади есть в единице силы звука Вт/м², но здесь подразумевается совершенно иная мощность, а именно акустическая, отношение которой к подводимой мощности есть КПД источника звука.

Можно теоретически **рассчитать чувствительность источника при КПД, равном 100%**. В этом случае весь 1 Вт подводимой мощности перейдёт в акустическую, и при излучении в пространство (т.е. в телесный угол $4 \cdot \pi$ стерадиан) эта мощность на расстоянии в 1 м распределится по площади, равной $4 \cdot \pi \text{ м}^2 = 12.566... \text{ м}^2$, а сила звука составит $0.079577... \text{ Вт/м}^2$. Десятичный логарифм отношения этой величины к стандартной 1 пВт/м^2 равен $10.90079...$, и, таким образом, **максимальная чувствительность** в стандартной среде (т.е. в которой звуковое давление при силе звука 1 пВт/м^2 на частоте 1 кГц равно 20 мкПа) **равна 109.0079... дБ/Вт**. При излучении же в полупространство ($2 \cdot \pi$ ср) площадь рассеяния падает вдвое, а максимальная чувствительность возрастает до $112.0182... \text{ дБ/Вт}$, т.е. при разном акустическом оформлении мы получаем разную чувствительность источника в оформлении при том же КПД.

При подаче на одинаковые динамики одного и того же сигнала (т.е. динамики работают в одной системе) акустические сигналы в идеальном случае складываются без потерь. **Для двух параллельно соединённых динамиков** (т.е. без изменения уровня электрического сигнала, подаваемого на динамик, а, следовательно, и мощности) амплитуда звукового давления увеличивается в 2 раза, её квадрат - в 4 раза, а **уровень громкости - на 6 дБ** (скажем, был 85 дБ, стал 91 дБ). При этом мощность сигнала, идущего на систему (в нашем примере 2 Вт), вдвое выше, чем мощность сигнала, который подавался на один динамик (1 Вт), поскольку напряжение осталось тем же, а сопротивление уменьшилось в 2 раза. В результате **чувствительность системы из двух параллельно соединённых динамиков на 3 дБ/Вт больше** (т.е. 88 дБ/Вт), чем чувствительность одного динамика (85 дБ/Вт), поскольку она выдаёт 91 дБ при подаче 2 Вт мощности. **Чувствительность же каждого динамика** в системе, отнесённая к подаваемой на него мощности, **остаётся прежней: 85 дБ/Вт**, и **никакого нарушения закона сохранения энергии** либо повышения КПД динамика не происходит. **Если же динамики соединить последовательно**, то сопротивление увеличивается в 2 раза, а напряжение, подаваемое на каждый динамик, уменьшается в 2 раза, и компенсирует рост амплитуды звукового давления в 2 раза, обусловленный складыванием акустических сигналов от двух динамиков. В итоге интенсивность звука, даваемая системой, равна интенсивности звука от одного динамика (85 дБ SPL), и каждый из динамиков системы выдаёт на 6 дБ меньший SPL, чем одиночный динамик (т.е. по 79 дБ). Но поскольку мощность сигнала, подаваемая на каждый динамик, упала в 4 раза (т.к. амплитуда напряжения упала вдвое) и равна 0.25 Вт, **чувствительность каждого из динамиков по-прежнему не изменяется** и остаётся равной 85 дБ/Вт, т.к. они выдают по 79 дБ при подаче 0.25 Вт на каждый, а **чувствительность системы по-прежнему равна 88 дБ/Вт**, т.к. она выдаёт 85 дБ SPL при подаче 0.5 Вт мощности.

Неразбериха в чувствительности параллельно и последовательно соединённых динамиков возникает из-за того, что начинают относить не интенсивность звука от конкретного динамика к мощности сигнала, подаваемого на этот конкретный динамик, а интенсивность звука от всей системы к амплитуде напряжения, подаваемого на систему. **Отсюда иллюзия повышения чувствительности на 6 дБ** при добавлении динамика параллельно и на 0 дБ - последовательно. Действительно, **при подключении к усилителю с постоянным положением регулятора громкости** система из двух последовательных динамиков создаст такой же уровень громкости, как и один динамик, а система из двух параллельных - на 6 дБ больше. Но это не значит, что чувствительность в дБ/Вт изменяется: **чувствительность динамика в обоих случаях остаётся равной 85 дБ/Вт, а системы - 88 дБ/Вт**, поскольку излучающая площадь у неё вдвое больше (два диффузора, излучающие когерентно и синфазно).

При подаче же на динамики разных сигналов, например, случайных сигналов (шумов), соответствующие акустические сигналы могут как складываться (когда фаза совпадает), так и уничтожаться (когда фаза противоположна: звуковая энергия переходит в тепло). В этом случае их **амплитуды** перестают быть аддитивными и **складываются по квадратичному закону**, т.е. при добавлении второго динамика со случайным шумом такой же природы и интенсивности амплитуда звукового давления растёт в $\sqrt{2} = 1.41421\dots$ раз, а её квадрат - в 2 раза. **Интенсивности же звука становятся аддитивными**, и два независимо шумящих динамика создают шум с усреднённым по времени SPL, на 3 (а не на 6) дБ большим, чем создаёт один такой шумящий динамик. Таким образом, чувствительность системы из двух независимо шумящих динамиков равна чувствительности одного шумящего динамика: **увеличение излучающей площади не даёт эффекта**, т.к. её половинки (диффузоры динамиков) действуют несогласованно (излучают некогерентно).

В реальной системе акустические сигналы, выдаваемые каждым из динамиков, всегда отличаются, хотя бы из-за разницы в расположении динамиков, но имеют общую природу, и поэтому **возникает интерференционная картина звукового давления**, на максимумах которой мы действительно имеем увеличение

чувствительности системы на 3 дБ при добавлении второго динамика, но в промежутках сказываются фазовые эффекты, и чувствительность падает. Если построить зависимость этой чувствительности от частоты, мы получим АЧХ системы, и она будет различной в разных точках пространства. **Главный интерференционный максимум** наблюдается в плоскости, перпендикулярной отрезку, соединяющему центры динамиков, и проходящей через его середину; на этом максимуме и принято измерять АЧХ: там наименьшее влияние интерференционных провалов. В случае точечных динамиков мы имеем только эту картину (**лучевая направленность**), в случае же динамиков с площадью, сравнимой с длиной волны, дополнительно накладывается картина **осевой направленности**, в т.ч. и на плоскость главного максимума лучевой направленности, и серия максимумов возникает на прямой, являющейся пересечением этой плоскости с плоскостью осей динамиков. Положение этих максимумов на этой прямой зависит от частоты, а главный, не зависящий от частоты, находится на бесконечно большом расстоянии от динамиков. А вне плоскости, в произвольной точке, **картина становится очень сложной**.

Более того, реальные диффузоры неоднородны, и на высоких частотах ситуация начинает походить на систему из независимо шумящих динамиков: отдельные участки диффузора излучают несогласованно, и эффективная площадь падает, а искажения растут. В совокупности с нежесткостью диффузора это приводит к спаду АЧХ на высоких частотах и неровностям АЧХ в рабочем диапазоне.

Ко всему этому добавляются и отражения от передней панели АС, мебели и стен помещения, и резонансы, и многое другое, и усреднённая (т.е. реально наблюдаемая) **чувствительность становится ещё ниже, а АЧХ - ещё менее похожей на заводскую**, измеренную для одного динамика на его оси в заглушённой камере на синусоидальном сигнале, не учитывающем временные характеристики. И даже метод качающегося микрофона не всегда устанавливает корреляцию между этой сложнейшей картиной и качеством звучания.

И это всё - лишь в предположении, что у нас идеальный усилитель и идеальные кабели... 😊

Так что всё совсем не так просто, как видится из формул и расчётов. 🤖

P.S. Оригинал этой статьи был спонтанно мной написан и запощен на один из форумов в сентябре этого года. Решил продублировать её тут, чтобы было проще ссылаться, да и чтобы сохранилась лучше. 😊