Механическая модель фазоинверторной АС:

Для начала рассмотрим баланс сил, обуславливающий движение **диффузора**:

1. Приводная сила, ее создает ток звуковой катушки *I(t)* в магнитном зазоре:

$$F_0 = I(t) \cdot BL .$$

2. В реальных условиях громкоговоритель работает не от источника тока, а скорее от источника напряжения, что позволяет эффективно демпфировать звуковую катушку. При перемещении катушки в магнитном зазоре со скоростью v возникает тормозящая сила F_{SI}, вызваная замыканием наведенной в катушке ЭДС самоиндукции U_{SI} через сопротивление катушки R_E и близкое к нулю выходное сопротивление усилителя.

$$F_{SI} = -\frac{U_{SI}}{R_E} BL = -\frac{BL \cdot v}{R_E} BL = -\frac{B^2 L^2}{R_E} \cdot v .$$

3. Механические потери в подвижной системе также тормозят движение диффузора. Эта сила сопротивления (F_m) обычно пропорциональна скорости и может быть без труда связана с механической добротностью динамика. Примем для начала просто

$$F_m = -\alpha \cdot v .$$

4. Сдвиг диффузора ограничивается жесткостью подвеса подвижной системы (k). Соответствующая сила пропорциональна перемещению x:

$$F_k = -k \cdot x .$$

5. Дополнительно ограничивают сдвиг диффузора силы упругости сжатого воздуха. Разность давлений ΔP приложенная к разным сторонам диффузора площади S_D вызывает силу F_{PV}

$$F_{PV} = S_D \cdot \Delta P .$$

Баланс вышеперечисленных сил и вызывает движение диффузора массы m_D с некоторым ускорением a:

$$F = F_0 - F_{SI} - F_m - F_k - F_{PV} = m_D \cdot a ;$$

$$I(t) \cdot BL - \frac{B^2 L^2}{R_E} \cdot v - \alpha \cdot v - k \cdot x + S_D \cdot \Delta P = m_D \cdot a .$$

Учитывая, что скорость и ускорение являются соответственно первой и второй производной расстояния от времени - $\dot{x}$ и $\ddot{x}$, перепишем выражение следующим образом:

$$\ddot{x} + \frac{B^2 L^2}{R_E \cdot m_D} \cdot \dot{x} + \frac{\alpha}{m_D} \cdot \dot{x} + \frac{k}{m_D} \cdot x - \frac{S_D}{m_D} \cdot \Delta P = \frac{BL}{m_D} \cdot I(t). \qquad \text{(I)}$$

Это выражение нетрудно упростить до случая свободных колебаний диффузора в воздухе с частотой f_S:

$$\ddot{x} + \frac{\alpha}{m_D} \cdot \dot{x} + \frac{k}{m_D} \cdot x = 0 .$$

Затухание диффузора при этом определяется его механической добротностью Q_m, что позволяет нам непосредственно определить параметр α:

$$\frac{\alpha}{m_D}\cdot\dot{x}=\frac{2\pi\cdot f_S}{Q_m}\cdot\dot{x}\,.$$

Чуть сложнее связать изменение давления в ящике ΔP с перемещением диффузора. Во-первых, помимо перемещения диффузора (x) следует учесть перемещение воздуха (y) в трубе фазоинвертора площадью S_b; таким образом мы получим объемное смещение громкоговорителя ΔV

$$\Delta V=S_D\cdot x+S_b\cdot y\,,$$

которое и определяет изменение давления в ящике. Для типично адиабатичного процесса в громкоговорителе:

$$PV^{\gamma}=const\,;$$

где γ - коэффициент Пуассона равный ~1.4 для воздуха при нормальных условиях.

Учитывая, что колебания давления в ящике составляют максимум несколько процентов, вполне правомерно применить разложение в ряд с удержанием только старших членов:

$$\Delta P=P_0\cdot\left(\frac{V_0}{V_0+\Delta V}\right)^{\gamma}-1=-\gamma\cdot\frac{P_0}{V_0}\cdot\Delta V=-\gamma\cdot\frac{P_0}{V_0}\cdot\left(S_D\cdot x+S_b\cdot y\right).$$

Естественно, что применение наполнителя по объему ящика позволяет производить теплообмен между воздухом и наполнителем, приближая процесс к изотермическому, для которого $\gamma = 1$.

Итак, имеем выражение (I) в виде:

$$\ddot{x}+\frac{B^2L^2}{R_E\cdot m_D}\cdot\dot{x}+\frac{2\pi\cdot f_S}{Q_m}\cdot\dot{x}+\frac{k}{m_D}\cdot x+\gamma\cdot\frac{P_0}{V_0}\cdot\frac{S_D}{m_D}\cdot\left(S_D\cdot x+S_b\cdot y\right)=\frac{BL}{m_D}\cdot I(t).\quad\text{(II)}$$

Видно, что за исключением смещения воздуха в трубе фазоинвертора (y), все параметры определяющие колебания диффузора динамика в ящике известны.

Поведение воздуха в **трубе фазоинвертора** также несложно описать; оно определяется балансом сил давления в ящике ($F_{PV} = S_b\Delta P$), силы вязкого трения в трубе ($F_V=\beta\cdot v$) и силами инерции массы воздуха в трубе $m_b a$:

$$F=F_{PV}-F_V=m_b\cdot a\,,$$

$$\gamma\cdot\frac{P_0}{V_0}\cdot S_b\cdot\left(S_D\cdot x+S_b\cdot y\right)-\beta\cdot v=m_b\cdot a\,.$$

или

$$\ddot{y}+\frac{\beta}{m_b}\cdot\dot{y}-\gamma\cdot\frac{P_0}{V_0}\cdot\frac{S_b}{m_b}\cdot\left(S_D\cdot x+S_b\cdot y\right)=0\,.\quad\text{(III)}$$

Учитывая гидродинамическую формулу Пуазейля для падения давления ($\Delta P'$) на трубе длиной l и диаметром d, при динамической вязкости η (~1.7e-5 m^2/s), скорости потока v и плотности ρ:

$$\Delta P' = \frac{F_V}{S_b} = 32 \cdot \frac{\nu \cdot \eta \cdot l}{d^2},$$

рассчитаем коэффициент при $\dot{y}$:

$$\frac{\beta}{m_b} = \frac{F_V}{\nu} \cdot \frac{1}{m_b} = \frac{F_V}{\nu} \cdot \frac{1}{S_b \cdot l \cdot \rho} = \frac{F_V}{S_b} \cdot \frac{1}{\nu \cdot l \cdot \rho} = 32 \cdot \frac{\nu \cdot \eta \cdot l}{d^2} \frac{1}{\nu \cdot l \cdot \rho} = \frac{32}{d^2} \frac{\eta}{\rho}. \quad \text{(IV)}$$

Таким образом получим окончательно для (III):

$$\ddot{y} + \frac{32}{d^2} \cdot \frac{\eta}{\rho} \cdot \dot{y} - \gamma \cdot \frac{P_0}{V_0} \cdot \frac{S_b}{m_b} \cdot \left(S_D \cdot x + S_b \cdot y \right) = 0. \quad \text{(V)}$$

Собственно говоря, уравнения (II) и (V) составляют систему, решение которой однозначно описывает поведение фазоинвертора под воздействием произвольного сигнала *I(t)*.

Замечание об эффективности фазоинверторного канала.

Вязкое сопротивлением воздуху в канале (F_V) может быть соотнесено с добротностью трубы фазоинвертора (Q_{bp}). Чем меньше диаметр трубы (d) – тем больше потери на трение и ниже добротность. Как и для случая вязких потерь в подвесе динамика, сила вязкого трения в канале определяет его добротность на частоте f_b:

$$\frac{\beta}{m_b} \cdot \dot{y} = \frac{2\pi \cdot f_b}{Q_{bP}} \cdot \dot{y}.$$

Или, учитывая (IV):

$$\frac{32}{d^2} \cdot \frac{\eta}{\rho} = \frac{2\pi \cdot f_b}{Q_{bP}},$$

легко получить выражение для диаметра трубы при заданной добротности:

$$d = 4 \cdot \sqrt{\frac{Q_{bP}}{\pi \cdot f_b} \cdot \frac{\eta}{\rho}}. \quad \text{(VI)}$$

Видно, что добротность канала выбраной системы зависит только от диаметра канала и резонансной частоты.

Если стоит задача реализовать заданную добротность, то, чтобы обеспечить приемлемые скорости воздуха в канале, набирается несколько трубок нужного диаметра общим сечением S_b. Альтернативный и более практичный вариант – щелевой порт (или несколько), с высотой t сравнимой с d, и шириной необходимой для обеспечения S_b. Все вышеприведенные расчеты можно повторить для щелевого порта с учетом того, что в исходная формула Пуазейля содержит численный коэффициент 24 вместо 32. Тогда (IV) преобразуется к виду:

$$\frac{\beta}{m_b} = \frac{24}{t^2} \frac{\eta}{\rho}. \quad \text{(IV')}$$

А формула (V) к

$$\ddot{y} + \frac{24}{t^2} \cdot \frac{\eta}{\rho} \cdot \dot{y} - \gamma \cdot \frac{P_0}{V_0} \cdot \frac{S_b}{m_b} \cdot \left(S_D \cdot x + S_b \cdot y \right) = 0. \quad \text{(V')}$$

И (VI):

$$t = 2 \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{Q_{bP}}{\pi \cdot f_b} \cdot \frac{\eta}{\rho}}. \qquad \text{(VI')}$$

Произведем оценку. Вероятно, добротность $Q_{bp} \sim 20$ можно считать достаточно хорошей, особенно в сравнении с параметрами динамика и ящика. При частоте настройки фазоинвертора ~30 Hz такая добротность обеспечивается уже при диаметре трубок $d \sim 7$ mm или высоте щели $t \sim 6$ mm. Это означает, что практически любая привычная конструкция порта приемлема с точки зрения потерь.

Важно также отметить, что

I. При переходе из ламинарного в турбулентный режим данные зависимости нарушаются. Поскольку турбулентость сопровождается шумовыми артефактами, такие АС не могут считаться высококачественными и меня не интересуют как класс. Способы обеспечения ламинарности – как-то выбор оптимальных режимов работы (сечение порта, скорость в нем, характерный размер канала) соответствующих докритическим числам Рейнольдса ($Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\eta}$; $Re < 2300$) или построение портов особой формы, обладающих большей устойчивостью и сохраняющими ламинарность при б**о**льших *Re* – вопрос отдельный, оставим его пока за рамками обсуждения.

II. При переходе к турбуленитному режиму, сопротивление порта резко возрастает, что вызывает падение его добротости. На практике это означает тот давно известный факт, что турбулентный фазоинвертор с характерным размером порядка сантиметра или менее просто бесполезен. Вывод: ламинарный порт не имеет права переходить в турбулентный режим, это чревато не только шумами (как в случае малоразмерного турбулентного порта), но и значитаельным падением его эффективности.

Можно произвести численные оценки для таких турбулентных портов. Известно, что для турбулентного движения при умеренно больших числах Рейнольдса (до 10^5), сопротивление канала характеризуется соотношением

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}},$$

В то время как в вышеприведенных расчетах для ламинарного потока $\lambda = \frac{64}{Re}$. Это позволяет нам оценить добротность порта (случай абсолютно гладких стенок) с помощью процедры аналогичной приведенной выше:

$$\lambda \cdot \frac{v}{2d} = \frac{2\pi \cdot f_b}{Q_{bP}} \quad \Rightarrow \quad \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \cdot \frac{v}{2d} = \frac{2\pi \cdot f_b}{Q_{bP}} \quad \Rightarrow \quad \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \cdot \frac{Re}{2d^2} \cdot \frac{\eta}{\rho} = \frac{2\pi \cdot f_b}{Q_{bP}},$$

$$Q_{bP} = 2\pi \cdot f_b \cdot \frac{d^2}{0.1582} \cdot \frac{\rho}{\eta} \cdot \frac{\sqrt[4]{Re}}{Re}.$$

Для обычного порта с диаметром $d \sim 10$ cm и типичной скоростью в порте $v \sim 10$ m/s, число Рейнольдса составляет $Re \sim 6 \cdot 10^4$. Такой порт имеет добротность $Q \sim 180$ на частоте настройки ~ 30 Гц. Как нетрудно заметить, если попытаться сохранить такой характер течения в трубах диаметром $d \sim 1$ cm, добротность упадет до неприемлемой величны $Q \sim 1.8$, делающей такой фазоинвертор совершенно бесполезным.

Переход к RLC модели:

Решать систему уравнений (II) и (V) можно по-разному, но наиболее наглядным будет использование обычного схемного симулятора. Для этого немного модифицируем систему уравнений (II) и (V). Введем функции $U = S_D \cdot \dot{x}$ и $V = S_b \cdot \dot{y}$ и умножим (II) и (V) соответственно на $\frac{m_D S_D}{B^2 L^2}$ и $\frac{m_b}{S_b} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2 L^2}$. Получим:

$$\begin{cases} \frac{m_D}{B^2L^2} \cdot \dot{U} + \frac{1}{R_E} \cdot U + \frac{2\pi \cdot f_S}{Q_m} \cdot \frac{m_D}{B^2L^2} \cdot U + \frac{k}{B^2L^2} \int U \cdot dt + \gamma \cdot \frac{P_0}{V_0} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2L^2} \cdot \int (U+V)dt = \frac{S_D}{BL} \cdot I(t) \\ \frac{m_b}{S_b{}^2} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2L^2} \cdot \dot{V} + \frac{32}{d^2} \cdot \frac{\eta}{\rho} \cdot \frac{m_b}{S_b{}^2} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2L^2} \cdot V = \gamma \cdot \frac{P_0}{V_0} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2L^2} \cdot \int (U+V)dt \end{cases}$$

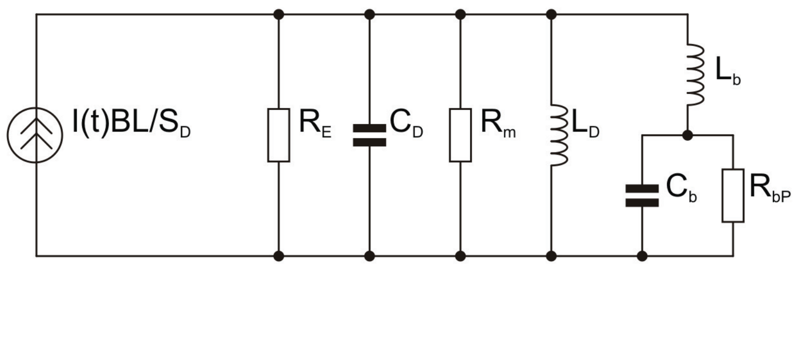
Осталось совсем немного. Сделаем следующие подстановки:

$$\begin{aligned} & C_D = \frac{m_D}{B^2L^2} && C_b = \frac{m_b}{S_b{}^2} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2L^2} = \frac{l \cdot \rho}{S_b} \cdot \frac{S_D{}^2}{B^2L^2} \\ & R_m = \frac{Q_m}{2\pi \cdot f_S} \cdot \frac{B^2L^2}{m_D} && R_{bP} = \frac{d^2}{32} \cdot \frac{\rho}{\eta} \cdot \frac{S_b{}^2}{m_b} \cdot \frac{B^2L^2}{S_D{}^2} = \frac{d^2}{32} \cdot \frac{S_b}{\eta \cdot l} \cdot \frac{B^2L^2}{S_D{}^2} \\ & L_D = \frac{B^2L^2}{k} && L_b = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{V_0}{P_0} \cdot \frac{B^2L^2}{S_D{}^2} \end{aligned} \qquad \text{(IV)}$$

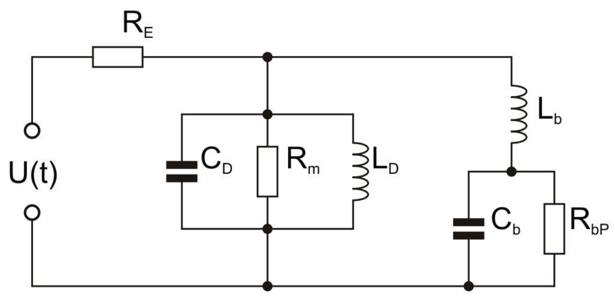
Система преобразуется к виду:

$$\begin{cases} C_D \cdot \dot{U} + \frac{1}{R_E} \cdot U + \frac{1}{R_m} \cdot U + \frac{1}{L_D} \int U dt + \frac{1}{L_b} \cdot \int (U+V)dt = \frac{S_D}{BL} \cdot I(t) \\ C_b \dot{V} + \frac{1}{R_{bP}} \cdot V = \frac{1}{L_b} \cdot \int (U+V)dt \end{cases}$$

В этой системе уравнений, при некотором навыке, нетрудно узнать математическое описание довольно простой схемки:



Поскольку нас интересует раскачка от усилителя напряжения мы вправе немного видоизменить схему, дополнив ее сопротивлением учитывающем добротность ящика:



Подобная процедура преобразования механических параметров динамика к электрическим давно известна и приведена здесь, главным образом, для того, чтобы было возможно проследить, что и откуда берется.

Хотелось бы подчеркнуть: **Эквивалентная электрическая схема не является неким абстрактным измышлением, которое как-то там похоже на реальную акустику. Данная схема – это прежде всего способ решения системы дифференциальных уравнений численным методом в програмной оболочке позволяющей представить результаты максимально наглядным образом.**

На основании данной схемы можно проанализировать массу параметров фазоинверторных систем. Практически, за счет высокой гибкости и многообразия инструментов в современных схемных симуляторах, умело применяя и расширяя даную модель, можно получить гораздо больше информации чем от стандартных АЧХ-анализаторов АС.

Работа с моделью:

Итак, подключим в симуляторе нижнюю схему к источнику напряжения произвольной формы. Как нетрудно заметить, искомые функции $U = S_D \cdot \dot{x}$ и $V = S_b \cdot \dot{y}$ вычисляются в данной модели как напряжения на конденсаторах C_D и C_b и представляют собой не что иное как скорости объемного смещения диффузора и воздуха в трубые фазоинвертора, соответственно. Учитывая эффективную площадь диффузора и сечение трубы фазоинвертора - S_D и S_b, нетрудно получить скорость перемещения диффузора и скорость воздуха в трубе.

Интегрируя напряжения на конденсаторах C_D и C_b, (с учетом C_D и C_b), легко получаем механические амплитуды диффузора и воздуха в трубе.

Дифференцируя напряжения на конденсаторах C_D и C_b, непосредственно получаем звуковое давление производимое диффузором и фазоинвертором в отдельности.

Общее звуковое давление соответствует производной от напряжения на L_b, или, что то-же самое, от разности напряжений на C_D и C_b.

Форма напряжение на входе может быть произвольной, что позволяет оценить реакцию динамика, фазоинвертора и системы в целом, например, на прямоугольный сигнал, дельта-импульс, в том числе и с подключенными всевозможными системами коррекции ГВЗ, АЧХ и т.д.

Очень наглядным выглядит одновременное сравнение с тем–же динамиком в закрытом ящике. Для этого достаточно исключить из схемы (закорачиванием) C_b и R_b. Общеприятая модель фазоинвертора (без учета потерь в трубе) получается простым исключением R_b из схемы.

Выбор номиналов:

Естественно, можно применять номиналы элементов схемы рассчитанные по формулам (IV). Желающие могут преобразовать их к более удобоваримому виду (например к функциям от f_S, V_{AS}, Q_{mS}, Q_{ES}), есть достаточно литературы о том, как это сделать.

Чаще я поступал иначе, задавался величинами

R_E сопротивление динамика постоянному току;

f_S резонансная частота динамика на воздухе;

f_b частота настройки фазоинвертора;

V_{AS} эквивалентный объем динамика;

V_b объем ящика;

Q_{mS} механическая добротность динамика на воздухе;

Q_{ES} электрическая добротность динамика;

Q_{bp} добротность трубы фазоинвертора;

и рассчитывал, исходя из элементарных соображений, номиналы для схемы.

Например так:

$$C_D = \frac{Q_{ES}}{2\pi \cdot f_S \cdot R_E}\ [F]$$

$$R_m = R_E \cdot \frac{Q_{mS}}{Q_{ES}}\ [Ohm]$$

$$L_D = \frac{R_E}{2\pi \cdot f_S \cdot Q_{ES}}\ [Hn]$$

$$L_b = L_D \cdot \frac{V_b}{V_{AS}}\ [Hn]$$

$$C_b = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_b^2 \cdot L_b}\ [F]$$

$$R_{bP} = \frac{Q_{bP}}{2\pi \cdot f_b \cdot C_b} \; [Ohm] \; .$$

Необходимо отметить такую особенность:

Как видно, например в (I), в упругость воздуха входит коэффициент Пуассона γ. Его учет как-бы уменьшает объем ящика относительно его геометрического значения. На практике, однако, эквивалентный объем динамика меряют в незаглушенном ящике, поэтому используемое значение V_{AS} (или скорее S_D, которая обычно как раз как бы составляет $\frac{1}{\sqrt{\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{1.4}} = 0.85$ от видимой площади диффузора) уже «адиабатическое» и, как следствие, коэффициент Пуассона γ для незаполненного ящика учитывать не нужно. γ проявляет себя только для заполненных ящиков, где за счет «изотермичности» процесса объем как-бы увеличивается. Для фазоинверсного канала γ никуда не пропадает, и известные соотношения для его длины этот коэффициент учитывают, хотя и не упоминают в явном виде (см. например Виноградову).