

Зарисовка на тему низких частот.

Часть 1

Александр Найдено, Евгений Карпов

Все, что тут написано, не претендует на новизну или откровение свыше, тем более на истину.

Сделана еще одна попытка улучшить воспроизведение низких частот с применением недорогих динамических головок и как-то упорядочить выбор и расчет параметров для этого.

Недорогие низкочастотные динамические головки прямого излучения (далее – «динамики», с Вашего позволения) как правило, имеют довольно высокие резонансную частоту и добротность, что приносит, как известно, две неприятности:

- во-первых, импульсный отклик носит колебательный характер, и это окрашивает звук в хорошо слышимой частотной области (около резонанса акустической системы), проще говоря – пресловутое «бубнение»;
- во-вторых, значительное ослабление передачи самых низких частот.

Эти две проблемы имеют, в основном, (не считая слабого магнита) один корень – большая упругость подвеса диффузора, а при помещении динамика в «ящик» добавляется еще упругость воздуха в последнем.

В качестве примера возьмем «очень средненький» низкочастотный динамик 35ГДН102; наш экземпляр с омическим сопротивлением катушки $R_e=3.55 \text{ Ohm}$ после 200-т часов тренировки (что снизило упругость где-то на 30%) показал в свободном пространстве следующие параметры – эквивалентный объем $V_{as}=47\text{л}$, частоту основного резонанса $F_s=34 \text{ Hz}$, механическую добротность $Q_{ms}=5.1$, электрическую $Q_{es}=0.85$ и общую $Q_{ts}=0.73$.

Если поместить его в закрытый ящик, то его резонансную частоту и все добротности надо умножить на значение выражения -

$$\sqrt{\frac{V_{as}}{V_c} + 1},$$

где V_c – объем ящика.

Например, используя приемлемый по размерам для жилой комнаты корпус с внутренним объемом 60л, для закрытой акустической системы получим следующие параметры: $F_c=45.4$, $Q_{mc}=6.8$, $Q_{ec}=1.135$ и $Q_{tc}=0.975$ (заметьте, это при нулевом выходном сопротивлении усилителя, при ненулевом положительном сопротивлении электрическая и общая добротности будут еще больше).

На рис.1 показаны полученные на модели АЧХ SPL (уровня звукового давления) динамика в бесконечном экране (прерывистая) и в закрытом ящике (сплошная), приведенные к уровню 0дБ на условно-средней (для этого динамика) частоте 300 Гц, т.е. где его импеданс практически равен омическому сопротивлению катушки R_e .

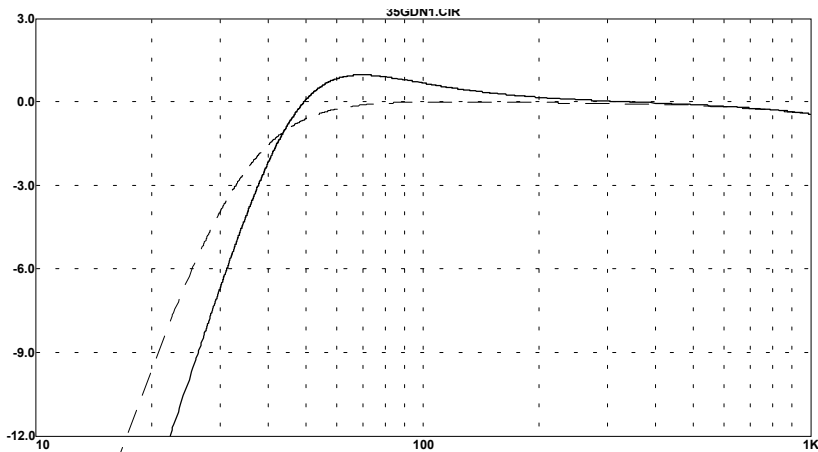


Рис.1

Бытует мнение, что для наилучшей АЧХ оптимальная общая добротность системы $Q_t=0.7$, этот динамик на «щите» (а равно и в открытом корпусе, если не учитывать искажений дифракции) и показал «гладкую» АЧХ.

Однако бесколебательный отклик возможен при общей добротности системы $Q_t \leq 0.5$, так что хотя и АЧХ при $Q_t=0.7$ не имеет выпуклости, отклик все же «подкрашивается». Впрочем, дело вкуса, кому нравится «бумкание», выбирайте добротность сами.

Для улучшения воспроизведения низких частот нам кажется разумным использовать две меры:

- для снижения добротности применить электрическое демпфирование путем введения отрицательного выходного сопротивления усилителя;

- для исправления АЧХ на самых низких частотах применить частотную коррекцию линейного сигнала, приходящего на вход усилителя.

Электрическое демпфирование.

Для строгости формулировок изобразим известную структуру усилителя, охваченного обратными связями по току и напряжению (рис.2),

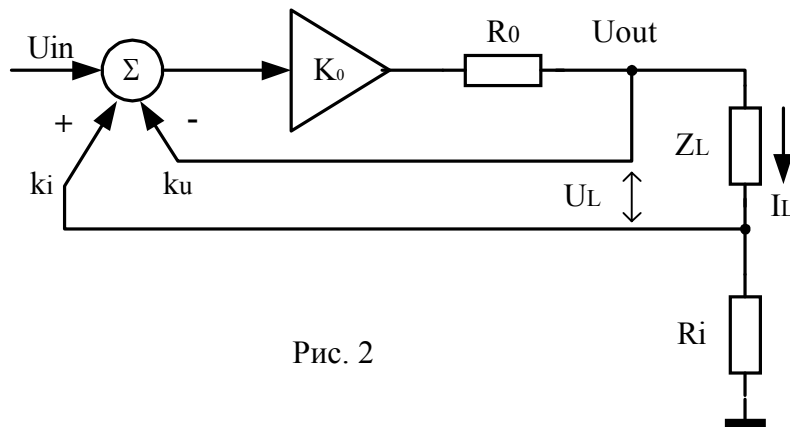


Рис. 2

- где U_{IN} - напряжение на входе усилителя;
 U_{OUT} - напряжение на выходе усилителя;
 U_L - напряжение на нагрузке (динамике);
 I_L - ток нагрузки;
 R_0 - внутреннее выходное сопротивление усилителя;
 Z_L - импеданс нагрузки;
 k_0 - коэффициент усиления усилителя;
 k_U - коэффициент обратной связи по напряжению;
 k_i - коэффициент обратной связи по току нагрузки;
 R_i - сопротивление датчика тока.

Обратная связь по напряжению, разумеется, отрицательная, по току – положительная. Тогда выражение для напряжения на нагрузке примет вид:

$$U_L = U_{IN} \frac{k_0}{1 + k_U k_0} - I_L \left[\frac{R_0}{1 + k_U k_0} + R_i - \frac{R_i k_i k_0}{1 + k_U k_0} \right].$$

Выражение в скобках есть выходное сопротивление усилителя «с точки зрения» динамика. Если ООС по напряжению отсутствует, то k_U и все слагаемые, его содержащие, равны нулю. Чтобы наши рассуждения не зависели от наличия или отсутствия ООС по напряжению, обозначим

$$k_A = \frac{k_0}{1 + k_U k_0}, \quad R_A = \frac{R_0}{1 + k_U k_0},$$

тогда

$$U_L = U_{IN} k_A - I_L [R_A + R_i - R_i k_i k_A],$$

а выходное сопротивление усилителя и коэффициент обратной связи по току нагрузки определяются выражениями:

$$R_g = R_A + R_i - R_i k_i k_A \quad k_i = \frac{R_A + R_i - R_g}{R_i k_A}.$$

Для того, чтобы определить требуемое R_g , надо задаться общей добротностью системы колонка-усилитель и рассчитать нужную для этого электрическую добротность (механическая уж какая получилась).

Причем вид формул не зависит от акустического оформления, только оперировать надо соответствующими величинами, т.е. для закрытого ящика Q_{mc} , Q_{ec} , Q_{tc} , для «голого» динамика Q_{ms} , Q_{es} , Q_{ts} , etc.

Поэтому, для общности, мы упростим индексы: Q_m , Q_e и Q_t – соответственно механическая, электрическая и общая добротности независимо от типа акустического оформления.

Задавшись желаемой общей добротностью Q_{tg} , вычисляем требуемые Q_{eg} и R_g :

$$Q_{eg} = \frac{Q_{tg}Q_m}{Q_m - Q_{tg}} \quad , \quad R_g = Re \left(\frac{Q_{eg}}{Q_e} - 1 \right).$$

Для нашего «красавца» в том же ящике зададимся $Q_{tg}=0.5$, тогда получится $Q_{eg}=0.54$ и $R_g = - 1.86$. Надобно сказать - получилось довольно много. Вообще не желательно увлекаться слишком большим отрицательным сопротивлением усилителя:

- во-первых, не следует забывать, что из всякой ерунды конфетка не получится,
- во-вторых, могут появиться проблемы с устойчивостью,
- в-третьих, возникнет вопрос дрейфа параметров из-за нагрева звуковой катушки динамика, но об этом позже.

Сейчас посмотрим, что покажет модель. На рис.3 те же динамик и ящик, прерывистая линия при

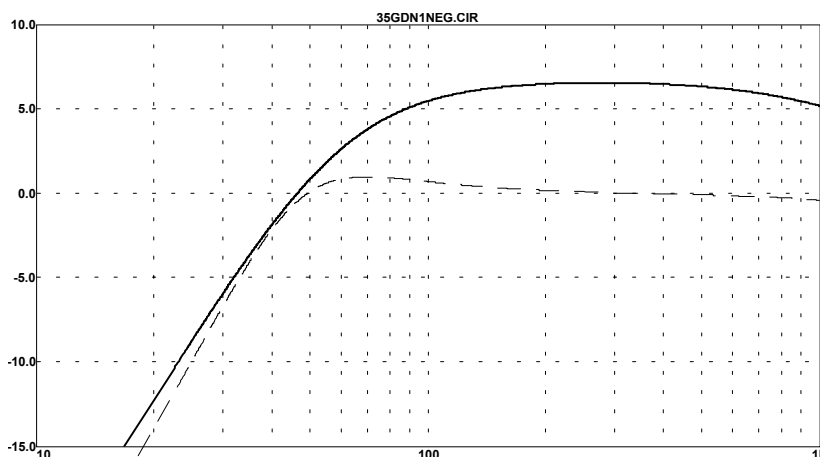


Рис.3

$R_g = 0$, сплошная при $R_g = - 1.86$. Характерно плавное снижение уровня от средних частот вниз, на первый взгляд, вроде бы стало хуже. Хм-м, если взять дорогой именитый woofer с малой добротностью и мягким подвесом, качественно картина будет такая же «скругленная» без нашего демпфирования – это физика. Резонансная частота у него, правда, будет пониже, но и чтобы реализоваться, он потребует ящик не квартирного размера.

Кроме того, вырастает общий коэффициент передачи системы усилитель-динамик. Напряжение на нагрузке в общем случае имеет вид:

$$U_L = U_{IN} \frac{Z_L k_A}{Z_L + R_g} \quad ,$$

а на условно-средней частоте

$$U_L \approx U_{IN} \frac{Re k_A}{Re + R_g} .$$

Как видите, в нашем примере коэффициент передачи получился больше в 2.1 раза (6.4db), и поскольку речь идет о низкочастотном звене, то это надо учесть при дележке сигнала (читай – расфилтровке по НЧ-СЧ-ВЧ каналам). Например, если есть возможность - изменить k_A , и не забыть, что это потащит за собой изменение k_i .

Такой прием можно применить и к широкополосной системе, только действие токовой связи надо ограничить по частоте, сделав величину k_i частотно-зависимой. Для этого k_i надо заменить на следующее выражение:

$$\frac{k_i}{T_L p + 1},$$

где T_L – постоянная времени, определяющая верхнюю частоту действия токовой связи.

Величину T_L целесообразно выбирать так, чтобы эта частота среза находилась существенно выше частоты резонанса динамика, где уже $Z_L \approx R_e$ (с точки зрения устойчивости усилителя целесообразно это делать всегда, выбрав в НЧ-звене величину T_L , соответствующую частоте лежащей несколько выше частоты раздела НЧ-СЧ, дабы не влияло на качество расфильтровки).

В этом случае выражение для напряжения на нагрузке примет вид:

$$U_L = U_{IN} \frac{Z_L k_A (T_L p + 1)}{[Z_L + R_A + R_i - R_i k_i k_A] \cdot \left[\frac{Z_L + R_A + R_i}{Z_L + R_A + R_i - R_i k_i k_A} T_L p + 1 \right]},$$

и коэффициент передачи системы, как видите, вырастет только в низкочастотной области.

Чтобы выравнять общую АЧХ, перед усилителем надо вместо НЧ-фильтра применить фильтр с передаточной функцией вида:

$$W_f = \frac{\frac{R_e + R_A + R_i}{R_e + R_A + R_i - R_i k_i k_A} T_L p + 1}{T_L p + 1} = \frac{R_e + R_A + R_i}{R_e + R_g} \frac{T_L p + 1}{T_L p + 1}.$$

Коррекция линейного сигнала.

Для коррекции низкочастотной части АЧХ системы можно применить корректор ["Linkwitz Transform"](#), тем более что автор любезно предоставил [апплет](#) его расчета.

Но внимание: исходными данными для него на листе box является резонансная частота F_s и общая добротность Q_{ts} «свободного» динамика, а объем закрытого ящика называется V_b , и если в литрах, то со знаком минус. Поэтому новое значение, полученное в результате демпфирования Q_{ts} с учетом R_g надо вычислить по формулам:

$$Q_e = Q_s \left(1 + \frac{R_g}{R_e} \right), \quad Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_e}{Q_{ms} + Q_e}.$$

В нашем случае получается $Q_e = 0.4$, $Q_{ts} = 0.37$, ну и задемпфировали.

Апплет сам подсчитает F_s , Q_{ts} и занесет на первый лист под названием $f(0)$ и $Q(0)$. Далее, надо задать «фиктивную» резонансную частоту $f(p)$ и добротность $Q(p)$ «трансформированной» системы, и он подсчитает номиналы элементов фильтра.

Если выбрать добротность $Q(p) > 0.5$, то система опять приобретет колебательность, которую уже внесет сам фильтр, но это – дело вкуса. По этому поводу Harris сказал примерно следующее: «Некоторым слушателям при низкой добротности системы звук представляется "жиденьким" и они предпочитают большие значения, такое как 1.0 или даже больше».

Частотой $f(p)$ увлекаться тоже не следует, т.к. чем ниже мы ее зададим, тем больший подъем АЧХ даст фильтр на частотах ниже резонанса, что апплет сразу показывает на графике. Это в свою очередь, потребует дополнительный запас мощности усилителя и увеличит экскурсии диффузора со всеми вытекающими последствиями, так что надо реально оценить их возможности.

На рис.4 для нашего примера прерывистой линией показана АЧХ системы без коррекции, сплошной – с "Linkwitz Transform" при $Q(0) = Q(p) = 0.5$ и $f(p) = 26$ Гц.

По уровню –3 дБ частота понизилась с 68 Гц до 47 Гц, не Бог весть что, но все-таки. При том на частоте 20 Гц фильтр поднимет относительный уровень где-то на 7 дБ.

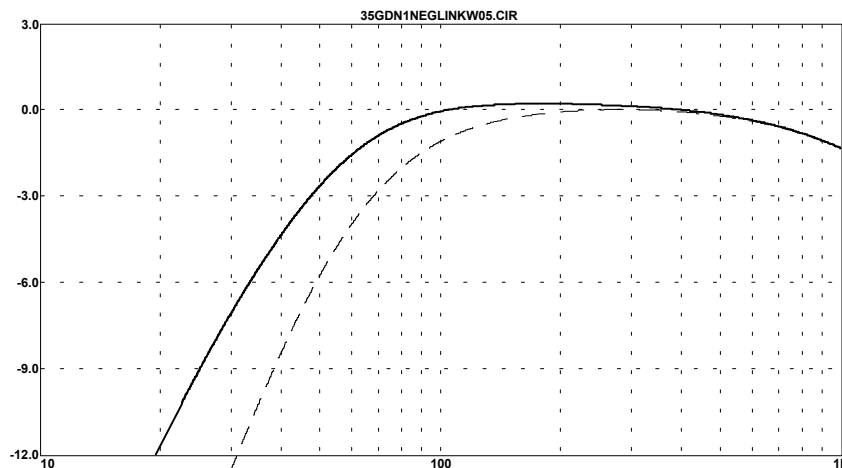


Рис.4

Прочитав у Линквица фразу (перевод немного вольный): «Показанная частотная характеристика корректора позволяет для низкочастотного динамика с АЧХ, имеющей пик ($Q_p = 1.21$), и высокую частоту среза ($F_p = 55$ Гц) получить АЧХ, спадающую по уровню - 6 дБ на частоте 19 Гц и с добротностью $Q=0.5$ » и взглянув на подкрепляющие это графики, читатель вправе спросить, а зачем эти «измы» с отрицательным сопротивлением, когда "Linkwitz Transform" вот - снижает добротность, сколько пожелаете».

Надо правильно это понимать – достигается форма частотных характеристик как у низко добротной системы. "Linkwitz Transform" только изменяет ход характеристик, а свободное движение механической системы динамика (характеристическое уравнение, *voulez vous*) остается прежним. Мы же, вводя электрическое демпфирование, «подбираемся поближе» к этой системе, искусственно уменьшив сопротивление ($R_e + R_g$) на пути к ней, посему лучше контролируем движение звуковой катушки, в чем принципиальная разница.

В фильтре Линквица используется операционный усилитель, с одной стороны – это существенно упрощает его техническую реализацию, но с другой стороны – требует использования высококачественного усилителя и вызывает технические трудности при реализации фильтра в ламповых схемах.

Получить желаемые частотные характеристики системы можно, используя корректор с передаточной функцией вида:

$$W_k = \frac{\omega_g^2}{\omega_c^2} \cdot \frac{\frac{p^2}{\omega_c^2} + \frac{p}{Q_{tc} \cdot \omega_c} + 1}{\frac{p^2}{\omega_g^2} + \frac{p}{Q_{tg} \cdot \omega_g} + 1} = \frac{T_c^2}{T_g^2} \cdot \frac{T_c^2 p^2 + \frac{T_c}{Q_{tc}} p + 1}{T_g^2 p^2 + \frac{T_g}{Q_{tg}} p + 1},$$

где ω_c, Q_{tc} - круговая резонансная частота и добротность исходной системы,

ω_g, Q_{tg} - желаемые круговая резонансная частота и добротность откорректированной системы.

Реализация такого корректора возможна на усилителе с ограниченным коэффициентом усиления и с применением RLC элементов, но об этом в другой раз.

Для низко добротных систем ($Q_{tc} \leq 0.5$ и $Q_{tg} \leq 0.5$) передаточная функция корректора упрощается и имеет следующий вид:

$$W_k = \frac{T_3 \cdot T_4}{T_1 \cdot T_2} \cdot \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)},$$

где

$$T_1, T_2 = \frac{T_c}{2 \cdot Q_{tc}} \pm T_c \cdot \sqrt{\frac{1}{4 \cdot Q_{tc}^2} - 1}, \quad T_3, T_4 = \frac{T_g}{2 \cdot Q_{tg}} \pm \sqrt{\frac{T_g^2}{4 \cdot Q_{tg}^2} - T_g^2}.$$

Такой корректор реализуется с использованием всего лишь двух RC звеньев и буферного усилителя, как показано на рис. 5.

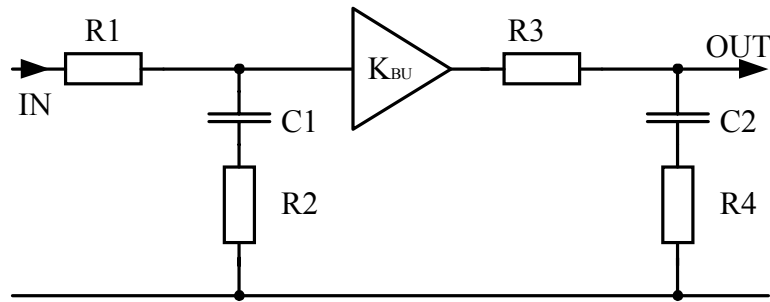


Рис 5

Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$W_k = K_{BU} \frac{R2C1p+1}{(R1+R2)C1p+1} \cdot \frac{R4C2p+1}{(R3+R4)C2p+1}$$

Буферный усилитель, во-первых, осуществляет развязку между звеньями, а во-вторых, нужен для получения единичного коэффициента передачи корректора в области средних и высших частот, и его коэффициент передачи определяется из следующего соотношения -

$$K_{BU} = \frac{(R1+R2)(R3+R4)}{R1R3}$$

Впрочем, последнее не обязательно, можно использовать этот буферный усилитель и в других «корыстных целях», в частности, для получения нужного коэффициента передачи данного канала. Совсем частный случай, когда обе добротности $Q_{tc} = Q_{tg} = 0.5$. Тогда $T1 = T2$ и $T3 = T4$, что приводит к упрощению корректора - RC звенья можно сделать одинаковыми.

Заключение.

Совместное использование электрического демпфирования динамика и частотных предискажений в усилителе, как мы считаем, позволяет улучшить воспроизведение низких частот при использовании динамиков среднего качества. В этой части статьи мы попытались показать это теоретически.

Вторая часть статьи будет посвящена некоторым вопросам технической реализации этого подхода и анализу результатов его использования в реальной системе.