

УДК 621.397

КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯХ

СУЛИМА Н.Н.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

COMBINED MOTIONAL FEEDBACK IN LOUDSPEAKERS

SULIMA N.N.

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. A.S. Popov

Аннотация С помощью моделирования на основе линейной модели громкоговорителя закрытого типа показаны основные особенности и отличия методов организации комбинированных классов электромеханической обратной связи (ЭМОС) в громкоговорителях. Определены приобретаемые в результате введения комбинированной ЭМОС свойства и особенности громкоговорителей. Предложен новый метод комбинированной ЭМОС, позволяющий повысить эффективность применения обратной связи в громкоговорителях.

Abstract With the help of simulation based on a linear model of closed-box loudspeaker shows the main features and differences of combined methods of MFB. Acquired properties and features for loudspeakers with combined MFB are defined. A new method of combined MFB, which allows to increase feedback efficiency is proposed.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что конечное звено звукового тракта современной аудиовизуальной системы остаётся аналоговым, и представляет собой громкоговоритель – низкоэффективный электроакустический преобразователь, с большим числом значительных по уровню и разнообразных по виду искажений. Кроме известных ранее методов повышения качества звучания громкоговорителей, состоящих в использовании современных технологий и оптимизации конструкции, также существуют частные случаи применения методов общей теории управления к ним. Рассмотренные в [1] методы управления громкоговорителями с помощью классических разновидностей электромеханической обратной связи (ЭМОС), в общем случае, являются компромиссными, что вынуждает переходить к их различным комбинациям. Задачей данной работы является анализ методов комбинированной ЭМОС с целью определения потенциальных возможностей каждого метода и присущих им особенностей. Как и в [1] рассмотрение будет проведено с помощью общего моделирования наиболее простого случая громкоговорителя с единственным излучателем в закрытом корпусе, работающем в низкочастотном диапазоне и в предположении идеальности усилителя мощности и датчика сигнала обратной связи. При этом будут рассмотрены все возможные комбинации, в соответствии с предложенной в [1] классификацией, а не только встречающиеся в работах других авторов, что должно позволить развить теорию электромеханической обратной связи.

КОМБИНАЦИЯ ПО УСКОРЕНИЮ И СКОРОСТИ ЭМОС

Передаточную функцию громкоговорителя с акустическим оформлением одиночного излучателя в виде закрытого ящика принято аппроксимировать полиномом второго порядка (1):

$$W_0(s) = \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}, \quad (1)$$

где $s = j \cdot \omega$ – комплексная частота; ω_0 – резонансная частота громкоговорителя; Q – его добротность [2].

Общее выражение для передаточной функции $W_{oc}(s)$ охваченного отрицательной обратной связью каскадного соединения линейного усилителя мощности $K_0(s)$ и контролируемого громкоговорителя $W_0(s)$, имеет вид (2) и определяется топологией структурной схемы (рис. 1,а), а именно

передаточными функциями корректирующих звеньев в прямой $W_{\text{ПЦ}}(s)$ и обратной $W_{\text{ОЦ}}(s)$ цепях, передаточной функцией датчика $W_{\text{Д}}(s)$ [3]:

$$W_{\text{ОС}}(s) = \frac{K_0(s) \cdot W_0(s) \cdot W_{\text{ПЦ}}(s)}{1 + K_0(s) \cdot W_0(s) \cdot W_{\text{ПЦ}}(s) \cdot W_{\text{ОЦ}}(s) \cdot W_{\text{Д}}(s)} = \frac{K_0(s) \cdot W_0(s)}{1 + K_0(s) \cdot W_0(s) \cdot W_{\text{К}}(s)} \quad (2)$$

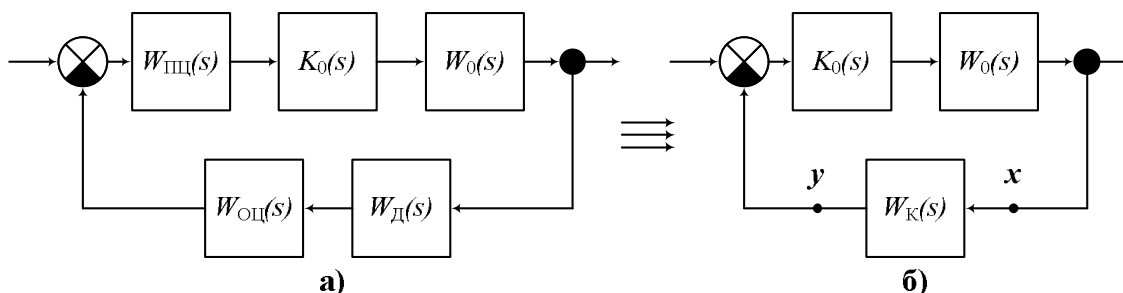


Рисунок 1 – Структурная схема громкоговорителя с ЭМОС:
а) общий вид; б) упрощённая

Для дальнейшего анализа целесообразно несколько упростить структурную схему громкоговорителя с ЭМОС (рис. 1,а), приведя её к виду рис. 1,б. При этом передаточные функции корректора прямой цепи $W_{\text{ПЦ}}(s)$, усилителя $K_0(s)$ и датчика $W_{\text{Д}}(s)$ принимаются линейными, а их модули частотонезависимыми. Варианты структурных схем цепи обратной связи $W_{\text{К}}(s)$ для комбинированных классов ЭМОС, подлежащих исследованию, показаны на рис. 2:

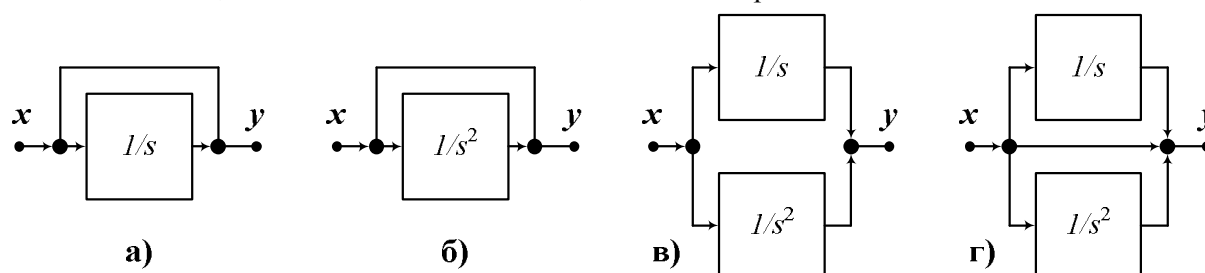


Рисунок 2 – Структурные схемы цепи обратной связи ЭМОС комбинированных классов:
а) по ускорению и скорости; б) по ускорению и смещению; в) по скорости и смещению;
г) по ускорению, скорости и смещению

С учётом (1), (2), рис. 1,б и рис. 2,а передаточная функция громкоговорителя с ЭМОС, сигнал обратной связи которой представляет собой комбинацию электрических эквивалентов ускорения и скорости $W_{\text{А+В}}(s)$, может быть записана в виде (3):

$$\begin{aligned} W_{\text{А+В}}(s) &= \frac{K_0(p) \cdot W_0(p)}{1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_{\text{К}}(p)} = \frac{K_0(s) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \frac{p^2 \cdot (K_0(p) + K_0(p) \cdot p^{-1} + 1) + p \cdot Q^{-1} + 1}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \\ &= \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 \cdot (K_0(p) + K_0(p) \cdot p^{-1} + 1) + p \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot (K_0(p) + Q^{-1}) + 1} = \\ &= \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot (K_0(s) + Q^{-1}) + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

где $p = s \cdot \omega_0^{-1}$ – нормированная комплексная частота.

Анализ передаточной функции (3) громкоговорителя с ЭМОС комбинированного типа, графическая зависимость которой показана на рис. 3,а, позволяет утверждать о снижении добротности громкоговорителя и приобретении им свойств аperiodического звена. При этом наблюдается расширение частотного диапазона снизу, пропорциональное величине усиления в прямой цепи.

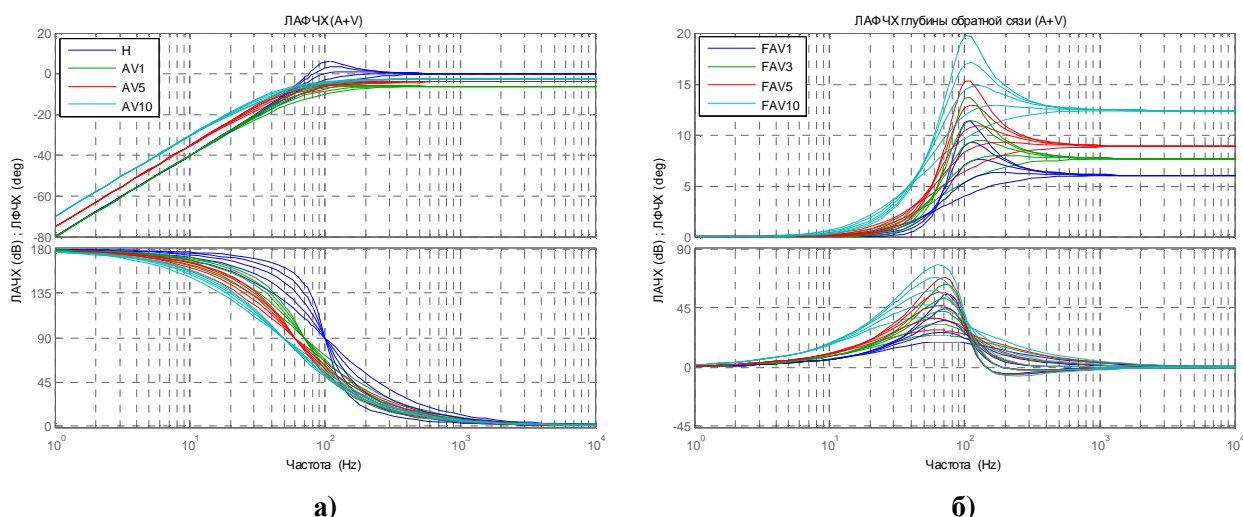


Рисунок 3 – Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с комбинированной отрицательной обратной связью по ускорению и скорости:

а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности $Q=\{0,5; 0,707; 1; 1,4; 2\}$; AV1 – те же системы, охваченные обратной связью по ускорению и скорости; AV5 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 5 дБ; AV10 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 10 дБ; FAV1 – системы, охваченные обратной связью без усиления при разных Q ; FAV3 – те же системы при усилении в 3 дБ; FAV5 – те же системы при усилении в 5дБ; FAV10 – те же системы при усилении в 10 дБ

Для оценки корректирующей способности целесообразно рассмотреть частотную зависимость глубины обратной связи $F_{A+V}(s)$, определяемую выражением (4) как знаменатель передаточной функции (2) с учётом полученной передаточной функции (3):

$$\begin{aligned}
 F_{A+V}(s) &= 1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_k(p) = 1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{p}\right) = \\
 &= \frac{p^2 \cdot (K_0(p) + K_0(p) \cdot p^{-1} + 1) + p \cdot Q^{-1} + 1}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + K_0(s) \cdot s \cdot \omega_0^{-1} + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = (4) \\
 &= \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot (K_0(s) + Q^{-1}) + 1}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}.
 \end{aligned}$$

Ход зависимости $F_{A+V}(s)$, представленный на рис. 3,б, свидетельствует о неравномерной корректирующей способности обратной связи, имеющей явно выраженный максимум на частоте резонанса, стремящейся к нулю в области более низких частот, а на частотах выше резонансной остающейся постоянной. При этом модуль глубины обратной связи всегда положителен, что исключает самовозбуждение системы.

КОМБИНИРОВАННАЯ ПО УСКОРЕНИЮ И СМЕЩЕНИЮ ЭМОС

Передаточная функция громкоговорителя с ЭМОС, сигнал обратной связи которой равен комбинации электрических эквивалентов ускорения и смещения подвижной системы громкоговорителя и формируется цепью, показанной на рис. 2,б, определяется из выражения (2) и может быть записана в виде (5):

$$\begin{aligned}
 W_{A+S}(s) &= \frac{K_0(p) \cdot W_0(p)}{1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_K(p)} = \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} : 1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{p^2}\right) = \\
 &= \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \frac{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot Q^{-1} + (K_0(p) + 1)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot Q^{-1} + (K_0(p) + 1)} = \\
 &= \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + (K_0(s) + 1)}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Глубина обратной связи в этом случае может быть определена согласно (6):

$$\begin{aligned}
 F_{A+S}(s) &= 1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_K(p) = 1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{p^2}\right) = 1 + \frac{K_0(p) \cdot (1 + p^2)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1 + K_0(p) + K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot Q^{-1} + (K_0(p) + 1)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + (K_0(s) + 1)}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Графическая зависимость модуля передаточной функции, показанная на рис. 4,а, позволяет утверждать рост добротности громкоговорителя с ЭМОС комбинированного типа по ускорению и смещению при сохранении неизменной частоты резонанса.

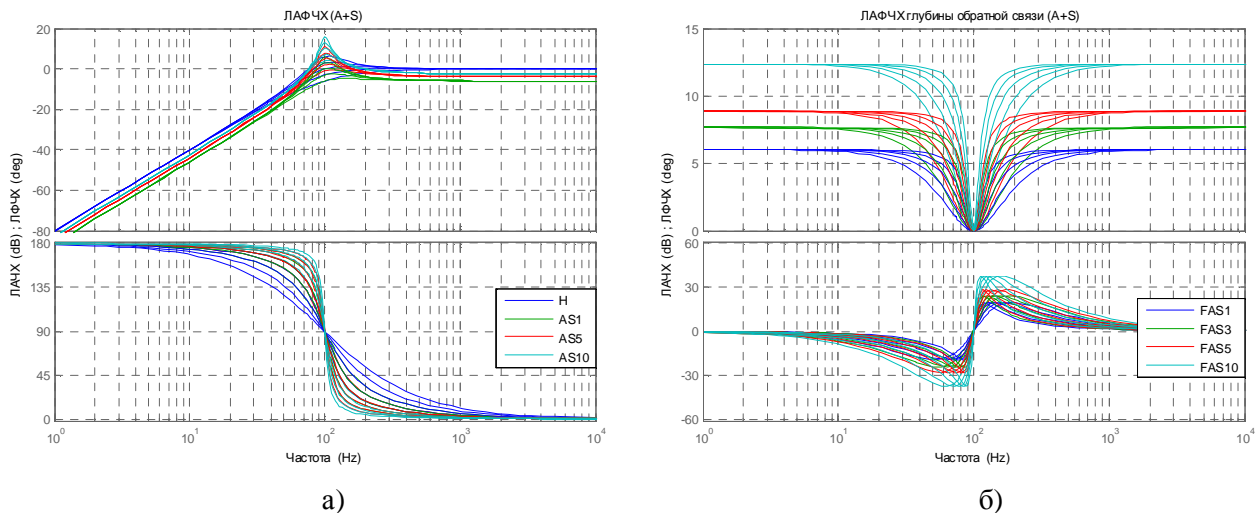


Рисунок 4 – Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с комбинированной отрицательной обратной связью по ускорению и смещению:

- а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности $Q = \{0,5; 0,707; 1; 1,4; 2\}$; AS1 – те же системы, охваченные обратной связью по ускорению и смещению; AS5 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 5 дБ; AS10 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 10 дБ; FAS1 – системы, охваченные обратной связью без усиления при разных Q ; FAS3 – те же системы при усилении в 3 дБ; FAS5 – те же системы при усилении в 5 дБ; FAS10 – те же системы при усилении в 10 дБ

В свою очередь корректирующая способность, определяемая глубиной обратной связи (6) и изображенная на рис. 4,б, является значительной и стремится к постоянству в области частот, включающей окрестность частоты резонанса, для которой, наоборот, характерна незначительная коррекция.

КОМБИНИРОВАННАЯ ПО СКОРОСТИ И СМЕЩЕНИЮ ЭМОС

Сигнал обратной связи, требующийся для организации ЭМОС комбинированного по скорости и смещению типа, может быть сформирован цепью обратной связи, представленной на рис. 2,в. Пе-

редаточная функция в таком случае будет определяться выражением (7), а глубина обратной связи, определяющая корректирующую способность – выражением (8).

$$W_{V+S}(s) = \frac{K_0(p) \cdot W_0(p)}{1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_K(p)} = \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot 1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} \right) =$$

$$= \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \frac{p^2 + p \cdot (Q^{-1} + K_0(p)) + (K_0(p) + 1)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot (Q^{-1} + K_0(p)) + (K_0(p) + 1)} = \quad (7)$$

$$= \frac{K_0(p) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot (Q^{-1} + K_0(s)) + (K_0(s) + 1)}.$$

$$F_{V+S}(s) = 1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_K(p) = 1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} \right) = \quad (8)$$

$$= \frac{p^2 + p \cdot (Q^{-1} + K_0(p)) + (K_0(p) + 1)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot (K_0(s) + Q^{-1}) + (K_0(s) + 1)}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}.$$

Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с ЭМОС комбинированного типа по скорости и смещению показаны на рис. 5,а и демонстрируют смещение резонанса в область высоких частот, что означает ограничение снизу диапазона звуковоспроизведения и его демпфирование за счёт снижения добротности.

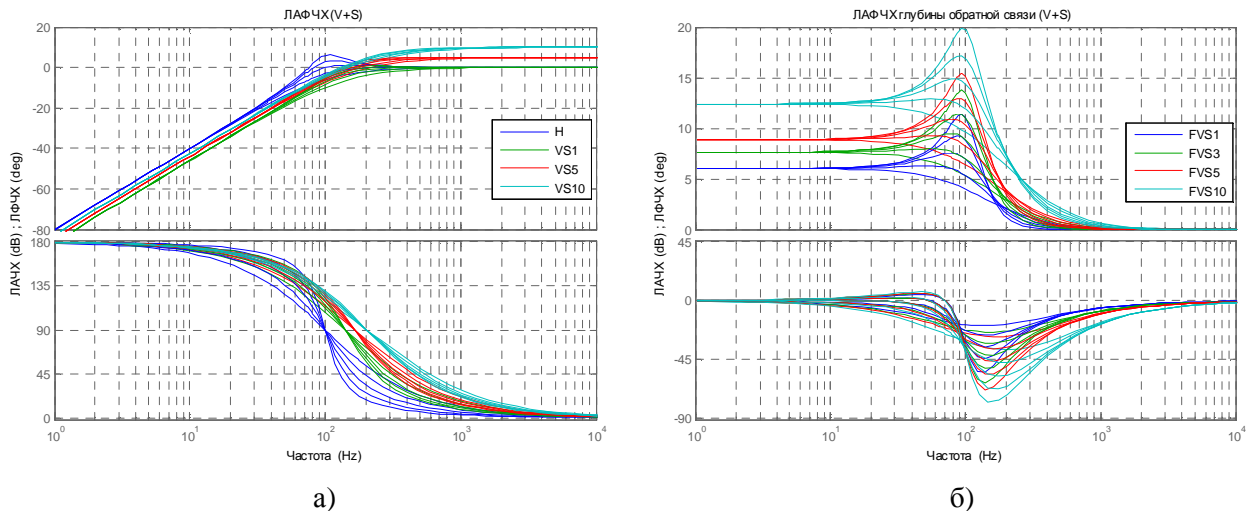


Рисунок 5 – Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с комбинированной отрицательной обратной связью по скорости и смещению:

а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности $Q = \{0,5; 0,707; 1; 1,4; 2\}$; VS1 – те же системы, охваченные обратной связью по скорости и смещению; VS5 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 5 дБ; VS10 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 10 дБ; FVS1 – системы охваченные обратной связью без усиления при разных Q ; FVS3 – те же системы при усилении в 3 дБ; FVS5 – те же системы при усилении в 5 дБ; FVS10 – те же системы при усилении в 10 дБ

Согласно рис. 5,б глубина обратной связи рассматриваемой комбинированной ЭМОС является значительной в области низких частот, достигает максимума на частоте резонанса, и достаточно быстро становится равной нулю с ростом частоты.

КОМБИНИРОВАННАЯ ПО УСКОРЕНИЮ, СКОРОСТИ И СМЕЩЕНИЮ ЭМОС

Для не встречающегося в литературе варианта комбинированной ЭМОС, при которой сигнал обратной связи представляет собой совокупный эквивалент ускорения, скорости и смещения его подвижной системы и формируется с помощью схемы, показанной на рис. 2,г, передаточная функция будет определяться выражением (9):

$$\begin{aligned}
 W_{A+V+S}(s) &= \frac{K_0(p) \cdot W_0(p)}{1 + K_0(p) \cdot W_0(p) \cdot W_K(p)} = \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left[1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} \right) \right] = \\
 &= \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot 1 + \frac{p^2 \cdot K_0(p) + p \cdot K_0(p) + K_0(p)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \frac{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot K_0(p) \cdot (1 + Q^{-1}) + (K_0(p) + 1)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot K_0(p) \cdot (1 + Q^{-1}) + (K_0(p) + 1)} = \\
 &= \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot K_0(s) \cdot (1 + Q^{-1}) + (K_0(s) + 1)}.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Глубина обратной связи может быть определена выражением (10):

$$\begin{aligned}
 F_{A+V+S}(s) &= 1 + \frac{K_0(p) \cdot p^2}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} \right) = \frac{p^2 \cdot (K_0(p) + 1) + p \cdot K_0(p) \cdot (1 + Q^{-1}) + (K_0(p) + 1)}{p^2 + p \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (K_0(s) + 1) + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot K_0(s) \cdot (1 + Q^{-1}) + (K_0(s) + 1)}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Анализ амплитудно-частотной характеристики такой комбинированной ЭМОС (рис. 6,а) показывает демпфирование резонанса, в то время как глубина обратной связи (рис. 6,б) имеет значительную величину во всём частотном диапазоне и для добротности $Q=1$ является равномерной. При росте добротности системы глубина обратной связи в окрестностях резонансной частоты также возрастает, что свидетельствует о повышении корректирующей способности ЭМОС в этой области.

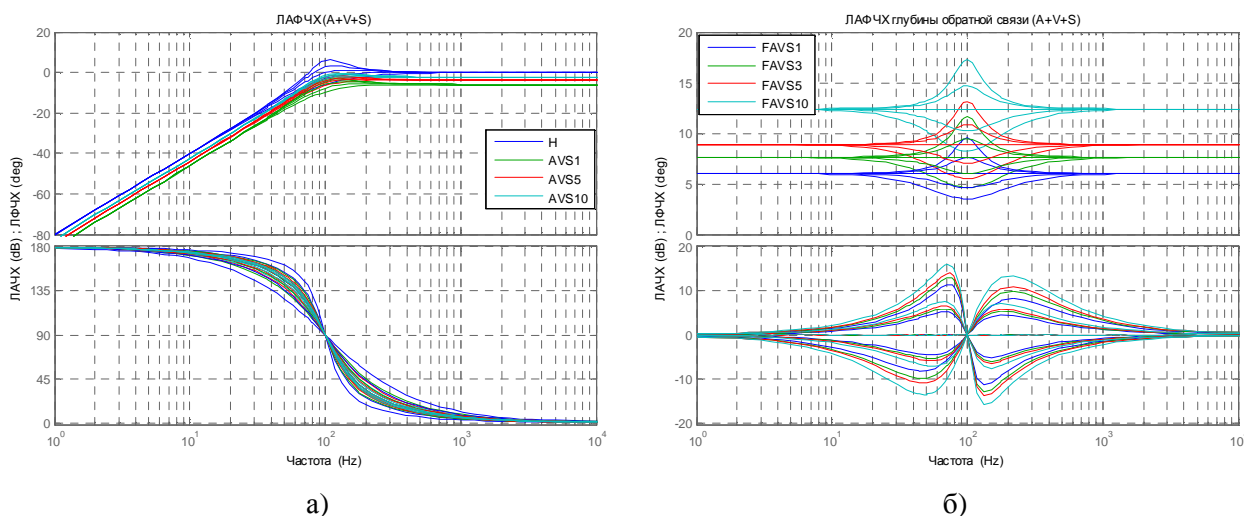


Рисунок 6 – Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с комбинированной отрицательной обратной связью по ускорению, скорости и смещению:

- а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности $Q=\{0,5; 0,707; 1; 1,4; 2\}$; AVS1 – те же системы, охваченные обратной связью по ускорению, скорости и смещению; AVS5 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 5 дБ; AVS10 – те же системы, охваченные обратной связью при усилении в 10 дБ; FAVS1 – системы охваченные обратной связью без усиления при разных Q ; FAVS3 – те же системы при усилении в 3 дБ; FAVS5 – те же системы при усилении в 5дБ; FAS10 – те же системы при усилении в 10 дБ.

ВЫВОДЫ

1. Линейное моделирование показывает, что любой класс комбинированной ЭМОС имеет топологию, не склонную к возбуждению.
2. С точки зрения расширения частотного диапазона звуковоспроизведения целесообразно

применять вариант комбинированной по ускорению и скорости ЭМОС, однако при этом коррекция искажений в области низких частот практически не происходит. Если доминирующим является необходимость коррекции в низкочастотной области, следует применять ЭМОС комбинированного типа по скорости и смещению, рекомендованную в [4], однако приводящую к ограничению диапазона звуковоспроизведения снизу. Таким образом, указанные варианты ЭМОС обеспечивают противоположные эффекты.

3. Комбинированная по ускорению и смещению ЭМОС как самостоятельный класс не может быть рекомендована к применению вследствие роста резонансного пика на частотной характеристике, однако обладает существенной постоянной корректирующей способностью за пределами резонансного пика.

4. Наиболее эффективным является неизвестный ранее класс ЭМОС, сигнал обратной связи в котором формируется комбинацией электрических эквивалентов ускорения, скорости и смещения подвижной системы. Этот класс обратной связи обеспечивает демпфирование резонанса при сохранении неизменным воспроизводимого диапазона частот, и характеризуется равномерной глубиной обратной связи, имеющей большие значения, что свидетельствует о существенной корректирующей способности системы.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Сулима Н.Н. Классическая обратная связь в громкоговорителях / Н.Н. Сулима // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – ХНУ, 2013. – № 4. – С. 62 – 72.
- 2 Small R., Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1&2 / R. Small // JAES, Jan-Feb, 1973.
- 3 Лурье, Б.Я. Классические методы автоматического управления / Б.Я. Лурье, П. Дж. Энрайт // СПб. – БХВ-Петербург – 2004. – 640 с.
- 4 Захарин В.М. Датчиковая электромеханическая обратная связь в акустических системах / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов // Системы и средства передачи информации по каналам связи : сб. ТУИС. – Л.: ЛЭИС – 1981. – С. 133 – 138.