

УДК 621.395.623.7

## РАСШИРЕНИЕ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

СУЛИМА Н.Н.

Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова

## LOUDSPEAKER BANDWIDTH EXTENSION BY MEANS OF MOTION FEEDBACK

SULIMA N.N.

Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov

**Аннотация** Рассмотрена возможность расширения снизу рабочего диапазона частот громкоговорителей при помощи электромеханической обратной связи (ЭМОС). Показано, что применение ЭМОС по смещению является достаточно эффективным методом расширения частотного диапазона, и, благодаря одновременному снижению нелинейных искажений, может стать альтернативой применению таких конструкторских методов как инвертирование фазы, использование массивных подвижных систем и закрытых корпусов больших объемов.

**Abstract** Possibility of extension of the low frequency limit of loudspeakers by means of motion feedback is considered. It is shown that use of MFB is an effective method of expansion of bandwidth, and, thanks due to simultaneous decrease of nonlinear distortion, can be alternative to application of such design methods as phase inverting, use of massive moving coil systems and the closed cases of large volumes.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач электроакустики, полностью не решенной в настоящее время, является повышение эффективности излучения в области низких частот [1]. Нижняя граница рабочего диапазона громкоговорителя определяется его резонансной частотой, которая в свою очередь зависит от типа акустического оформления (корпуса) и количественно определяется выражениями (1):

$$f_{зЯ} = f_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{c_0}{c_Я}}, \quad f_{ФИ} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m_{ФИ} \cdot c_Я}} \quad (1)$$

где  $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m_0 \cdot c_0}}$  – частота резонанса головки громкоговорителя (ГГ) без акустического оформления;

$f_{зЯ}, f_{ФИ}$  – частоты резонанса громкоговорителя закрытого и фазоинверсного типов акустического оформления;

$m_0, m_{ФИ}$  – массы подвижной системы головки громкоговорителя и воздуха в отверстии (трубе) фазоинвертора;

$c_0, c_Я$  – гибкости подвеса диффузора головки и воздуха внутри корпуса.

В идеальном случае открытого акустического оформления и отсутствия акустического короткого замыкания – т.е. установки ГГ в бесконечный экран, нижняя рабочая частота громкоговорителя определяется резонансной частотой  $f_0$  [2]. Эффект акустического короткого замыкания требует использования закрытого акустического оформления, что при конечных объемах корпусов повышает резонансную частоту громкоговорителя  $f_{зЯ} > f_0$ . Понижению рабочей частоты в закрытых системах до частоты  $f_0$  и ниже способствует применение фазоинверсных громкоговорителей, резонансная частота которых определяется частотой собственного резонанса акустического резонатора фазоинвертора  $f_{ФИ} < f_{зЯ}$  и обычно выбирается  $f_0$  [3].

Анализ выражений (1) показывает несколько методов расширения частотного диапазона громкоговорителя:

1. Увеличение массы подвижной системы ГГ, что приводит к снижению общей чувствительности громкоговорителя и дополнительным затратам мощности. Обычно такой метод не применяется [4]

2. Повышение гибкости подвеса подвижной системы ГГ путём увеличения его эластичности, что приводит к паразитным поперечным колебаниям диффузора и возникновению искажений [5].

3. Нарращивание гибкости воздуха внутри корпуса громкоговорителя путём увеличения его объема, что ухудшает массогабаритные показатели громкоговорителя [6].

Очевидно, что применение какого-либо из указанных конструкторских методов приводит либо к падению чувствительности громкоговорителя и снижению общего КПД, либо к увеличению объема корпуса. Однако известен электронный метод регулирования параметров громкоговорителей, позволяющий, в том числе, снижать граничную рабочую частоту и заключающийся в организации электромеханической обратной связи (ЭМОС), полностью охватывающей систему «усилитель-громкоговоритель» [7].

Задачей данной работы является исследование эффективности применения ЭМОС в случае приоритетности задачи расширения снизу частотного диапазона громкоговорителей.

### РАСШИРЕНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ ПУТЁМ ОРГАНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Как известно, ЭМОС представляет собой разновидность отрицательной обратной связи (ООС), в петлю которой включается электромеханическая система громкоговорителя (рис.1), а сигнал обратной связи формируется при помощи специального датчика о колебаниях подвижной системы ГГ [8].

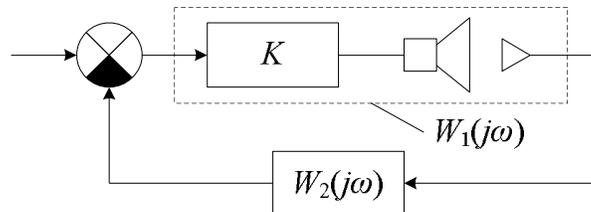


Рисунок 1 – Структурная схема громкоговорителя с ЭМОС

В связи с этим, для громкоговорителей с ЭМОС справедливо известное в теории автоматических систем утверждение о расширении снизу рабочего диапазона в глубину обратной связи раз [9], которая определяется фундаментальным выражением (2):

$$F = 1 + W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) = 1 + \beta \cdot K \quad (2)$$

где  $W_1(j\omega)$ ,  $W_2(j\omega)$  – передаточные функции прямой и обратной цепи системы;

$K$ ,  $\beta$  – коэффициенты усиления в прямой цепи и в цепи обратной связи, причём  $\beta K \gg 1$ .

Такое расширение не может быть сколь угодно большим в силу особенностей ЭМОС, а именно из-за убывания глубины обратной связи (ОС) на низких частотах и больших фазовых сдвигов, присутствующих в ОС, приводящих к самовозбуждению [10, 11]. Действительно, сигнал ОС может быть пропорционален ускорению, скорости, смещению подвижной системы головки громкоговорителя, либо их комбинациям, что приводит к изменениям передаточной функции громкоговорителя с ЭМОС, которую необходимо проанализировать на предмет выбора оптимального для решения поставленной задачи типа ЭМОС.

С учётом общепринятого представления о громкоговорителе в закрытом корпусе как о фильтре верхних частот второго порядка [12], его нормированная передаточная функция будет определяться известным выражением (3):

$$W_1(j\omega) = \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_0 \cdot Q} + 1} \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – резонансная круговая частота громкоговорителя, определяемая в (1);

$Q$  – полная добротность громкоговорителя, величина которой подбирается равной 0.5 с целью получения гладкой АЧХ с субъективно обоснованным спадом в области НЧ дБ/октава [13].

ЭМОС, по своей сути являясь ООС, изменяет передаточную функцию системы «усилитель-громкоговоритель», которая принимает общеизвестный из теории обратной связи [14] вид (4):

$$W_{\text{ЭМОС}} = \frac{W_1(j\omega)}{1 + W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega)} \sim a \quad (4)$$

где  $a$  – ускорение подвижной системы головки громкоговорителя, которое пропорционально звуковому давлению громкоговорителя, а значит и его передаточной функции [15].

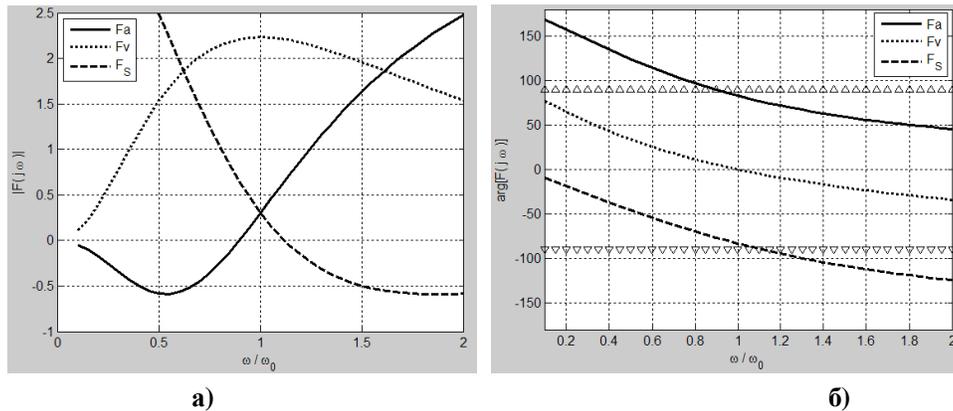
Знаменатель выражения (4) является ничем иным как глубиной обратной связи  $F$ , которая, в общем виде определяется выражением (2), и для ЭМОС по ускорению  $F_a$ , скорости  $F_v$  и смещению  $F_s$  имеет вид (5):

$$F_a(j\omega) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 \cdot (\beta + 1) + \frac{j\omega}{\omega_0} \cdot \frac{1}{Q} + 1}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_0 \cdot Q} + 1}, \quad F_v(j\omega) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_0} \cdot \left(\beta + \frac{1}{Q}\right) + 1}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_0 \cdot Q} + 1}, \quad (5.1, 5.2)$$

$$F_s(j\omega) = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_0} \cdot \frac{1}{Q} + (\beta + 1)}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{j\omega}{\omega_0 \cdot Q} + 1} \quad (5.3)$$

Следует отметить, что выражения (5.1–5.3) получены операторным (символическим) методом путём подстановки в (2) исходного выражения (3) для ЭМОС по ускорению и одинарного и двойного интеграла от (3) для ЭМОС по колебательной скорости и смещению соответственно, и имеют некоторые отличия от аналогичных выражений, указанных в [15].

Поставленная задача расширения частотного диапазона требует анализа зависимостей (5) в области частот, лежащих ниже  $f_0$ , и состоит в поиске того типа связи, который обеспечивает максимальную глубину  $F$  в указанной области частот без самовозбуждения системы. Очевидно, что ЭМОС по ускорению приведёт к самовозбуждению системы (кривая  $F_a$  на рис.2б), устойчивость же обеспечивается ЭМОС по смещению на частотах ниже  $f_0$  (кривая  $F_s$  на рис.2б), и во всём диапазоне для ЭМОС по скорости (кривая  $F_v$  на рисунке 2б).



**Рисунок 2** – АЧХ (а) и ФЧХ (б) глубины ЭМОС по ускорению, скорости и смещению подвижной системы головки громкоговорителя ( $Q=0.5, \beta=0.5$ ).

В связи с убыванием глубины обратной связи по скорости в сторону низких частот, оптимальной для расширения частотного диапазона является ЭМОС по смещению, обеспечивающая максимальную глубину  $F=F_s$ . При практической реализации ЭМОС по смещению необходимо исключить возможность самовозбуждения на частотах выше  $f_0$ , ограничив область действия петли ЭМОС при помощи ФНЧ с частотой среза равной  $f_0$ .

Полученные результаты полностью коррелируют с теорией простой механической колебательной системы (ПМКС), в виде которой представляется идеальное механическое звено громкоговорителя [16].

ЭМОС как и любая другая ООС позволяет перераспределить мощность, потребляемую от усилителя с целью повышения эффективности излучения в требуемом частотном диапазоне. При этом точная количественная оценка требуемого запаса по мощности для организации ЭМОС сопряжена с рядом трудностей, а именно необходимостью учитывать статистические характеристики сигналов, а также допустимую крутизну спада АЧХ в области НЧ, что требует дополнительных экспериментальных исследований [13]. В работе [10] показано, что для громкоговорителя закрытого типа с передаточной характеристикой вида (3) снижение граничной рабочей частоты на октаву потребует 16-кратного запаса по мощности, в то же время учёт статистических данных позволяет говорить о требуемом 8-кратном запасе, что указано в работе [17].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Не смотря на то, что в большинстве работ по ЭМОС ее предлагается использовать для уменьшения нелинейных искажений, она также является эффективным методом расширения снизу рабочего частотного диапазона, что наиболее актуально для каналов сверхнизкой частоты многоканальных акустических систем.

2. Использование ЭМОС по смещению совместно с частотной компенсацией самовозбуждения позволяет существенно расширить частотный диапазон в области низких частот без изменения конструкции громкоговорителя только за счёт потребления дополнительной мощности от усилителя.

3. Организация ЭМОС по смещению также сохраняет основное свойство систем с ООС по уменьшению нелинейных искажений, что делает ЭМОС более выигрышным методом улучшения характеристик громкоговорителей в сравнении с какими-либо конструкторскими методами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фурдуев В. В. Электроакустика [текст] / В. В. Фурдуев. // М. – Л. : ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 516 с.
2. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания [текст] / В. В. Фурдуев. // М.: Связьиздат. – 1960. – 320 с.
3. Техника высококачественного звуковоспроизведения / Сухов Н.Е., Бать С.Д., Колосов В.В., Чупаков А.Г. – К. : Техника, 1985. – 160 с.
4. Акустика: Учебник для вузов [Текст] / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев; под ред. Ю. А. Ковалгина // М. : Горячая линия–Телеком, 2009. – 660 с.
5. Римский-Корсаков, А.В. Электроакустика [Текст] / А.В. Римский-Корсаков – М.: Связь, 1973. – 272 с.
6. Электроакустика и звуковое вещание: учеб. пособие для вузов [Текст] / И. А. Алдошина, Э. И. Вологдин, А. П. Ефимов и др. ; под общ. ред. Ю. А. Ковалгина // М.: Горячая линия–Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
7. H.F. Olson Elements of Acoustical Engineering [Text] / H.F. Olson // New York: D. Van Nostrand Co, Inc. – 1940.
8. Митрофанов, Ю. Н., Пикерсгиль А. А. Электродинамическая обратная связь в акустических системах [текст] / Ю. Н. Митрофанов, А. А. Пикерсгиль // Журн. Радио. – 1970. – №5. – С. 25 – 26.
9. Остапенко Г.С. Усилительные устройства: Учеб. пособие для вузов [текст] / Г.С. Остапенко // М.: Радио и связь. – 1989. – 400 с.
10. Klassen, J.A. Motional feedback with loudspeakers [Text] / J.A. Klassen, S.H. de Koning // Philips technical review. – 1968. – №5. – P. 148 – 157.
11. Электромеханическая обратная связь в акустических системах : сб. науч. тр. ОЭИС. Теория и техника связи – Одесса. – 1981. – С. 96 – 100.
12. R. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1&2 [Text] / R. Small // JAES, Jan-Feb. 1973.
13. Применение электромеханической обратной связи в электроакустических системах: сб. ТУИС. Теория передачи информации по каналам связи – Л. : ЛЭИС, 1981. – С. 103 – 109.
14. Я.З. Цыпкин Основы теории автоматических систем [Текст] / Я.З. Цыпки / М: «Наука», 1977. – 560 с.
15. Датчиковая электромеханическая обратная связь в акустических системах : сб. ТУИС. Системы и средства передачи информации по каналам связи – Л. : ЛЭИС, 1981. – С. 133 – 138.
16. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура [текст] / Я.Ш. Вахитов // М: Искусство. – 1982. – 415 с.
17. Выходец А.В. Справочник по радиовещанию [текст] / А.В. Выходец, В.М. Захарин, Е.М. Рудый, В.И. Денисов // К: “Техніка” – 1981. – 264 с.