

1. Chmyh M.K. Cifrovaja fazometrija. Moscow. Radio i Svjaz', 1993. 184 p.
2. Pestrjakov V.B. Fazovye radiotekhnicheskie sistemy (osnovy statisticheskoj teorii). Moscow. Sovetskoe radio, 1968. 468 p.
3. Bogorodickij A.A. , Ryzhevskij A.G. Noniusnye analogo-cifrovye preobrazovateli. Biblioteka po avtomatike, vypusk 533. Moscow. Jenergija, 1975. 120 p.
4. Mazur I., Horiashchenko K. L. Analiz sumarnoho fazovoho syhnalu vidbytta na riznykh chastotakh metodamy spektralnoho analizu. Khmelnytskyi. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. 2009. Issue 2. P. 36-40.
5. Horiashchenko K.L. Analiz spektralnykh skladovykh sumarnoho syhnalu dlia bahatoshkalnoho fazovoho metodu analizu stanu linii zviazku. Povidomlennia I. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2007. Issue 6. Part. 1. P. 115-120.
6. Shrjufer Je. Obrabotka signalov: cifrovaja obrabotka diskretizirovannykh signalov. Kyiv. Libid', 1995. 320 p.
7. Horiashchenko K.L. Impulsno-fazovi vymiriuvannia dlia linii iz dvoma neodnorodnostiamy. Khmelnytskyi. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. 2003. Issue 1. P. 80-82.
8. Horiashchenko K.L. Obertannia chasovykh skladovykh sumarnoho syhnalu v fazovii dalnometrii. Khmelnytskyi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Technical sciences. 2007. Issue 1. P.144-147.

Рецензія/Peer review : 5.11.2013 р.

Надрукована/Printed :13.12.2013 р.

УДК 621.397

Н.Н. СУЛИМА

Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова

## КЛАССИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯХ

*С помощью моделирования на основе линейной модели громкоговорителя закрытого типа показаны основные особенности и отличия известных методов организации электромеханической обратной связи (ЭМОС) в громкоговорителях. Предложена классификация громкоговорителей с ЭМОС по типу стабилизируемого механического параметра, дана трактовка приобретаемых громкоговорителями с ЭМОС новых свойств с позиций механики. Показаны причины низкой эффективности ЭМОС по звуковому давлению.*

*Ключевые слова: электромеханическая обратная связь, классификация, эффективность, механическая трактовка.*

N.N. SULIMA

Odessa National A.S. Popov Academy of Telecommunications

## CLASSICAL FEEDBACK IN LOUDSPEAKERS

*The main features and differences of known motional feedback (MFB) methods in loudspeakers with help of linear modeling are investigated. The classification of loudspeakers with MFB based on type of stabilized mechanical parameter and interpretation of new features are proposed. Low-efficiency reasons of sound pressure MFB are shown.*

*Keywords: motional feedback, classification, efficiency, mechanical interpretation.*

### Введение

Современный громкоговоритель (акустическая система), является достаточно низкоэффективным электроакустическим преобразователем, обладающим высоким, в сравнении с другими звеньями звукового тракта аудиовизуальной системы в состав которого он входит, уровнем линейных и нелинейных искажений, особенно существенным в области низких частот. Повышению эффективности преобразования и снижению искажений в какой-то степени способствуют практически исчерпавшие себя в настоящее время рациональное конструирование акустического оформления громкоговорителей и улучшение технологий изготовления их излучателей.

С другой стороны, в кибернетике известен метод отрицательной обратной связи, позволяющий существенно улучшить параметры системы, в том числе и громкоговорителя, за счёт рационального перераспределения подводимой энергии [1].

Не смотря на кажущуюся простоту и многочисленные попытки применения, обратная связь в громкоговорителях (рис. 1, а), носящая название электромеханической обратной связи (ЭМОС), не нашла широкого распространения, а число промышленных образцов с применением данной технологии остаётся незначительным.

Кроме известных сложностей общего характера, возникающих при использовании обратной связи, и состоящих в необходимости поиска компромисса между глубиной обратной связи и устойчивостью системы, существует специфическая для громкоговорителей с ЭМОС проблема неоднозначности самого сигнала обратной связи. Как известно реакцией громкоговорителя на электрическое воздействие является звуковое давление, формируемое в результате механических колебаний подвижных систем его излучателей. При этом совершенно логичное использование в качестве датчика-формирователя сигнала обратной связи инверсного механоэлектрического преобразователя, коим является микрофон-приёмник давления, оказывается практически неосуществимым в силу возникающих задержек и чувствительности к паразитным акустическим колебаниям. В связи с этим в качестве датчиков сигнала обратной связи используют измерители механических параметров подвижных систем излучателей громкоговорителя: смещения, скорости, ускорения.

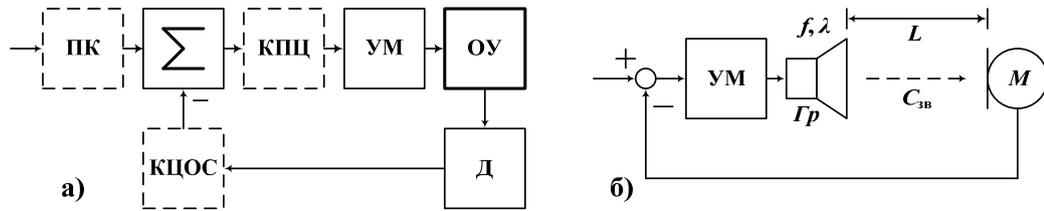


Рис. 1. Електромеханічна зворотна зв'язь в громкоговорителях

а) обобщенная структурная схема системы с громкоговорителем, охваченным обратной связью; б) к определению величин транспортной задержки в системе с ЭМОС по давлению. ПК, КПЦ, КЦОС – могут отсутствовать в реальной системе корректоры, соответственно предварительный, прямой цепи, цепи обратной связи; УМ – усилитель мощности; ОУ – объект управления, в роли которого выступает громкоговоритель; Д – датчик сигнала обратной связи.

Целью данной обзорной статьи является проведение общего анализа известных методов введения обратной связи в систему «громкоговоритель-усилитель мощности», их классификация, оценка потенциальных возможностей каждого метода и присущих им особенностей. Поставленная цель будет достигаться путём рассмотрения интересующих процессов с точки зрения общепринятых положений и терминологии теории управления, что даст возможность обобщения известных результатов и создаст предпосылки к обеспечению отсутствующей на сегодняшний день адаптации теории управления к громкоговорителям.

### Классификация ЭМОС в громкоговорителях

Разнородность громкоговорителя по входу и выходу, а именно электрический характер входного сигнала и механический характер формируемого под его воздействием звукового давления, усложняет применение к громкоговорителям с ЭМОС известной классификации обратной связи для однородных по входу и выходу электронных систем.

Подавляющая часть работ по ЭМОС характеризуется поиском путей формирования сигнала обратной связи, что подтверждается большим числом патентов на датчики обратной связи, использующие различные механизмы формирования сигнала обратной связи на основе анализа движения диафрагмы. Отсюда целесообразным видится проведение требуемой классификации по способу формирования сигнала обратной связи.

Учтя измеряемые механические характеристики подвижной системы громкоговорителя, предполагая возможность их линейной комбинации, а также отбрасывая вопросы физической реализуемости некоторых классов, можно предложить восемь различных вариантов ЭМОС (рис. 2).



Рис. 2. Классификация громкоговорителей с ЭМОС по типу формируемого сигнала обратной связи

Следует отметить, что некоторые из указанных механических параметров, в частности скорость, ускорение и смещение подвижной системы, связаны между собой интегро-дифференциальными соотношениями, что позволяет несколько видоизменить классификацию, выражая имеющиеся параметры один через другой. Такое представление может быть полезным на практике, т.к. позволяет переходить от нескольких отдельных датчиков разных типов к одному датчику с соответствующей системой обработки формируемого им сигнала.

### Практические сложности организации ЭМОС по звуковому давлению

Выше было отмечено, что причинами, усложняющими практическое использование микрофона в качестве датчика сигнала обратной связи, являются паразитные фазовые сдвиги и чувствительность к акустическим помехам и шумам.

Транспортная задержка, обуславливающая нежелательный фазовый сдвиг, определяется временем, которое затрачивается на распространение звука с конечной скоростью от громкоговорителя к микрофону, и вызывает запаздывание реакции последнего (рис. 1, б).

Согласно [2] допустимая величина фазового сдвига  $B$  составляет 1 рад., что позволяет, зная время транспортной задержки, определить допустимое расстояние между диффузором громкоговорителя и микрофоном – датчиком давления для оценки потенциальной возможности организации системы ЭМОС с использованием электрического эквивалента звукового давления в качестве сигнала обратной связи. Допуская, что остальные элементы цепи обратной связи не вносят дополнительных фазовых сдвигов, соотношения между фазовой задержкой  $B$  и допустимым расстоянием  $L$  можно представить выражениями (1):

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{C_{зв}} \Rightarrow L_{дон} \leq \frac{C_{зв}}{2 \cdot \pi \cdot f} \approx \frac{52,55}{f} \quad (1)$$

где  $f$  – частота звуковых колебаний;  $L$  – расстояние между громкоговорителем и микрофоном;  $L_{дон}$  – допустимое расстояние между громкоговорителем и микрофоном при  $B \leq 1$ .

Расчёты, проведённые согласно (1) для частот звукового диапазона с октавным шагом, представлены в табл. 1:

Таблица 1

**Максимально допустимые расстояния между громкоговорителем и микрофоном для обеспечения заданной величины фазового сдвига для разных частот**

$f$ , Гц	16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	20000
$L$ , см	328,42	166,82	83,41	42,04	21,02	10,51	5,25	2,63	1,31	0,66	0,33	0,26

Согласно табл. 1 организация ЭМОС в полном частотном диапазоне, физически невозможна, т.к. максимально допустимые расстояния установки микрофона – датчика сигнала обратной связи меньше величин смещения диффузоров современных громкоговорителей. Однако для диапазона низких частот эти расстояния составляют несколько сантиметров, что, на первый взгляд, не должно вызывать недопустимой величины фазовых задержек. При более детальном рассмотрении следует учитывать фазовые задержки, вносимые другими звеньями цепи обратной связи, которые первоначально были отброшены, что приведёт к ужесточению требований относительно допустимой величины транспортной задержки, и скажется на сокращении максимально допустимого расстояния между громкоговорителем и микрофоном. Оценить величину сокращения допустимого расстояния можно, используя выражение (1) с учётом того, что каждый дополнительный градус фазовой задержки в цепи обратной связи снижает допустимую величину общей фазовой задержки  $B$  на  $\pi/180$  радиан (рис. 3).

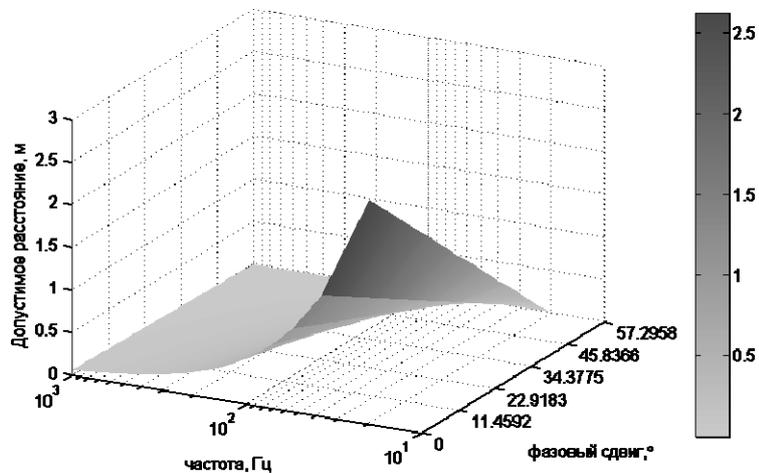


Рис. 3. Зависимость допустимого расстояния между громкоговорителем и микрофоном при наличии дополнительного фазового сдвига в цепи обратной связи

Другая известная причина, препятствующая применению микрофонов в системах с ЭМОС – подверженность внешним акустическим шумам и помехам, может быть наиболее обще рассмотрена, опираясь на классические положения теории обратной связи, изложенные в [1]. Представляя простой случай действия аддитивной помехи как появление дополнительного источника электрического напряжения в прямой цепи (рис. 4, а), можно убедиться, что акустические помехи в транспортном канале подавляются обратной связью также как любые другие помехи и искажения в системе.

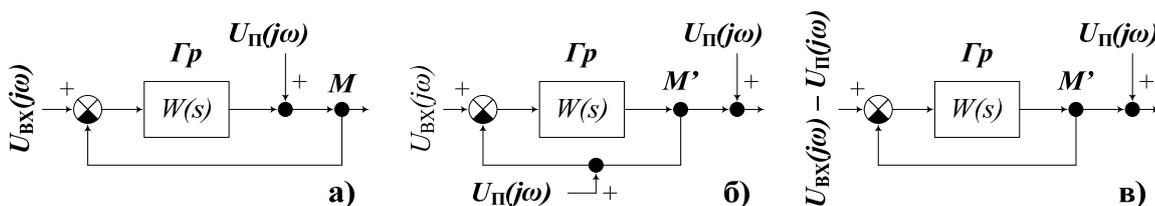


Рис. 4. Единичная (полная) отрицательная обратная связь при наличии акустических помех: а) действие помех в транспортном канале между громкоговорителем и микрофоном; б) эквивалентная схема с условным выносом помехи за систему с ЭМОС; в) приведённая схема с действием помехи на входе системы с ЭМОС

Для оценки действия акустической помехи в транспортном канале (рис. 4, а) целесообразно осуществить перенос точки её приложения согласно известным правилам теории управления так, чтобы помеха оказалась приложенной ко входу системы, что приведёт к формальному вынесению действия помехи за точку съёма сигнала обратной связи (рис. 4, б) и изменению внешнего воздействия на величину помехи (рис. 4, в), облегчая запись соотношений между внешним воздействием и реакцией системы на него [3].

В случае внешнего воздействия, изображение которого  $U_{\text{вх}}(p)$ , и аддитивной помехи в транспортном канале с изображением  $U_n(p)$ , изображение выходного воздействия  $U_{\text{вых}}(p)$  запишется в виде (2):

$$U_{\text{вых}}(p) = U_{\text{вх}}(p) \cdot \frac{W(p)}{1+W(p)} - U_n(p) \cdot \frac{W(p)}{1+W(p)} + U_n(p) \quad (2)$$

где  $W(p)$  – передаточная функция каскадного соединения усилителя мощности и громкоговорителя.

Аналогичное выражение для системы не охваченной обратной связью имеет простой вид (3):

$$U'_{\text{вых}}(p) = U_{\text{вх}}(p) \cdot W(p) + U_n(p) \quad (3)$$

Предполагая отсутствующим входное воздействие  $U_{\text{вх}}(p)$ , выражения (2) и (3) переписутся в виде (4) и (5), что позволяет теоретически оценить величину помехи на выходе систем:

$$U_{\text{вых}}(p) / U_{\text{вх}}(p) = 0 = U_n(p) - U_n(p) \cdot \frac{W(p)}{1+W(p)} = U_n(p) \cdot \left( 1 - \frac{W(p)}{1+W(p)} \right) = U_n(p) \cdot \left( \frac{1}{1+W(p)} \right) \quad (4)$$

$$U'_{\text{вых}}(p) / U_{\text{вх}}(p) = 0 = U_n(p) \quad (5)$$

Сравнивая (4) и (5) несложно заметить, что величина транспортной помехи уменьшается в системе с обратной связью в  $1+W(p)$  раз.

#### Влияние датчика сигнала обратной связи на фундаментальные параметры громкоговорителя

Использование отдельного датчика сигнала обратной связи в большинстве практических случаев приводит к некоторому изменению фундаментальных параметров колебательной системы громкоговорителя в связи с необходимостью её механического контакта с измерительным звеном датчика, вызывающего прирост её общей массы. Полагая массу измерительного звена датчика равной  $m_\delta$ , легко проанализировать его влияние на параметры громкоговорителя с подвижной системой, имеющей массу  $m$ .

Резонансная частота громкоговорителя с установленным датчиком сигнала обратной связи  $\omega_0'$  будет определяться выражением (6), а полная добротность  $Q'$  – выражением (7):

$$\omega_0' = \frac{1}{\sqrt{(m+m_\delta) \cdot c}} = \sqrt{\frac{m}{(m+m_\delta) \cdot m \cdot c}} = \sqrt{\frac{m}{m+m_\delta}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m \cdot c}} = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{m}{m+m_\delta}} \quad (6)$$

$$Q' = \frac{1}{r \cdot c \cdot \omega_0'} = \frac{1}{r \cdot c \cdot \omega_0} \cdot \sqrt{\frac{m+m_\delta}{m}} = Q \cdot \sqrt{\frac{m+m_\delta}{m}} = Q \cdot \sqrt{1 + \frac{m_\delta}{m}} \quad (7)$$

где  $m$  – масса подвижной системы,  $c$  – её гибкость,  $r$  – акустический импеданс,  $\omega_0$  – резонансная частота громкоговорителя;  $Q$  – его добротность [4].

Таким образом дополнительная масса измерительного звена датчика сигнала обратной связи приводит к снижению резонансной частоты и увеличению добротности, причём скорость возрастания добротности с увеличением  $m_\delta$  выше скорости снижения резонансной частоты. Отмечу известный факт, что изначально положительное свойство снижения резонансной частоты становится в этом случае отрицательным, т.к. присоединение дополнительной массы означает повышение инерционных свойств системы, что приводит к росту реактивной части механического сопротивления громкоговорителя, а значит требует от усилителя мощности дополнительной энергии для компенсации имеющего в этом случае падения активной мощности.

#### Громкоговоритель как объект управления

Для анализа и синтеза громкоговорителей успешно применяется теория Тилля-Смолла, представляющая собой применение теории электрических цепей к громкоговорителям, представленным в виде эквивалентных электрических схем согласно методу электромеханических аналогий. Теория Тилля-Смолла утверждает, что громкоговоритель, в общем случае, следует рассматривать как фильтр верхних частот (ФВЧ), порядок которого отличается в зависимости от акустического оформления излучателей громкоговорителя, нижняя граничная частота которого определяется частотой механического резонанса громкоговорителя, а добротность определяет форму характеристики на нижней границе диапазона [4]. Передаточная функция громкоговорителя  $W_0(s)$  с распространённым акустическим оформлением в виде закрытого ящика, содержащего электромеханический преобразователь с известными механическими

параметрами, имеет вид (8), соответствующий второму порядку ФВЧ:

$$W_0(s) = \frac{p_{36}(s)}{u_{ex}(s)} = \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1} \quad (8)$$

где  $s = j \cdot \omega$  – комплексная частота;

Следует отметить, что выражение (8) справедливо только для области низких частот и представляет собой приближенную линейную модель громкоговорителя, который, строго говоря, является нелинейной системой с распределёнными параметрами. Допущение о работе громкоговорителя в так называемом «поршневом режиме» существенно упрощает анализ и позволяет пользоваться указанной выше аппроксимацией [5].

Аналитическое представление передаточной функции обеспечивает возможность получения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик громкоговорителя, переходной характеристики, а также позволяет определить особые точки – полюса и нули передаточной функции с целью анализа устойчивости системы при охвате её обратной связью.

В теории управления известен метод анализа потенциальной управляемости системой на основании оценки её динамических характеристик. Абстрактный анализ передаточной функции (8) позволяет утверждать, что обладающий ею четырёхполюсник представляет собой каскадное соединение трёх типовых звеньев: колебательного звена второго порядка, вырождающегося в аperiodическое звено второго порядка при  $Q \leq 0.5$ , что на практике не встречается, и двух дифференциаторов – звеньев первого порядка. Данные типовые звенья обладают полной наблюдаемостью и управляемостью, что составляет необходимое условие для полной наблюдаемости и управляемости их каскадного соединения [6]. Анализ матриц наблюдаемости и управляемости системы с передаточной функцией (8) по Калману показывает и её полную наблюдаемость и управляемость, что создаёт предпосылки для организации эффективной обратной связи [7].

Согласно (8) поведение громкоговорителя в области низких частот определяется двумя параметрами – циклической частотой собственного резонанса  $\omega_0$  и добротностью  $Q$ , устанавливающих как нижнюю границу рабочего диапазона частот, так и степень демпфирования резонанса, а значит форму и длительность переходного процесса. При этом целесообразно обеспечивать максимальную равномерность АЧХ в как можно более широком диапазоне частот, при одновременной минимизации собственных колебаний подвижной системы громкоговорителя. Расширению частотного диапазона снизу способствует увеличение добротности  $Q$  [5]. С другой стороны, при увеличении добротности растёт длительность переходного процесса, что ухудшает верность звуковоспроизведения. Уже такое поверхностное рассуждение позволяет утверждать необходимость поиска некоего компромисса между двумя этими параметрами, который может достигаться несколькими различными путями, наиболее употребительными среди которых являются методики, основанные на выборе оптимального акустического оформления. При этом, как будет показано ниже, именно с помощью обратной связи можно осуществить так называемое «электронное» управление указанными параметрами.

### Электромеханическая обратная связь по ускорению

Исходным для формирования ЭМОС по ускорению является применение датчика-измерителя колебательного ускорения подвижной системы громкоговорителя. Придерживаясь широко используемого утверждения, что звуковое давление, создаваемое на выходе громкоговорителя, пропорционально ускорению его подвижной системы, можно записать передаточную функцию громкоговорителя с ЭМОС по ускорению (9), учитывая (8):

$$W_{oc}(s) = \frac{K_0(s) \cdot W(s)}{1 + K_0(s) \cdot W(s)} = \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1} \cdot \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1 + K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1} =$$

$$= \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot (s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1)}{(s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1) \cdot (K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1)} = \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{(K_0(s) + 1) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q + 1} \quad (9)$$

где  $K_0(s)$  – комплексный коэффициент усиления усилителя мощности, обычно принимаемый частотонезависимым.

Эквивалентная схема, соответствующая передаточной функции (9), показана на рис. 5, а, а её логарифмические частотные характеристики – на рис. 6.

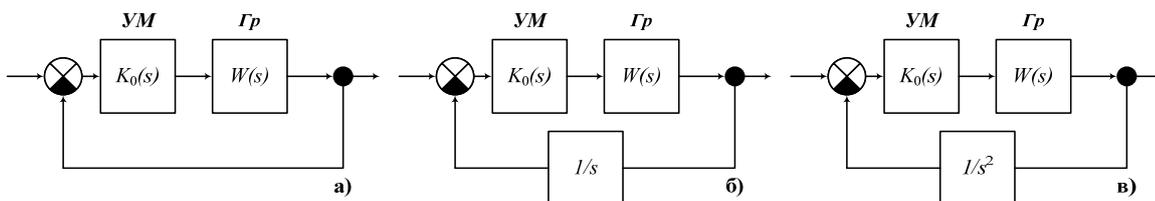


Рис.5. Эквивалентные схемы громкоговорителей с ЭМОС основных классов:

а) по ускорению; б) по скорости; в) по смещению. УМ – усилитель мощности с усилением  $K_0(s)$ ; ГР – громкоговоритель с передаточной функцией  $W(s)$ .

Анализ характеристик (рис. 6, а) позволяют утверждать, что введение обратной связи изменяет свойства громкоговорителя, расширяя его частотный диапазон и увеличивая добротность. ЭМОС по ускорению приводит к снижению частоты основного резонанса при одновременном росте добротности системы по сравнению с неохваченным обратной связью громкоговорителем. Таким образом подтверждается возможность управления циклической частотой собственного резонанса  $\omega_0$  и добротностью  $Q$  электронным образом.

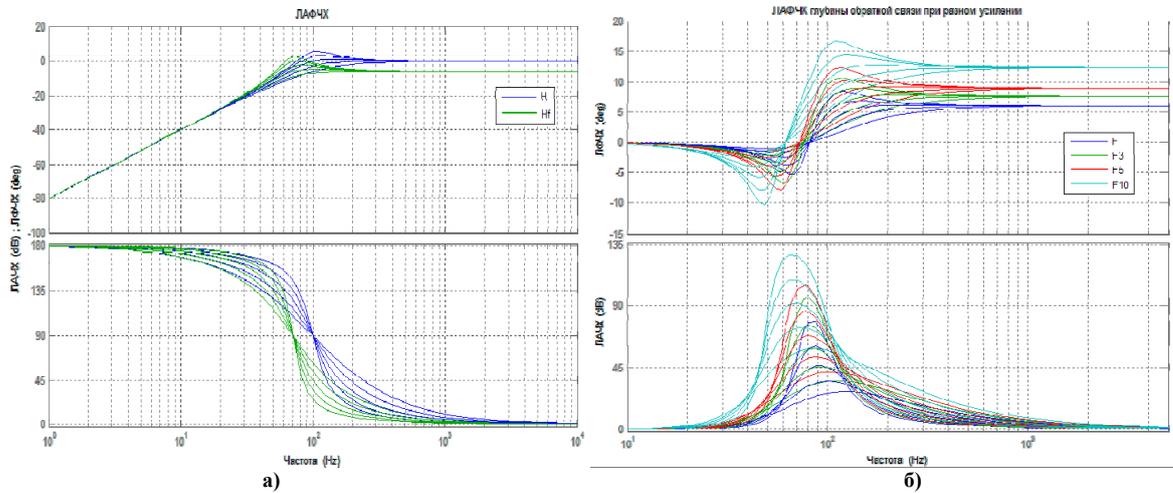


Рис.6. Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с отрицательной обратной связью по ускорению: а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности  $Q=\{0.5, 0.707, 1, 1.4, 2\}$ ; Нf – те же системы, охваченные единичной обратной связью по ускорению без компенсации падения усиления; F – системы с единичной обратной связью по ускорению без усиления; F3 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 3 дБ; F5 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 5дБ; F10 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 10 дБ.

Для оценки корректирующей способности целесообразно рассмотреть частотную зависимость глубины обратной связи  $F(s)$ , изображенную на рис. 6, б, и определяемую выражением (10):

$$\begin{aligned}
 F(s) &= 1 + K_0(s) \cdot W(s) = 1 + \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1 + K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{(1 + K_0(s)) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Как видно из рис. 6, б эффективность действия ЭМОС по ускорению, определяемая глубиной обратной связи, существенна лишь в области частот выше частоты резонанса, имеет большую неравномерность в области резонанса и отрицательна на частотах ниже резонанса, что является условием самовозбуждения системы и требует коррекции. Кроме этого для повышения эффективности действия обратной связи из полученных данных следует необходимость увеличения равномерности и максимизации глубины обратной связи  $F(s)$  при сохранении устойчивости системы.

### Электромеханическая обратная связь по скорости

Вторым классом являются системы, использующие в качестве сигнала обратной связи электрический эквивалент скорости подвижной системы громкоговорителя. Согласно известным положениям механики ускорение может быть переписано относительно колебательной скорости в виде (11), что эквивалентно добавлению интегратора в цепь обратной связи структурной схемы системы с ЭМОС по ускорению (рис. 5, б):

$$a(s) = s \cdot V(s) \tag{11}$$

Передаточная функция такой системы, по аналогии с (9), может быть записана в виде (12):

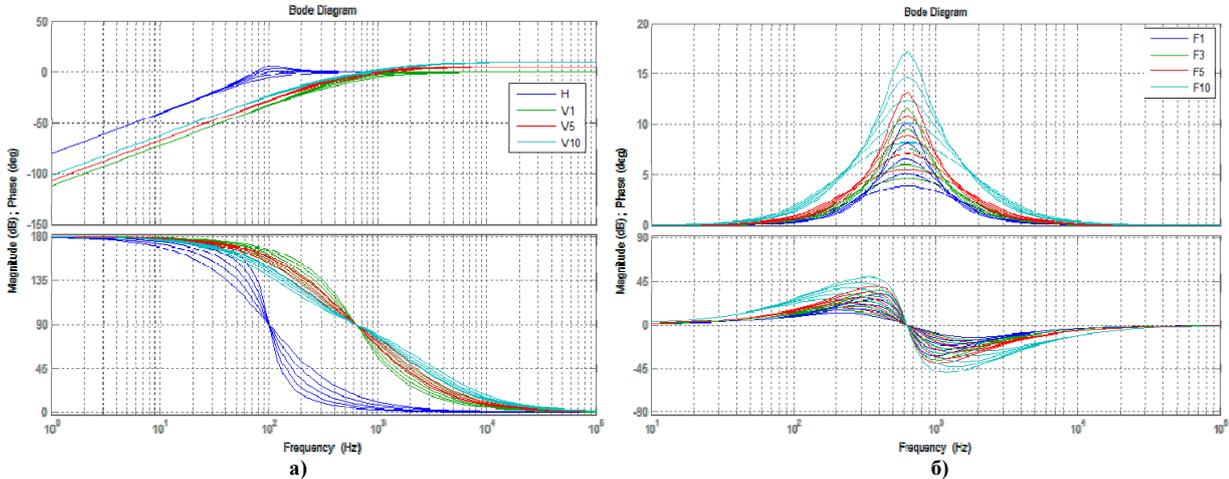
$$\begin{aligned}
 W_V(s) &= \frac{K_0(s) \cdot W(s)}{1 + K_0(s) \cdot W(s) \cdot s^{-1}} = \\
 &= \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1 + K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot s^{-1}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \\
 &= \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{K_0(s) \cdot s \cdot \omega_0^{-2} + s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot (K_0(s) \cdot \omega_0^{-1} + Q^{-1}) + 1}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Глубина обратной связи в этом случае примет вид (13):

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

$$\frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1 + K_0(s) \cdot s \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot (K_0(s) \cdot \omega_0^{-1} + Q^{-1}) + 1}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} \quad (13)$$

Частотные зависимости передаточной функции громкоговорителя с ЭМОС по скорости и глубины обратной связи приведены на рис. 7.



**Рис. 7.** Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с отрицательной обратной связью по скорости: а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности  $Q=\{0.5, 0.707, 1, 1.4, 2\}$ ; V1 – те же системы, охваченные единичной обратной связью по скорости; V 5 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 5дБ; V10 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 10 дБ; F – системы охваченные единичной обратной связью без усиления при разных  $Q$ ; F3 – те же системы при усилении в 3 дБ; F5 – те же системы при усилении в 5дБ; F10 – те же системы при усилении в 10 дБ

Анализ построенных частотных зависимостей показывает, что действие ЭМОС по скорости сводится к демпфированию резонанса, т.е. снижению добротности громкоговорителя. Сама же ЭМОС оказывается устойчивой во всём частотном диапазоне, однако её глубина значительна лишь в области резонансной частоты. Таким образом ЭМОС по скорости позволяет изолированно влиять на добротность громкоговорителя, переводя его в аperiodический режим работы, что существенно повышает верность звуковоспроизведения.

### Электромеханическая обратная связь по смещению

Аналогичным, как и в случае ЭМОС по скорости образом, можно представить и структурную схему третьего основного класса – ЭМОС по смещению (рис. 5, в), передаточная функция которой и глубина обратной связи запишутся в виде (14) и (15).

$$W_s(s) = \frac{K_0(s) \cdot W(s)}{1 + K_0(s) \cdot W(s) \cdot s^{-2}} =$$

$$\frac{K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} \cdot \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1 + K_0(s) \cdot s^2 \cdot \omega_0^{-2} \cdot s^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \quad (14)$$

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

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

$$\frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1 + K_0(s) \cdot \omega_0^{-2}}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} = \frac{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + (K_0(s) \cdot \omega_0^{-2} + 1)}{s^2 \cdot \omega_0^{-2} + s \cdot \omega_0^{-1} \cdot Q^{-1} + 1} \quad (15)$$

Частотные характеристики громкоговорителя с ЭМОС по смещению приведены на рис. 8, а, глубины обратной связи – на рис. 8, б.

Как видно из рис. 8, а. ЭМОС по смещению приводит к увеличению частоты основного резонанса и обеспечивает одновременное увеличение добротности по сравнению с неохваченным обратной связью громкоговорителем. Кроме того глубина обратной связи (рис. 8, б), а значит и её корректирующая способность, значительна в диапазоне ниже частоты резонанса, но на частотах выше резонансной является отрицательной, что делает систему склонной к самовозбуждению.

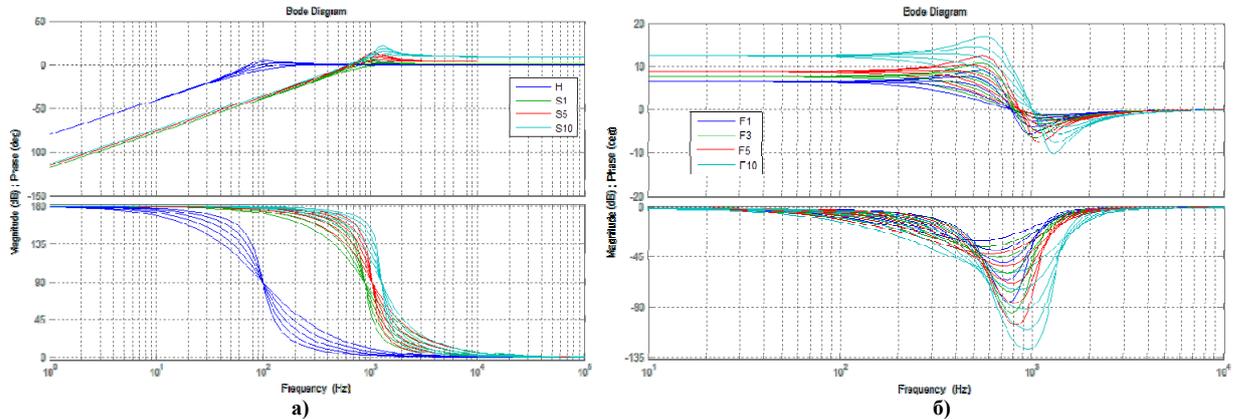


Рис. 8. Логарифмические частотные характеристики громкоговорителя с отрицательной обратной связью по смещению: а) ЛАЧХ и ЛФЧХ громкоговорителя; б) ЛАЧХ и ЛФЧХ глубины обратной связи; Н – системы без обратной связи при разных значениях добротности  $Q=\{0.5, 0.707, 1, 1.4, 2\}$ ; S1 – те же системы, охваченные единичной обратной связью по смещению; S5 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 5дБ; S10 – те же системы, охваченные единичной обратной связью при усилении в 10 дБ. F – системы охваченные единичной обратной связью без усиления при разных  $Q$ ; F3 – те же системы при усилении в 3 дБ; F5 – те же системы при усилении в 5дБ; F10 – те же системы при усилении в 10 дБ.

### Механическая трактовка действия ЭМОС основных классов

Выше отмечалось, что организация обратной связи, охватывающей электромеханический преобразователь, на входе которого действуют электрические сигналы, а на выходе создается механическое движение, требует обратного преобразования измеряемых механических характеристик движения в электрический сигнал. И, если с электрической стороны громкоговорителя с ЭМОС достаточно анализировать лишь напряжения и/или токи, то с механической стороны анализу следует подвергнуть намного большее число действующих параметров, которые принято описывать уравнением (16), выражающим систему сил, действующих на колеблющееся звено громкоговорителя:

$$F = m_0 \cdot \ddot{x} + r_0 \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0} + m_R \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} = (m_0 + m_R) \cdot \ddot{x} + (r_0 + r_R) \cdot \dot{x} + \frac{x}{c_0} \quad (16)$$

где  $F$  – внешняя вынуждающая сила, сформированная электродинамическим преобразователем громкоговорителя и прикладываемая к его механическому колебательному звену;  $m_0, r_0, c_0$  – соответственно собственная масса, коэффициент внутреннего трения и гибкость подвижной системы ПМКС;  $x, \dot{x}, \ddot{x}$  – смещение подвижного звена ПМКС, его первая (скорость) и вторая (ускорение) производные;  $m_R, r_R, c_R$  – соответственно масса соколеблющейся с подвижным звеном громкоговорителя части окружающей среды, коэффициент трения в ней и её гибкость [8].

Рассматривая отдельно механическую и электрическую природу сигналов в громкоговорителе, можно достаточно просто описать действие обратной связи на громкоговоритель, которое сводится к появлению дополнительной силы в уравнении (16), направление действия которой определяется видом обратной связи:

- положительная обратная связь (ПОС) усиливает воздействие на колебательное звено громкоговорителя, что эквивалентно алгебраическому суммированию внешней силы  $F$  с силой  $F'$ , представляющей собой результат измерения силы  $F$ .

- отрицательная обратная связь (ООС) ослабляет воздействие на подвижное звено, что эквивалентно алгебраическому вычитанию из внешней силы  $F$  силы  $F'$ .

Качество же обратной связи в таком случае будет определяться степенью точности измерения силы  $F'$ . Отмечу, что наиболее точно отражает силу  $F'$  звуковое давление на выходе громкоговорителя, имеющее одинаковую с ней физическую природу. Однако, как показано выше, принципиальное получение электрического эквивалента силы  $F'$  с помощью микрофона – приёмника давления затруднено, что приводит к использованию в качестве формирователя сигнала обратной связи датчика ускорения, скорости либо смещения, а это, в свою очередь, негативно сказывается на точности измерения силы  $F'$ . Таким образом обнаруживается необходимость проведения анализа известных систем с ЭМОС по скорости, ускорению, смещению с предлагаемых позиций формирования дополнительных сил. Подтверждением необходимости такого рассмотрения является также общеизвестное положение теории управления, утверждающее что система, охваченная глубокой стабильной обратной связью по какому-либо из параметров, становится источником этого параметра [2]. Иными словами при ЭМОС основных классов громкоговоритель будет становиться источником стабильного ускорения, скорости, или смещения, что не соответствует требованию к стабилизации звукового давления.

Рассматриваемая дополнительная сила  $F'$  будет определяться в зависимости от типа ЭМОС, а именно:

- для ЭМОС по ускорению сила  $F'$  пропорциональна измеренному результирующему ускорению диафрагмы громкоговорителя и принимает вид (17.а):

$$F'_a = m' \cdot \ddot{x} \quad (17.a)$$

где  $m'$  – величина, эквивалентная дополнительной массе инерционного элемента,  $\ddot{x}$  – ускорение подвижного звена.

- для ЭМОС по скорости сила  $F'$  пропорциональна измеренной результирующей скорости диафрагмы и принимает вид (17.б):

$$F'_v = r' \cdot \dot{x} \quad (17.б)$$

где  $r'$  – дополнительное трение диссипативного элемента,  $\dot{x}$  – колебательная скорость подвижного звена.

- для ЭМОС по смещению сила  $F'$  пропорциональна измеренному результирующему смещению диафрагмы и принимает вид (17.в):

$$F'_s = \frac{x}{c'} = s' \cdot x \quad (17.в)$$

где  $c'$  – гибкость упругого элемента,  $s = 1/c'$  – его упругость,  $x$  – колебательное смещение подвижного звена.

С учётом (17) для отрицательной ЭМОС различных классов уравнение (16) переписывается в виде (18):

$$F_1 - F'_a = m \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} + \frac{1}{c} \cdot x \rightarrow F_1 = (m + m') \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} + \frac{1}{c} \cdot x \quad (18.a)$$

$$F_1 - F'_v = m \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} + \frac{1}{c} \cdot x \rightarrow F_1 = m \cdot \ddot{x} + (r_R + r_R') \cdot \dot{x} + \frac{1}{c} \cdot x \quad (18.б)$$

$$F_1 - F'_s = m \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} + \frac{1}{c} \cdot x \rightarrow F_1 = m \cdot \ddot{x} + r_R \cdot \dot{x} + \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{c'}\right) \cdot x \quad (18.в)$$

Таким образом, действие ЭМОС на громкоговоритель сводится к изменению:

- общей массы подвижной системы при ЭМОС по ускорению;
- сопротивления потерь при ЭМОС по скорости;
- гибкости при ЭМОС по смещению.

Следует отметить, что такое изменение происходит под действием электрического эквивалента силы  $F'$  на входе громкоговорителя, что является не чем иным как электронным регулированием механических параметров громкоговорителя, которое в случае ПОС сказывается уменьшением их значений, а в случае ООС - приращением.

Предлагаемая силовая трактовка введения обратной связи абсолютно не противоречит результатам, полученным для систем с ЭМОС различных типов путём анализа их передаточных характеристик, выполненного выше. Так физическая трактовка ЭМОС по ускорению сводится к увеличению массы подвижной системы громкоговорителя, что будет снижать резонансную частоту громкоговорителя с такой ЭМОС и уменьшать его чувствительность. Кроме того дополнительная инерционность скажется на добротности контура в виде её увеличения, что приведёт к развитию пика на частотной характеристике.

ЭМОС по скорости с физической точки зрения не должна влиять на частоту резонанса, однако приводит к снижению добротности колебательной системы громкоговорителя, а добавление диссипативного элемента приводит к росту общего механического сопротивления, что, как и снижение добротности, способствует демпфированию резонанса.

Физическое возрастание упругости при ЭМОС по смещению, что эквивалентно уменьшению гибкости в подвесе подвижной системы, приводит к росту резонансной частоты громкоговорителя при одновременном увеличении его добротности и вызывает рост неравномерности результирующей частотной характеристики.

Изменение какого-либо из механических параметров громкоговорителя, пускай даже и электронным путём, сказывается на его результирующих характеристиках неоднозначно. При этом наиболее оптимальным следует считать такой громкоговоритель, который обладает минимально возможной резонансной частотой и добротностью, не превышающей критического значения. Подобного эффекта, очевидно, можно добиться лишь путём комбинирования ЭМОС различных типов, а именно объединяя ЭМОС по ускорению и ЭМОС по скорости, что и рекомендовано в [9]. Однако, как верно отмечено в [10], такая комбинированная ЭМОС характеризуется малой глубиной в области частот ниже резонанса. Для устранения этого эффекта там же предлагается комбинация ЭМОС по скорости и смещению, что, в свою очередь, приводит к росту резонансной частоты при незначительном изменении добротности системы и также не может считаться оптимальным.

### Выводы

Транспортная задержка не позволяет создавать системы с ЭМОС по звуковому давлению в широком частотном диапазоне, однако при минимизации фазовых задержек в звеньях цепи обратной связи видимых проблем для введения низкочастотной ЭМОС нет. Влияние акустических помех при организации ЭМОС по звуковому давлению существенно снижается, однако следует провести более детальный анализ

воздействия помех, представляющих из себя отраженный от стен помещения прослушивания сформированный громкоговорителем сигнал.

Использование отдельных датчиков сигнала обратной связи, требующих механического контакта с подвижной системой громкоговорителя, приводит к падению чувствительности последнего и изменению его фундаментальных параметров, что следует учитывать при анализе и синтезе систем с ЭМОС.

ЭМОС позволяет осуществлять электронное управление параметрами громкоговорителя, однако требует принятия дополнительных мер для обеспечения устойчивости системы.

С механической точки зрения действие ЭМОС эквивалентно действию дополнительных механических сил, противонаправленных возникающим при колебаниях подвижного звена громкоговорителя. При этом существенно упрощается понимание физических процессов, происходящих в громкоговорителе с ЭМОС, что обеспечивает возможность поиска новых, не рассмотренных ранее, методов организации обратной связи в громкоговорителях, либо совершенствования известных, обладающих определёнными недостатками.

### Литература

1. Боде Г.В. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью: пер. с англ. / Г.В. Боде // М.: ГИИЛ, 1948. – 644 с.
2. Лурье Б.Я. Классические методы автоматического управления / Б.Я. Лурье, П. Дж. Энрайт // С.-пб. – «БХВ-Петербург». – 2004. – 640 с.
3. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин / М: «Наука», 1977. – 560 с.
4. R. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1&2 / R. Small // JAES, Jan-Feb. 1973.
5. Фурдуев В.В. Электроакустика / В. В. Фурдуев. // М. – Л. : ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 516 с.
6. Воронов А. А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость / А.А. Воронов // М.: Наука. –1979. – 335 с.
7. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического управления / Е.П. Попов // М.: Наука. – 1989. – 301 с.
8. Акустика: Учебник для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев; под ред. Ю. А. Ковалгина // М. : Горячая линия–Телеком. – 2009. – 660 с.
9. Klassen J.A. Motional feedback with loudspeakers / J.A. Klassen, S.H. de Koning // Philips technical review. – 1968. – №5. – P. 148 – 157.
10. 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.

### References

1. Bode, G.V. Teorija cepej i proektirovanie usilitelej s obratnoj svjaz'ju: per. s angl. / G.V. Bode // M.: GILL, 1948. – 644 s.
2. Lur'e, B.Ja. Klassicheskie metody avtomaticheskogo upravlenija / B.Ja. Lur'e, P. Dzh. Jenrajt // S.-pb. – «BHV-Peterburg». – 2004. – 640 s.
3. Cypkin, Ja.Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem / Ja.Z. Cypki / M: «Nauka», 1977. – 560 s.
4. R. Small, Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1&2 / R. Small // JAES, Jan-Feb. 1973.
5. Furduev, V.V. Jelektroakustika / V. V. Furduev. // M. – L. : OGIZ Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehniko-teoreticheskoj literatury, 1948. – 516 s.
6. Voronov, A. A. Ustojchivost', upravljaemost', nabljudаемost' / A.A. Voronov // M.: Nauka. –1979. – 335 s.
7. Popov, E.P. Teorija linejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija / E.P. Popov // M.: Nauka. – 1989. – 301 s.
8. Akustika: Uchebnik dlja vuzov / Sh. Ja. Vahitov, Ju. A. Kovalgin, A.A. Fadeev, Ju.P. Shhev'ev; pod red. Ju. A. Kovalgina // M. : Gorjachaja linija–Telekom. – 2009. – 660 s.
9. Klassen, J.A. Motional feedback with loudspeakers / J.A. Klassen, S.H. de Koning // Philips technical review. – 1968. – №5. – P. 148 – 157.
10. Zaharin V.M. Datchikovaja jelektromehaničeskaja obratnaja svjaz' v akustičeskikh sistemah / V.M. Za-harin, Ju.N. Mitrofanov // Sistemy i sredstva peredachi informacii po kanalam svjazi :sb. TUIS. – L.: LJe-IS. – 1981. – s. 133 – 138.

Рецензія/Peer review : 24.10.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.1.2013 р.