

УДК 621.397

**ГРОМКОГОВОРТЕЛИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ, ОСНОВАННОЙ НА ПИД-УПРАВЛЕНИИ**

СУЛИМА Н.Н.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

**LOUDSPEAKERS WITH COMBINED MOTIONAL FEEDBACK AND PID-CONTROL**

SULIMA N.N.

Odessa National A.S. Popov Academy of Telecommunications

*Аннотация.* В работе проведен предварительный анализ возможностей применения ПИД-контроллеров для организации управления при охвате громкоговорителя электромеханической обратной связью (ЭМОС) комбинированных типов. Показано, что для некоторых классов ЭМОС использование ПИД-корректора не позволяет обеспечить качественное управление в силу ненулевой ошибки управления в установившемся режиме. Кроме того для некоторых классов ЭМОС показано, что использование оптимального ПИД-контроллера не позволяет обеспечить устойчивость системы в целом. Также установлено, что наиболее эффективным является применение ПИД-регулятора к комбинированной по ускорению и скорости ЭМОС.

*Abstract.* In this paper, a preliminary analysis of the possibilities of application of PID controllers for management under coverage loudspeaker by combined motional feedback (MFB). It is shown that for certain classes of MFB use PID corrector does not allow for good governance in force nonzero error control in the steady state. In addition, for certain classes of MFB shown that the use of optimal PID controller can not provide stability of the system as a whole. Also found that the most effective application of the PID-control to combined acceleration-and-velocity MFB.

**ВВЕДЕНИЕ**

Современные громкоговорители (акустические системы) являются низкоэффективными электроакустическими преобразователями, обладающими высоким, в сравнении с другими звеньями аудиовизуальной системы, уровнем линейных и нелинейных искажений, особенно существенным в области низких частот. Повышению эффективности преобразования и снижению искажений в какой-то степени способствуют рациональное конструирование акустического оформления (корпусов) и использование современных технологий в производстве громкоговорителей и 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].

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

В работе [2] указаны общие и специфические сложности, возникающие при организации ЭМОС в громкоговорителях. При этом показано, что большинству существующих методов ЭМОС характерна склонность к самовозбуждению в том или ином частотном диапазоне, обусловленная неустойчивостью громкоговорителей с обратной связью. Для ЭМОС, как частного случая одного из методов управления, в той или иной степени допустимы все известные в кибернетике способы обеспечения устойчивости. Одним из таких способов является использование корректирующих звеньев – электрических цепей с определёнными частотными характеристиками, включение которых в прямую цепь или цепь обратной связи обеспечивает изменение общей передаточной функции громкоговорителя таким образом, чтоб обеспечить его устойчивость в случае изначальной неустойчивости, либо увеличить глубину обратной связи и её равномерность в целевом частотном диапазоне.

Механический характер реакции громкоговорителя на входное электрическое воздействие создаёт определённое многообразие методов формирования сигнала обратной связи, использующихся в соответствующих классах ЭМОС, описанных в [2, 3].

В работе [4] представлены результаты достаточно поверхностного и далеко неоднозначного анализа применения ПИД-регулятора в громкоговорителях с ЭМОС классических типов, и указано на

необходимость продолжения исследований в данном направлении. Таким образом, целью данной работы является анализ возможности применения такого распространённого способа коррекции в цепях обратной связи как использование ПИД-корректоров для громкоговорителей с ЭМОС так называемых комбинированных типов. Известно, что данный метод примечателен наличием относительно недорогих интегральных схем, реализующих такое пропорционально-интегро-дифференцирующее управление, достаточным для многих случаев качеством управления, относительной простотой настройки параметров ПИД-корректора. Однако следует отметить, что использование ПИД-регулятора не всегда позволяет обеспечить устойчивость системы в целом, и требует проведения ряда экспериментов либо итерационных расчётов. Кроме того управление с помощью ПИД-корректора в большинстве случаев далеко от оптимального [5].

### ЭМОС КОМБИНИРОВАННЫХ ТИПОВ БЕЗ КОРРЕКЦИИ

Как было отмечено выше, наличие сложностей получения корректного сигнала обратной связи, однозначно представляющего собой электрический эквивалент измеренного на выходе громкоговорителя звукового давления, являющего по своей сути механическим параметром, приводит к использованию нескольких вариантов организации ЭМОС, представленных в [2]. К ЭМОС комбинированных типов относятся классы, в которых сигнал обратной связи представляет собой произвольную комбинацию пары электрических эквивалентов ускорения, скорости, и смещения [3]. Отдельно следует рассматривать не встреченный в литературе метод с комбинацией всех трёх параметров, предположительно впервые изложенный в [6].

Удобные для анализа структурные схемы ЭМОС комбинированных типов, полученных из приведённых в [3] с помощью эквивалентных преобразований, показаны на рис.1. При этом рассматривается распространённый случай формирования сигнала обратной связи с помощью акселерометра и с корректором в прямом участке петли.

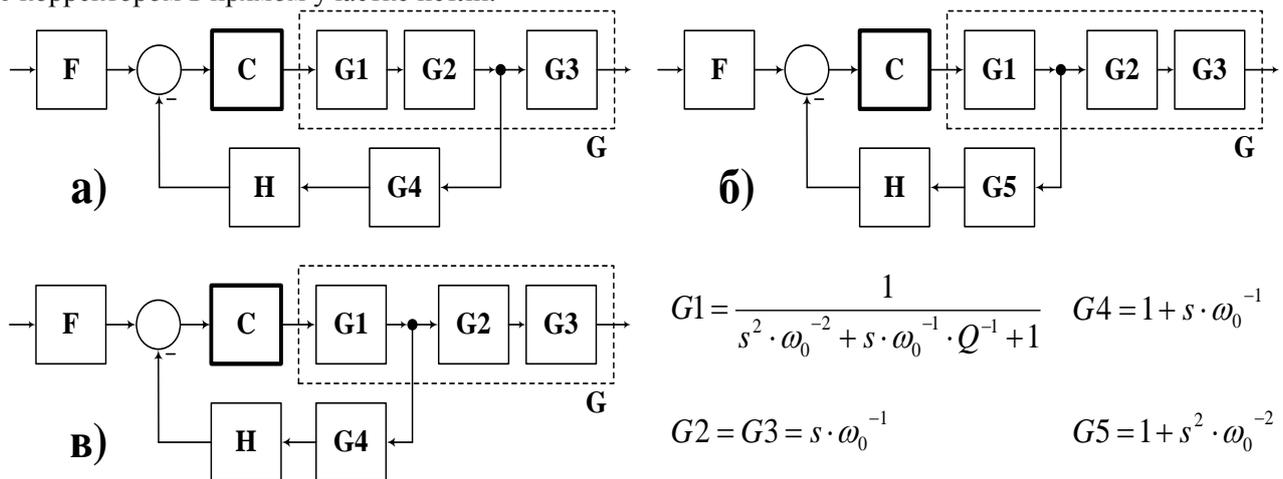


Рисунок 1 – Эквивалентные схемы ЭМОС комбинированных типов с датчиком ускорения в качестве формирователя сигнала обратной связи:

- а) ЭМОС по ускорению и скорости; б) ЭМОС по ускорению и смещению; в) ЭМОС по скорости и смещению; F – предварительный корректор; С – контроллер; G – громкоговоритель; H – датчик сигнала обратной связи

Как следует из рис. 1, для абстрактного случая представления громкоговорителя закрытого типа в виде каскадного соединения колебательного звена и двух дифференциаторов, при введении ЭМОС следует, что в петле обратной связи будет находиться не всё каскадное соединение, а его часть.

ЭМОС по ускорению и скорости сводится к охвату обратной связью каскадного соединения колебательного звена и одного из двух дифференциаторов, входящих в состав громкоговорителя, в то время как две другие комбинации подразумевают охват обратной связью лишь колебательного звена.

Частотные характеристики громкоговорителей с ЭМОС комбинированных типов показаны на рис. 2 подтверждают известные выводы о наличии для любого из указанных случаев частотной неравномерности глубины обратной связи, что приводит к различной корректирующей способности ЭМОС и является нежелательным (рис. 2, а). Кроме того, каждому из классов ЭМОС свойственно изменение общей передаточной функции громкоговорителя (рис. 2, б)

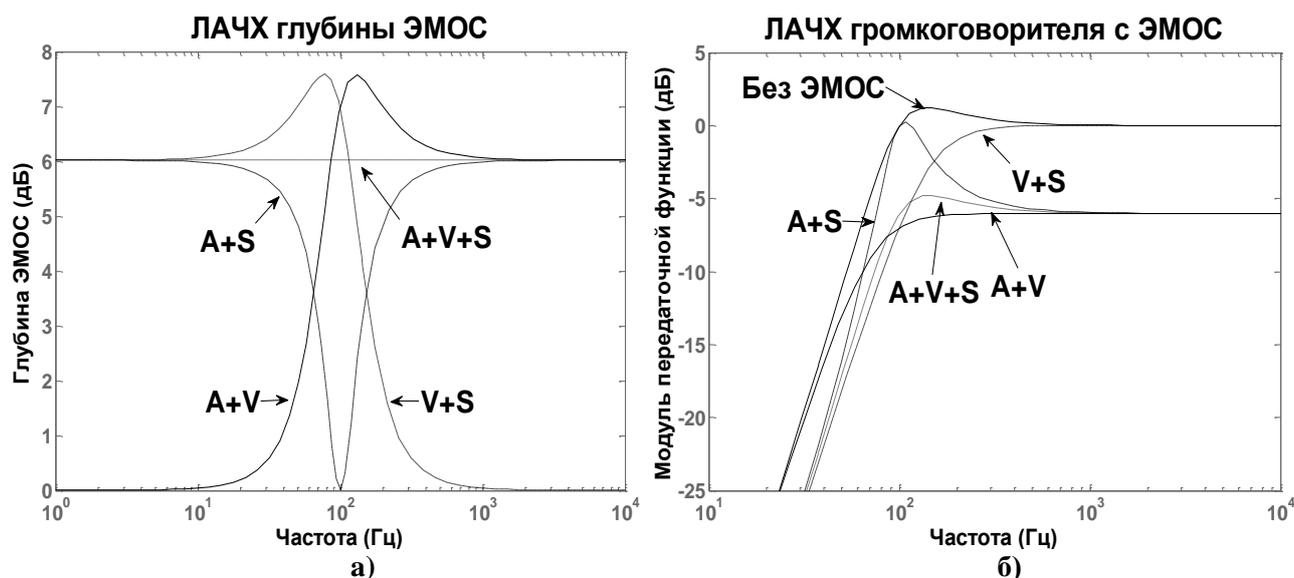


Рисунок 2 – Комбинированные варианты ЭМОС для громкоговорителя с  $Q=1$  и  $f_0 = 100$  Гц:  
 а) ЛАЧХ глубины обратной связи; б) ЛАЧХ громкоговорителя с ЭМОС; А+S – по ускорению и смещению; А+V – по ускорению и скорости; V+S – по скорости и смещению; А+V+S – по ускорению, скорости и смещению

### ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЕ В ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯХ С ЭМОС КОМБИНИРОВАННЫХ ТИПОВ

ПИД-регуляторы, являясь достаточно простыми и обеспечивающими хорошее качество регулирования, широко распространены в качестве корректирующих цепей в системах управления. Применение же управления с помощью ПИД-регулятора в системе с ЭМОС иногда не позволяет получить астатическую систему, т.е. имеющую нулевую ошибку в установившемся режиме.

Громкоговоритель закрытого типа с одиночным излучателем принято при анализе представлять в виде фильтра высоких частот второго порядка [7]. При этом имеются нули его передаточной функции в точке  $s = 0$ , что позволяет отнести громкоговоритель к условно устойчивым или нейтральным системам, и не даёт возможности убрать возникающий в следствие введения ЭМОС статизм с помощью ПИД-корректора. Указанный ноль, при комбинированной ЭМОС, будет проявляться только для случая ЭМОС по ускорению и скорости, что подтверждается соответствующими выражениями приведённых передаточных функций и следует из структурных схем рис. 1. В случае же двух других комбинаций передаточная функция охватываемой обратной связью условной части громкоговорителя будет иметь исходный статизм, что позволяет определить параметры ПИД-корректора таким образом, чтоб исключить установившуюся ошибку [8].

Сложность определения оптимальных параметров ПИД-регулятора, кроме самого процесса их расчёта, сводится к необходимости постоянного учёта изменений общей передаточной функции системы, вносимых его применением. При этом на этапе оптимизации характеристик регулятора и системы в целом часто необходимы многократные повторения расчётов. С помощью современных САПР, например утилиты LtiViewer из пакета Matlab®, можно динамически контролировать все характеристики системы при изменении той или иной характеристики любого из её звеньев. Кроме того, указанная САПР, при наличии соответствующей модели контролируемого объекта, позволяет использовать многообразие различных методов и техник теории управления, в том числе и ПИД-регулирование, для расчёта корректирующих и управляющих систем этого объекта.

Влияние ПИД-корректора на результирующие характеристики громкоговорителя с ЭМОС комбинированных типов показано на рис. 3. При этом исходные параметры ПИД-корректора определялись автоматически с помощью предусмотренного в САПР Matlab® механизма PID Tuner. Логично, что ЛАЧХ глубины обратной связи показаны для участка системы, охваченной обратной связью, а ЛАЧХ громкоговорителя с ЭМОС приведены для всей системы в целом, в том числе с учётом влияния звеньев, вынесенных путём эквивалентных преобразований за петлю обратной связи.

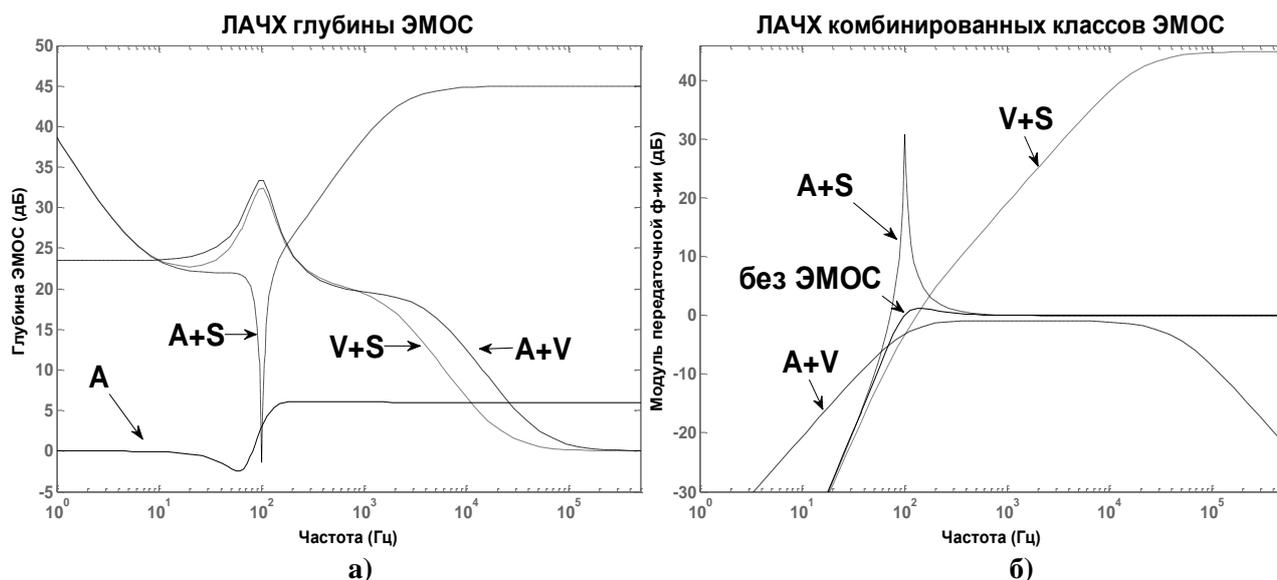


Рисунок 3 – Громкоговоритель с ЭМОС и ПИД-регулированием:  
 а) ЛАЧХ глубины обратной связи (А – без ПИД);  
 б) ЛАЧХ громкоговорителя с ЭМОС.

Интересным является также сопоставление глубины обратной связи для каждого из случаев комбинированной ЭМОС без ПИД-регулятора (рис. 2, а) и с его использованием (рис. 3, а).

### ВЫВОДЫ

1. Использование ПИД-регуляторов в громкоговорителях с ЭМОС комбинированных типов однозначно обеспечивает повышение глубины обратной связи в целевом диапазоне частот в сравнении с ЭМОС классических типов и ЭМОС комбинированных типов без регуляторов. Наблюдаемое на верхних частотах снижение глубины обратной связи нельзя считать недостатком, т.к. обратная связь не становится положительной, что говорит об устойчивости систем, которая, однако, нарушается в области частот у основного резонанса для ЭМОС по ускорению и смещению.

2. Имеющийся подъём глубины обратной связи на частоте резонанса для ЭМОС по ускорению и скорости и для ЭМОС по скорости и смещению должен способствовать дополнительному снижению искажений в этой области, для которой характерна наибольшая амплитуда смещений подвижного звена громкоговорителя.

3. Исходя из совокупно анализа частотных характеристик для дальнейшего развития следует предварительно рекомендовать комбинированную по ускорению и скорости ЭМОС, управляемую ПИД-регулятором, как обладающую наиболее равномерной АЧХ в диапазоне звуковых частот, и имеющую приемлемую форму частотной зависимости глубины обратной связи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бode Г.В. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью; пер. с англ. / Бode Г.В. – М.: ГИИЛ, 1948. – 644 с.
2. Сулима Н.Н. Классическая обратная связь в громкоговорителях / Н.Н. Сулима // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 4. – С. 62–72.
3. Сулима Н.Н. Комбинированная обратная связь в громкоговорителях / Н.Н. Сулима // Цифрові технології. – 2013. – №13. – С. 110–116.
4. Sulima N.N. The applicability of PID-controllers to the loudspeakers with an electromechanical feedback / Sulima N.N. // Digital technologies – 2014. – P. 121–124.
5. Xue D. Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB / D. Xue, Y. Chen, D.P. Atherton // SIAM, 2007 – 354 с.
6. Sulima N.N. (2014) New method of motional feedback in loudspeakers – *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, ISSN 2219-9365 – №1. – P. 164–168.
7. Small R. Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1&2 / R. Small // JAES, Jan-Feb. 1973.
8. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Цыпки Я.З. – М: Наука, 1977. – 560 с.