

УДК 621.395.623.7

Н.Н. СУЛИМА

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Украина*

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

*Проанализированы теоретические и практические вопросы проблематики повышения верности звуковоспроизведения при помощи электромеханической обратной связи. Предложено проведение полного сравнительного анализа эффективности различных типов электромеханической обратной связи на основании данных, полученных от универсальной компьютерной модели. Построена компьютерная модель системы с электромеханической обратной связью и проведена ее апробация. Исследована эффективность применения электромеханической обратной связи для коррекции искажений, создаваемых головкой громкоговорителя.*

**Ключевые слова:** *громкоговоритель, верность звуковоспроизведения, электромеханическая обратная связь, моделирование.*

### Введение

Современная аудиовизуальная система в общем случае является сложной совокупностью цифровых устройств, что дает возможность достигать высоких качественных и количественных показателей системы в целом.

Неотъемлемой частью аудиовизуальной системы является система звукового сопровождения или звуковой тракт, основная задача которого - наиболее точное восстановление первичной звуковой информации в нужной части пространства [1].

При этом все звенья звукового тракта кроме конечных преобразователей «звук-сигнал» и «сигнал-звук» на сегодняшний день можно сделать цифровыми. Это позволяет получить полностью линейный тракт с отсутствием каких-либо значимых искажений. При этом качество звучания такого тракта будет определяться его конечным аналоговым звеном – громкоговорителем [2].

Громкоговоритель, как сложная электромеханическая колебательная система, является источником разных видов искажений. Наиболее существенно влияющими на качество звучания являются нелинейные искажения, образующиеся во время электромеханического преобразования [3]. Величина нелинейных искажений пропорциональна эффективности излучения (отдаваемой мощности) громкоговорителя, которую следует повышать одновременно с расширением частотного диапазона работы [4]. Уменьшение нелинейных искажений громкоговорителей требует изменений в конструкции их электромеханических преобразователей (головок громкоговорителей) и громкоговорителей в целом,

что неизменно ведет к изменениям технологии производства [5]. Принципиальное устранение нелинейных искажений в громкоговорителе без конструктивных нововведений можно осуществить косвенным методом, а именно введением обратной связи, полностью охватывающей систему «усилитель-громкоговоритель». Такая обратная связь, которая охватывает как электрические, так и механические звенья громкоговорителя, носит название электромеханической обратной связи (ЭМОС) [6].

### 1. Постановка задачи

В работе [7] проведена классификация систем с ЭМОС, из которой следует наличие большого числа вариаций методов формирования и введения сигнала обратной связи. Однако полный сравнительный анализ эффективности предлагаемых методов на сегодняшний день полностью не проведен, не смотря на наличие работ по обоснованию некоторых методов в отдельности. Так в работе [8] указывается, что наиболее эффективным является комбинированная ЭМОС по колебательной скорости и смещению, в то время как работа [9] утверждает об эффективности применения ЭМОС по колебательной скорости. Очевидно, что для устранения указанных противоречий следует провести развернутый количественный анализ существующих методов введения ЭМОС, что является общей целью, не достигнутой в полной мере в настоящее время.

С целью проведения такого сравнительного анализа необходимо разработать экспериментальную модель, позволяющую с достаточной для инженерных расчетов степенью точности проводить

имитацию процессов, происходящих в системе звуковоспроизведения, охваченной электромеханической обратной связью различных типов. Таким образом, основной задачей данной работы является построение опытной модели системы звуковоспроизведения с возможностью охвата электромеханической обратной связью различных типов.

## 2. Универсальная компьютерная модель системы звуковоспроизведения с электромеханической обратной связью

В связи с достаточной сложностью проведения натуральных экспериментов, требующих наличия объемной элементной и измерительной базы, было решено разработать виртуальную компьютерную модель. В качестве средства разработки использовалась система автоматического проектирования (САПР) электрических схем Multisim®, позволяющая реализовать модель на уровне принципиальной схемы.

Очевидно, что для ЭМОС, как разновидности обратной связи, будут справедливы все положения общей теории обратной связи. Известно, что система, охваченная обратной связью, может быть представлена в виде прямой и обратной взаимосвязанных цепей, обладающих определенными коэффициентами усиления. При этом любое искажение, возникающее в системе, можно рассматривать как некое дополнительное напряжение, суммирующееся с напряжением в прямой цепи (рис.1) [10].

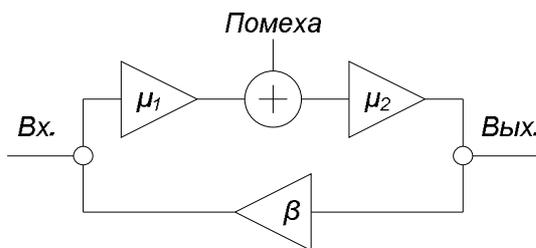


Рис. 1. Схема с обратной связью и наличием искажений (помех):  $\mu$  – прямая или  $\mu$ -цепь;  $\beta$  – цепь обратной связи или  $\beta$ -цепь

Для структурной схемы, показанной на рис.1, справедливы все теоремы общей обратной связи – следовательно, данную схему можно взять за основу при разработке требуемой компьютерной модели.

В самом общем случае система звуковоспроизведения, охваченная электромеханической обратной связью, должна содержать следующие звенья:

- в прямой цепи: источник сигнала, усилитель мощности, блок искажений, головку громкоговорителя;

- в обратной цепи: датчик сигнала обратной связи, формирователь сигнала обратной связи требуемого типа, и узел введения полученного сигнала в прямую цепь системы.

С целью некоторого упрощения разрабатываемой модели, без потери ее функциональности, усилитель мощности в прямой цепи можно считать линейным с фиксированным коэффициентом усиления.

Как показали исследования, в качестве имитатора дополнительных нелинейных искажений можно применять двусторонний амплитудный ограничитель.

Громкоговоритель может быть представлен эквивалентной электрической схемой, построенной по методу электромеханических аналогий (рис.2) [11].

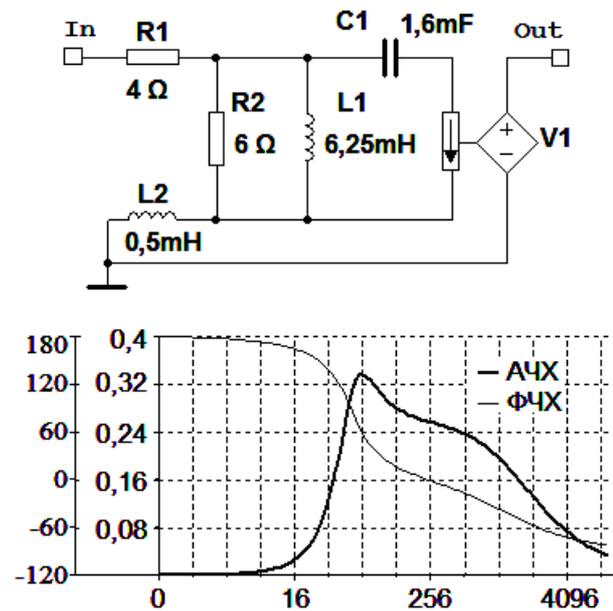


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема головки громкоговорителя и её частотные характеристики, показывающие резонансный характер схемы

В качестве сигнала обратной связи может выступать ток через ёмкость  $C2$ , пропорциональный звуковому давлению, создаваемому головкой громкоговорителя [12].

Известно, что сигнал с выхода эквивалентной схемы головки громкоговорителя пропорционален ускорению подвижной системы головки [8]. Как указано в работе [7], кроме электромеханической связи по ускорению также существует ЭМОС по колебательной скорости, смещению, и комбинированные варианты. С другой стороны известна жесткая взаимосвязь между ускорением, скоростью и смещением, определяемая выражением (1):

$$S(t) = \int V(t)dt = \int \int a(t)dt^2, \quad (1)$$

где  $S$  – смещение подвижной системы головки громкоговорителя;  $V$  – колебательная скорость подвижной системы;  $a$  – ее ускорение.

Таким образом, для получения сигналов, пропорциональных колебательной скорости и смещению, необходимо выполнить одинарное либо двойное интегрирование исходного сигнала, пропорционального ускорению. С этой целью в разрабатываемую модель необходимо включить набор из двух интеграторов (рис.3).

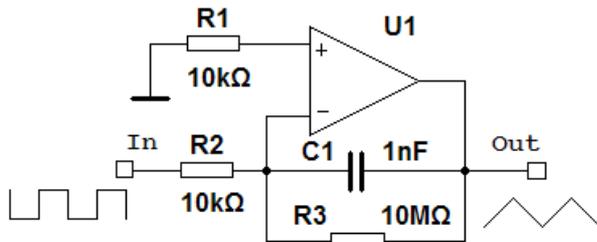


Рис. 3. Блок интегрирования сигнала

Постоянную времени интегрирования необходимо выбирать из условия (2):

$$\tau = R2 \cdot C1 \geq 10 \cdot \frac{1}{F_{\min}}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – постоянная времени звена обратной связи;  $F_{\min}$  – нижняя частота рабочего диапазона.

Кроме того следует предусмотреть цепи, обеспечивающие необходимые начальные условия интегрирования.

Блок, выполняющий введение сигнала обратной связи в исходный сигнал построен на основе операционного усилителя и представляет собой схему, реализующую сложение двух сигналов с инверсией (рис.5).

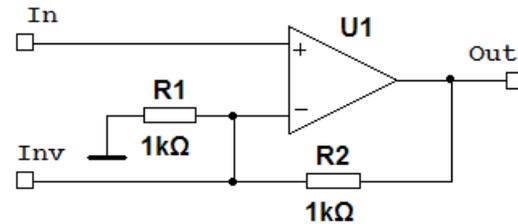


Рис. 4. Блок введения сигнала обратной связи

Функциональное соединение описанных выше блоков, показанное на рис.5, является общей компьютерной моделью, позволяющей проводить исследования в области ЭМОС различных типов.

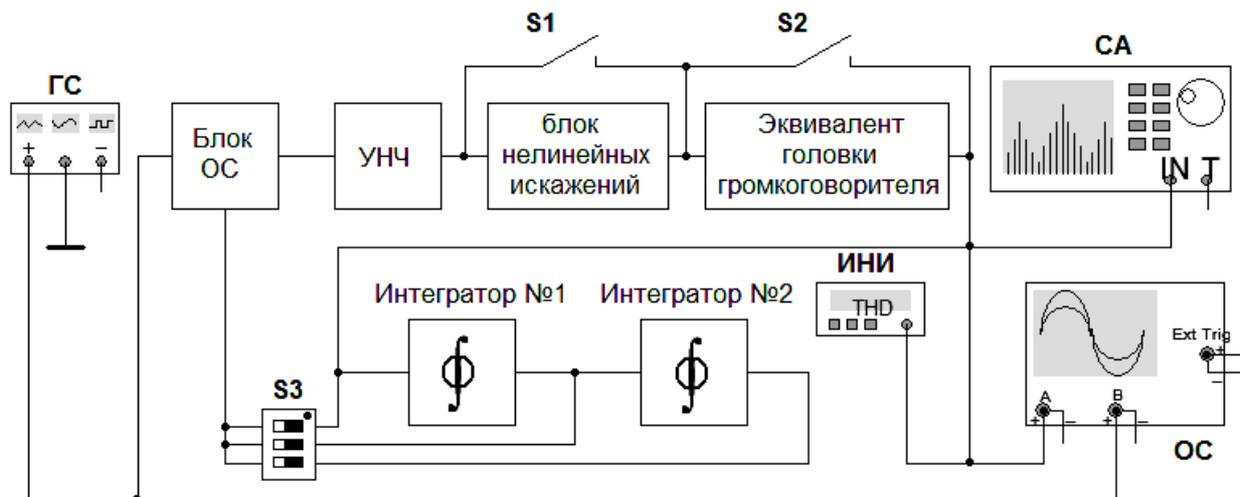


Рис. 5. Компьютерная модель для исследования систем с ЭМОС:

$S1$  – выключатель искажений;  $S2$  – включение обхода головки громкоговорителя;  $S3$  – переключатель типа обратной связи;  $ГС$  – генератор сигналов;  $ОС$  – осциллограф;  $ИНИ$  – измеритель нелинейных искажений;  $СА$  – анализатор спектра

### 3. Некоторые результаты моделирования

Предлагаемая компьютерная модель позволяет исследовать основные типы ЭМОС: по ускорению, колебательной скорости и смещению. Апробация разработанной модели проводилась в три этапа с организацией обратной связи по ускорению. Первоначально проверялась работоспособность блока дополнительных нелинейных искажений и корректность работы цепи обратной связи при их устране-

нии. На время эксперимента эквивалент головки громкоговорителя отключался, и в схему вводились нелинейные искажения, при этом вся схема охватывалась обратной связью. Временные диаграммы, иллюстрирующие работоспособность модели в этом случае, показаны на рис.6.

На втором этапе проверялась верность эквивалента головки громкоговорителя и непосредственная работоспособность цепи электромеханической обратной связи.

На время эксперимента дополнительные нелинейные искажения отключались, при этом вся схема охватывалась обратной связью аналогично предыдущему случаю.

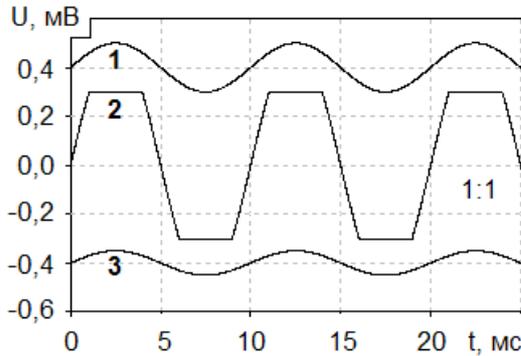


Рис. 6. Результаты моделирования процесса исправления нелинейных искажений при помощи электромеханической обратной связи: 1 – форма исходного электрического сигнала; 2 – форма некорректированного сигнала с введенными нелинейными искажениями; 3 – форма сигнала, скорректированного петлей обратной связи

Временные диаграммы, иллюстрирующие работоспособность модели и в этом случае, показаны на рис. 7.

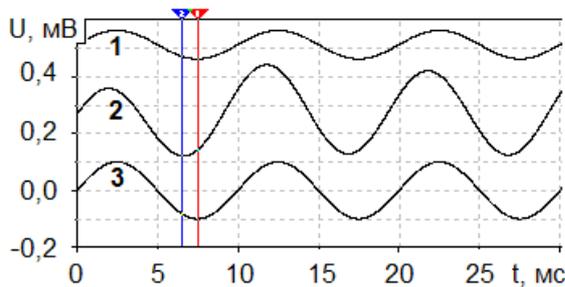


Рис. 7. Результаты моделирования процесса коррекции специфических искажений, вызванных головкой громкоговорителя, при помощи электромеханической обратной связи: 1 – форма исходного электрического сигнала; 2 – форма сигнала, искаженного эквивалентом головки громкоговорителя; 3 – форма сигнала, скорректированного петлей ЭМОС

В заключение корректирующая способность петли ЭМОС проверялась при одновременном наличии как нелинейных искажений так и искажений, вносимых эквивалентной схемой головки громкоговорителя. С этой целью подключался блок дополнительных нелинейных искажений и отключался обход эквивалента головки. Временные диаграммы и фигуры Лиссажу, иллюстрирующие работоспособность модели и в этом случае, показаны на рис. 8.

Следует отметить, что введение отрицательной обратной связи, разновидностью которой является

ЭМОС, приводит к снижению уровня выходного сигнала. При этом, согласно общим положениям теории обратной связи, требуется увеличения мощности модели низкочастотного усилителя [10].

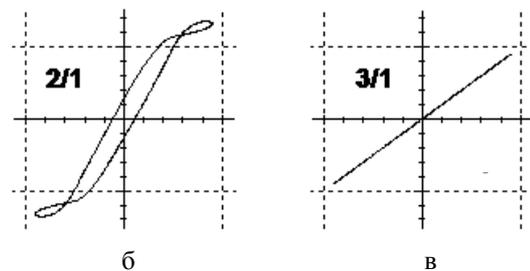
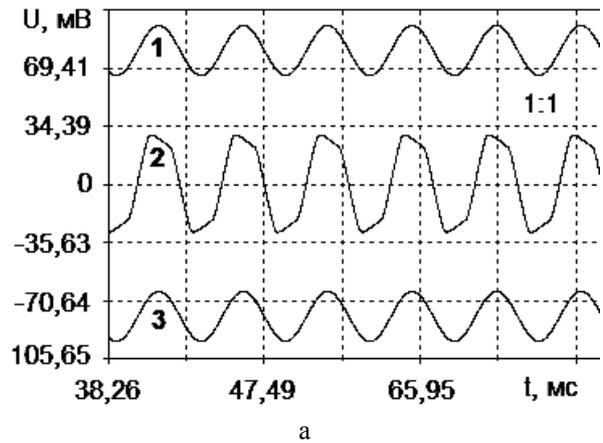


Рис. 8. Результаты моделирования процесса коррекции комбинированных искажений при помощи электромеханической обратной связи: а – временные диаграммы сигналов в контрольных точках модели; б – фигура Лиссажу при выключенной ЭМОС; в – фигура Лиссажу при включенной ЭМОС. 1 – форма исходного сигнала; 2 – форма искаженного сигнала; 3 – форма сигнала, скорректированного петлей ЭМОС

## Выводы

1. Как показали эксперименты, разработанная модель может успешно использоваться в качестве основы при проведении сравнительных исследований электромеханической обратной связи различных типов.

2. Согласно результатам эксперимента (кривая 2 на рис.7) головка громкоговорителя вносит определенные фазовые искажения в результирующий сигнал, что обусловлено резонансной формой амплитудно-частотной характеристик головки.

3. Анализ форм фигур Лиссажу (рис.8) и спектров сигналов показывает позитивное действие ЭМОС: исходный сигнал и скорректированный с помощью петли электромеханической обратной связи результирующий сигнал имеют равные периоды и одинаковые формы. Присутствующие сдвиги фаз

(рис.7) и нелинейные искажения (рис.8а) также корректируются обратной связью, что еще раз подтверждает эффективность применения ЭМОС и целесообразность дальнейших исследований в данной области.

### Литература

1. *Электроакустика и звуковое вещание [Текст]: учеб. пособие / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов [и др.]; под общ. ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 872 с.*
2. *Иофе, В.К. Бытовые акустические системы [Текст] / В.К. Иофе, М.В. Лизунков. – М.: Радио и связь, 1984. – 96 с.*
3. *Захарин, В.М. Электромеханическая обратная связь в акустических системах [Текст] / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов // Теория и техника связи: сб. науч. тр. ОЭИС. – Одесса, 1981. – С. 96 – 100.*
4. *Фурдуев, В.В. Электроакустика [Текст] / В. В. Фурдуев. – М. – Л.: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 516 с.*
5. *Митрофанов, Ю.Н., Электродинамическая обратная связь в акустических системах [Текст] / Ю.Н. Митрофанов, А.А. Пикерсгиль // Радио. – 1970. – № 5. – С. 25 – 26.*
6. *Захарин, В.М. Применение электромеханической обратной связи в электроакустических системах [Текст] / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов // Теория передачи информации по каналам связи: сб. ТУИС. – Л.: ЛЭИС, 1981. – С. 103 – 109.*
7. *Сулима, Н.Н. Электронное регулирование параметров громкоговорителей с помощью электромеханической обратной связи [Текст] / Н.Н. Сулима, Н.Л. Красовская // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 47. – С. 53 – 56.*
8. *Захарин, В.М. Датчиковая электромеханическая обратная связь в акустических системах [Текст] / В.М. Захарин, Ю.Н. Митрофанов // Системы и средства передачи информации по каналам связи: сб. ТУИС. – Л.: ЛЭИС, 1981. – С. 133 – 138.*
9. *Klassen, J.A. Motional feedback with loudspeakers [Text] / J.A. Klassen, S.H. de Koning // Philips technical review. – 1968. – №5. – P. 148 – 157.*
10. *Боде, Г.В. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью [Текст]: пер. с англ. / Г.В. Боде. – М.: ГИИЛ, 1948. – 644 с.*
11. *Римский-Корсаков, А.В. Электроакустика [Текст] / А.В. Римский-Корсаков. – М.: Связь, 1973. – 272 с.*
12. *Мухамедзянов, Н.Б. ЭМОС: кратко обо всём [Электронный ресурс] / Н.Б. Мухамедзянов. – Режим доступа: [http://reanimator-h.narod.ru/faq\\_etos.htm](http://reanimator-h.narod.ru/faq_etos.htm). – 1.01.2008 г.*

Поступила в редакцию 2.09.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. телевидения и радиовещания О.В. Гофайзен, Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса.

### КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

*М.М. Суліма*

Проведений аналіз теоретичних та практичних питань за проблематику підвищення вірності звуковідтворення за допомогою електромеханічного зворотного зв'язку. Запропоновано проведення повного порівняльного аналізу ефективності різних типів електромеханічного зворотного зв'язку на основі даних, що отримані від універсальної комп'ютерної моделі. Побудована комп'ютерна модель системи з електромеханічним зворотнім зв'язком й проведена її апробація. Досліджена ефективність використання електромеханічного зворотного зв'язку для корекції спотворень, що створюються випромінювачем гучномовця.

**Ключові слова:** гучномовець, вірність звуковідтворення, електромеханічний зв'язок, моделювання.

### COMPUTER MODEL FOR RESEARCHES OF ELECTROMECHANICAL FEEDBACK

*N.N. Sulima*

The theoretical and practical questions of enhancement of sound fidelity with motional feedback were analyzed. Usage of universal computer model was proposed for full comparative analysis of efficiency of different types of motional feedback. The computer model of system with motional feedback were developed and checked. The efficiency of motional feedback usage for correction of specified loudspeaker's distortions was researched.

**Key words:** loudspeaker, fidelity of sound reproduction, motional feedback, modeling.

**Сулима Николай Николаевич** – аспирант, Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса, Украина, e-mail: [Filin85@bk.ru](mailto:Filin85@bk.ru).