

Синтез механических параметров громкоговорителей электрическими средствами: Новый метод управления поведением низкочастотных громкоговорителей*

KARL ERIK STAHL

Audio Pro AB, Стокгольм, Швеция

Описан метод расширения диапазона воспроизведения низких частот и снижения искажений в акустических системах, который отличается как от стабилизированных (equalized) систем, так и от сервосистем или систем с обратной связью. Его можно рассматривать как расширение метода увеличения механического сопротивления (затухания) головки громкоговорителя путем придания управляющему усилителю отрицательного выходного сопротивления. Однако этот метод также контролирует массу подвижной системы громкоговорителя и гибкость подвеса. Были достигнуты очень хорошие результаты, такие как плоская частотная характеристика до 20 Гц и отличные данные об искажениях, с фазоинверторными корпусами среднего размера.

0 ВВЕДЕНИЕ

Оборудование высокоточного (Hi-Fi) воспроизведения быстро улучшилось за последние несколько лет, однако акустические системы до сих пор остаются слабым звеном цепи воспроизведения, особенно на стороне басов. Как отметил Смолл [1], [2], существует теоретический предел нижней частоты среза, которая не может быть преодолена в условиях заданных объема корпуса и КПД. При применении активной конструкции, то есть усилителя и динамика, спроектированных как единая система, этот предел не соблюдается. Подавая большую мощность на динамик на нижних частотах, можно понизить частоту среза при сохранении эффективности на высоких частотах. Это часто хорошо согласуется со спектральной плотностью мощности в музыке. Акустические сервосистемы или системы с обратной связью являются примерами такой конструкции. Однако, поскольку эти методы применимы лишь к системам с закрытым корпусом, требование высоких выходных уровней на нижних частотах приводит к почти невыполнимым требованиям к мощности усилителя и величине excursии головки. Если бы можно было использовать корпуса с фазоинвертором, то более высокого КПД можно достичь при меньших требованиях к мощности усилителя, и меньшая excursия диффузора могла бы значительно уменьшить необходимый возбуждаемый динамиком объем.

Стабилизированные (equalized) системы с фазоинвертором, конечно, возможны, но по сравнению с системами с обратной связью, они не уменьшают искажения и чувствительны к изменениям собственной частотной характеристики.

Был разработан новый метод, так называемый "управляемый усилителем благозвучный (ACE) бас"¹, который сочетает в себе лучшее из вышеперечисленных техник. Он контролирует как частотную характеристику, так и искажения, и может применяться как в системах с фазоинвертором, так и в системах закрытого типа.

Большинство измерений в этом документе были сделаны на прототипе сабвуфера B2-50 ACE. Показатели глубины и плоскости его баса и высокой амплитуды при низком уровне искажений являются уникальными среди акустических систем умеренного размера.

1 ОСНОВНОЕ ДЕЙСТВИЕ

Взаимодействие между электрической и механической сторонами динамического громкоговорителя хорошо известно. Двумя примерами являются повышение электрического импеданса громкоговорителя, вызванное его собственным механическим резонансом, и механическое затухание (или значение добротности Q), которое определяется выходным сопротивлением усилителя громкоговорителя.

* Представлено на 61-й Конвенции Общества Аудио Инженеров, Нью-Йорк, 3 ноября 1978 г.; пересмотрено 9 апреля 1981 г.

¹ Метод ACE-bass запатентован в США (4,118,600) и Швеции (7603585-6), также поданы заявки на патенты в нескольких других странах.

Метод ACE-bass использует это взаимодействие, чтобы контролировать все три основных механических параметра подвижной системы громкоговорителя: движимую массу, затухание и гибкость. Однако взаимодействие на большинстве частот маскируется электрическим импедансом звуковой катушки. Следовательно, чтобы управлять тремя механическими параметрами электрическими средствами, необходимо исключить преимущественно резистивный импеданс звуковой катушки.

Как можно видеть на Рис. 1, отрицательное сопротивление усилителя используется для подавления импеданса звуковой катушки. Затем легко показать (Раздел 3), что электрическая емкость C_p приведет к увеличению массы подвижной системы головки, R_p увеличит затухание, и L_p понизит гибкость. Таким образом, разработав усилитель со специальным выходным сопротивлением, можно управлять механическими параметрами динамика. Так как эти параметры определяют низкочастотный отклик акустической системы, этот низкочастотный отклик может быть адаптирован и расширен методом ACE-bass. В Разделах 6 и 7 показано его положительное влияние на искажение.

Заслуживает внимания то, что этот метод не зависит от специальных головок с подключенными преобразователями или вторичными звуковыми катушками, а работает со стандартными динамиками. Для создания акустической системы с ACE-bass, усилитель мощности проектируется имеющим выходное сопротивление, показанное на Рис. 1, и значения выбраны таким образом, чтобы дать акустической системе соответствующий низкочастотный отклик.

Усилитель ACE-bass может быть реализован различными способами. Однако, поскольку он представляет собой линейную схему, не существует способа внешне разделить различные реализации, и, следовательно, все реализации имеют одинаковую производительность (по их влиянию как на амплитудно-частотную характеристику, так и на искажения).

Некоторые из реализаций, показанные в этой статье, были неправильно истолкованы несколькими лицами, как системы обратной связи с датчиками (построенные по технологии Motional Feedback - MFB). В Приложении указывается как на большое отличие в базовом подходе, так и на отличие от MFB-систем мостового типа.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И НЕКОТОРЫЙ ОБЗОР ТЕОРИИ

Поскольку эта статья в основном посвящена изменению механических свойств громкоговорителя², логически отправной точкой является разделение громкоговорителя на его элементарные электрические и механические параметры (Рис. 2). Громкоговоритель можно рассматривать как двухпортовую схему с электрическими понятиями с одной стороны и механическими понятиями с другой. Связь между ними задается уравнениями:

$$U = Z_E I + A V$$

$$F = -A I + Z_M V$$

² В этой статье термин громкоговоритель относится непосредственно к головке. Под акустической системой подразумевается громкоговоритель, установленный в корпусе.

где Z_M - механический импеданс, зависящий от массы, затухания и гибкости. $Z_M = sM_M + R_M + 1/sC_M$.

Из этих уравнений следует, что громкоговоритель можно рассматривать как гиратор цепно-матричной формы.

$$K = \begin{pmatrix} 0 & -A \\ -\frac{1}{A} & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{Fig. 3}):$$

Гиратор имеет такую характеристику, что при взгляде с одной стороны видна двойственность схемы с другой стороны.

Обычно громкоговоритель питается от усилителя с выходным сопротивлением Z_U , а механическая сторона нагружена механическим импедансом Z_B , состоящим из компонентов воздуха и корпуса. На Рис. 4 показана производная схема, а на Рис. 5 - вид с электрической и механической сторон соответственно. Переход от Рис. 5(a) к (c) и от Рис. 5(b) к (d) осуществляется путем замены генератора напряжения на генератор тока и наоборот (Рис. 6).

Схема на Рис. 5(d) обычно встречается в соответствующей литературе. В большинстве приложений громкоговоритель питается от источника постоянного напряжения, то есть $Z_U = 0$. Затухание громкоговорителя R_M увеличивается с A^2/R_E . Выбирая положительное или отрицательное значение сопротивления для Z_U , можно уменьшить или увеличить затухание. Этот принцип хорошо иллюстрируется в литературе.

3 НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ M_M , R_M И C_M ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

Имея в виду вышеупомянутое электромеханическое взаимодействие, новый метод легко понять. Рассмотрим эквивалентную схему с электрической стороны на Рис. 5(a). В конфигурации ACE-bass часть, представляющая усилитель, представляет собой генератор тока и специальную цепь импеданса (Рис.7), таким образом, получая полную схему на Рис.8 или, если смотреть с механической стороны,

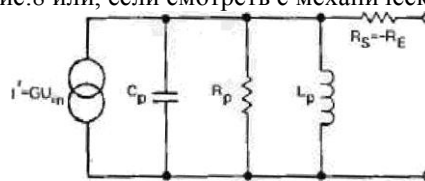


Рис. 1. Усилитель ACE-bass.

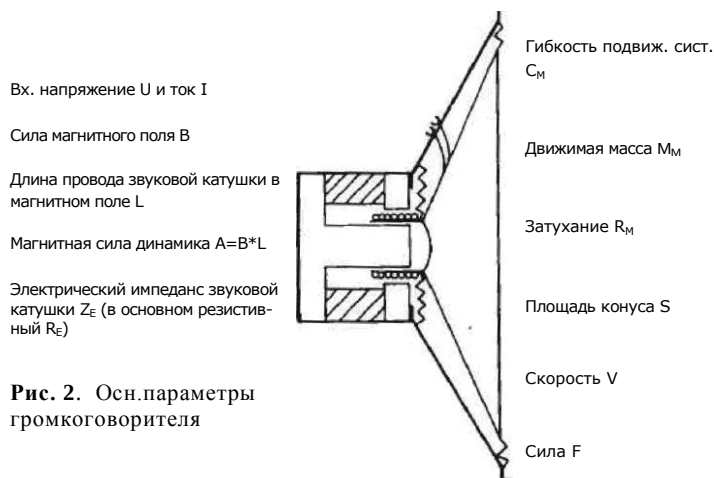


Рис. 2. Осн.параметры громкоговорителя

на Рис. 9, сравните с Рис. 5(d). Это означает, что кажущаяся масса и затухание увеличились, а гибкость уменьшилась ($C_m' < C_m$). Эти кажущиеся значения вполне реальны; настолько реальны, что если бы инженер-механик измерил эти параметры с подключенным усилителем, он бы нашел новые значения M_m' , R_m' , и C_m' .

Таким образом, становится возможным изменить массу подвижной системы громкоговорителя, затуха-

ние, и гибкость путем построения усилителя согласно Рис. 7. Выходной импеданс состоит из отрицательного подключенного последовательно сопротивления, которое в основном подавляет электрический импеданс звуковой катушки $Z_E \approx R_E$. Также конденсатор, обеспечивающий управление массой подвижной системы громкоговорителя, подключен параллельно к источнику тока;

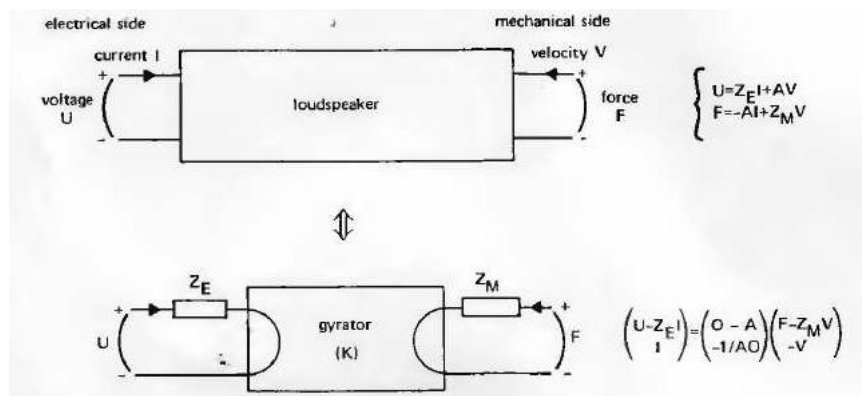


Рис. 3. Громкоговоритель в виде двухпортовой схемы.

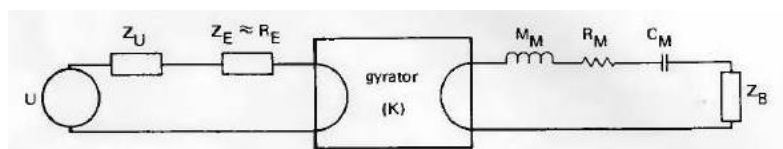


Рис. 4. Эквивалентная схема для акустической системы в нормальных условиях.

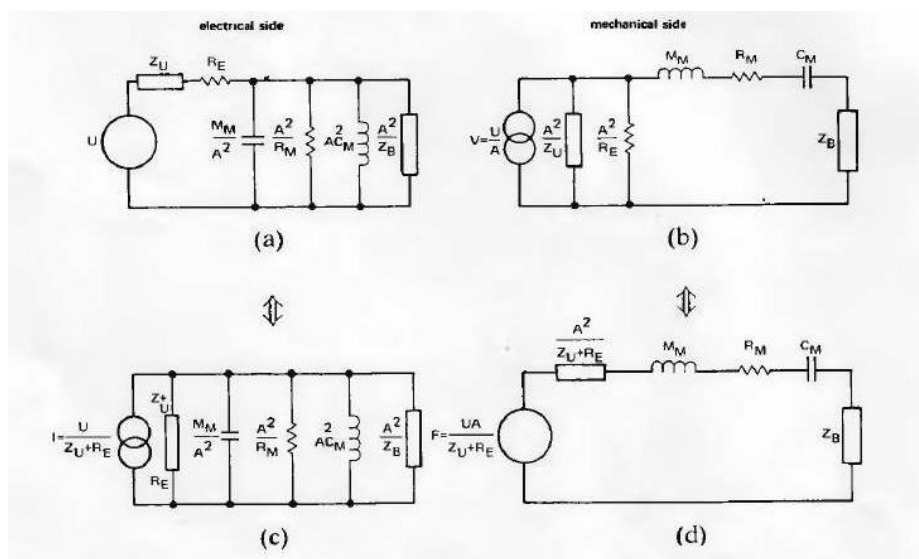


Рис. 5. Эквивалентные схемы с электрической и механической точек зрения.

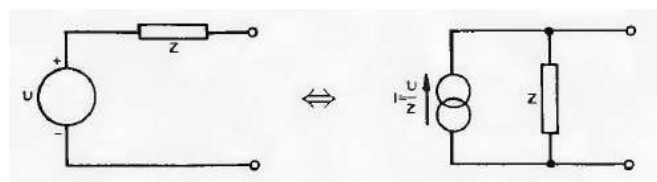


Рис. 6. Переход от напряжения к источнику тока.

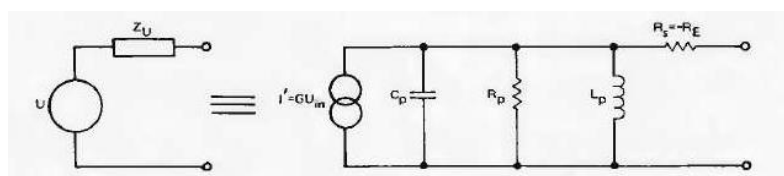


Рис. 7. Усилитель ACE-bass.

параллельное сопротивление обеспечивает контроль над затуханием, а параллельно подключенная индуктивность контролирует гибкость. Примечание: Если цепь ACE-bass рассматривается как генератор напряжения, а не как генератор тока, коэффициент усиления должен зависеть от частоты так же, как и параллельный импеданс Z_p (Рис. 10).

4 КОНСТРУКЦИЯ ЦЕПЕЙ УСИЛИТЕЛЯ

Усилители, показанные на Рис. 7 и 10, могут быть реализованы различными способами. В самом прямолинейном решении используется усилитель с отрицательным выходным сопротивлением, который ранее был описан в

литературе [3], с параллельным резонансным контуром на выходе и полосовым фильтром на входе (сравните Рис. 10 и 11).

Однако такой вариант имеет ряд недостатков. C_p обычно составляет несколько миллифард, а L_p - несколько десятков миллигенри. И то, и другое довольно сложно реализовать на практике. Также существует потеря мощности в R_p , и полосовой фильтр должен соответствовать Z_p .

Конфигурация на рис. 12 лучше, поскольку позволяет полностью активный дизайн. Помимо усилителя мощно-

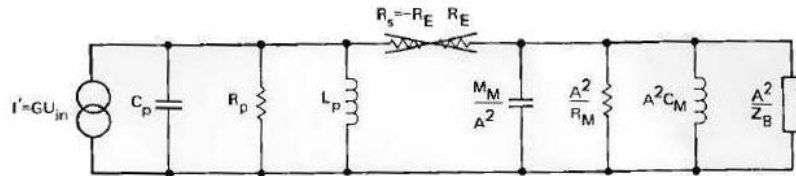


Рис. 8. Эквивалентная диаграмма для ACE-bass, если смотреть с электрической стороны.

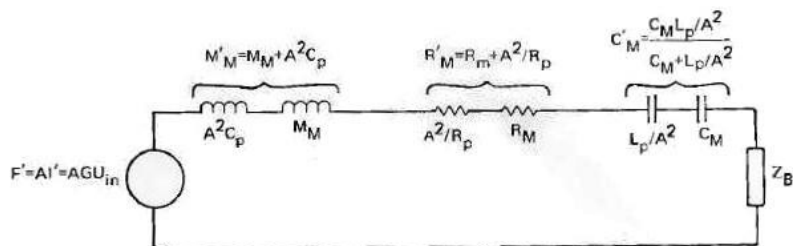


Рис. 9. Эквивалентная диаграмма для ACE-bass, если смотреть с механической стороны.

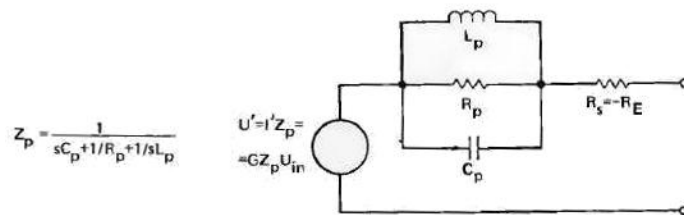


Рис. 10. Усилитель ACE-bass, как источник напряжения.

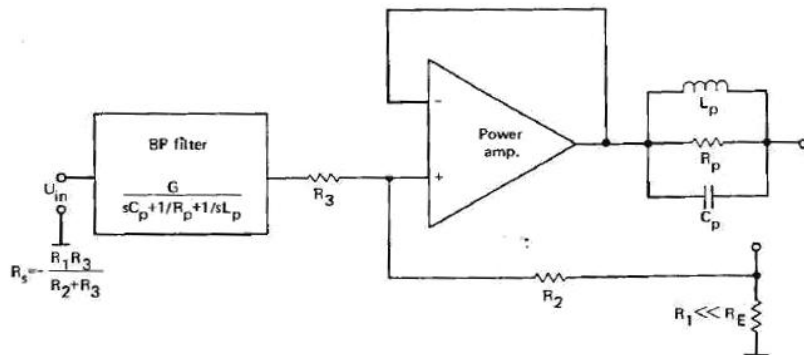


Рис. 11. Прямой синтез усилителя ACE-bass.

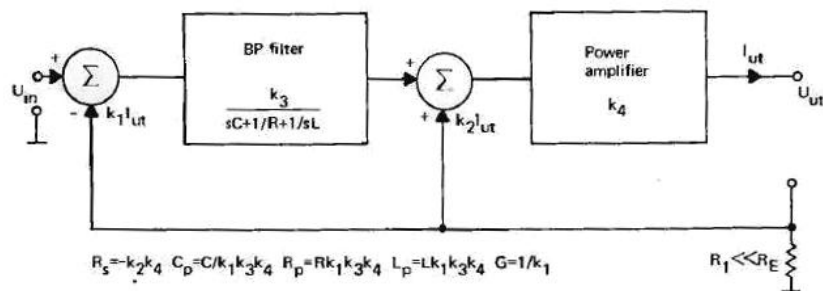


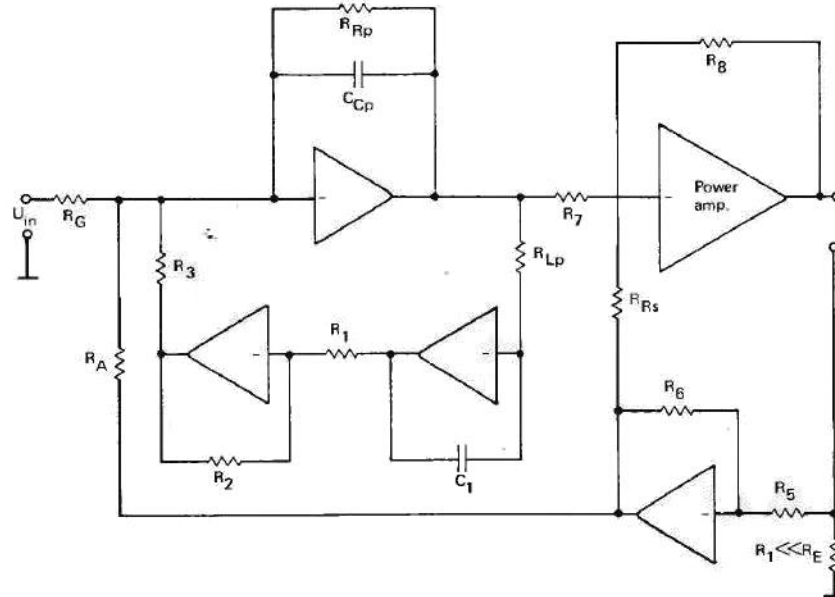
Рис. 12. Активный синтез усилителя ACE-bass.

требуется лишь несколько операционных усилителей и некоторые пассивные компоненты. Выходной ток измеряется через R_1 , и первый контур положительной обратной связи вокруг усилителя мощности дает сопротивление на выходе, в то время как второй контур отрицательной обратной связи и полосовой фильтр обеспечивают параллельную схему (Рис. 7) на выходе.

Если секция полосы пропускания реализована как фильтр с распределенным бесконечным усилением (DIG), как показано на Рис. 13, каждый параметр можно регули-

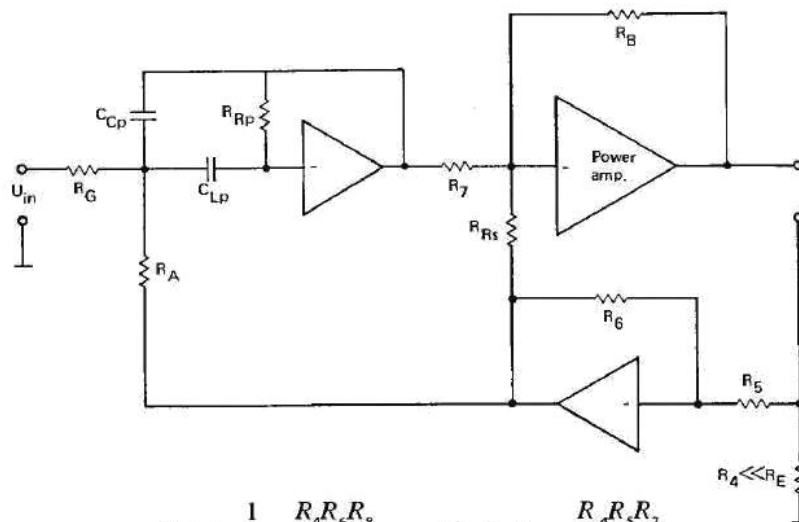
ровать независимо от других с помощью одного компонента. Эта приятная особенность может быть очень удобной на экспериментальной и опытной фазах. Однако схема на Рис. 14 выполняет ту же работу с меньшим количеством операционных усилителей, если значения компонентов определены путем вычислений.

Обе эти цепи упрощаются, если не требуется пониженная гибкость. Например, в закрытом ящике может быть достаточно увеличивать массу и контролировать затухание.



$$R_s = - \frac{1}{R_{Rs}} \frac{R_4 R_6 R_8}{R_5}, \quad C_p = C_{Cp} \frac{R_A R_5 R_7}{R_4 R_6 R_8}, \quad R_p = R_{Rp} \frac{R_4 R_6 R_8}{R_A R_3 R_7}, \quad L_p = R_{Lp} \frac{R_1 R_3 C_1}{R_2} \frac{R_4 R_6 R_8}{R_A R_5 R_7}, \quad G = \frac{1}{R_G} \frac{R_A R_5}{R_4 R_6}$$

Рис. 13. Реализация усилителя ACE-bass, пригодного для экспериментальных целей.



$$R_s = \frac{1}{R_{Rs}} \frac{R_4 R_6 R_8}{R_5}, \quad C_p = C_{Cp} \frac{R_A R_5 R_7}{R_4 R_6 R_8}$$

$$R_p = \frac{R_{Rp}}{1 + C_{Cp}/C_{Lp}} \frac{R_4 R_6 R_8}{R_A R_5 R_7}$$

$$L_p = \frac{C_{Lp} R_A R_G R_{Rp}}{R_A + R_G} \frac{R_4 R_6 R_8}{R_A R_5 R_7}$$

$$G = \frac{1}{R_G} \frac{R_A R_5}{R_4 R_6}$$

Рис. 14. Простая реализация усилителя ACE-bass.

5 ВЕРХНЕЕ ОГРАНИЧЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Пока в анализе учитывались только низкочастотные характеристики. Поскольку импеданс звуковой катушки является не только резистивным, но и индуктивным, при использовании ACE-bass между 100 и 500 Гц возникает верхняя граница частоты. На Рис. 15 показана эквивалентная схема с электрической стороны, упрощенная для этого диапазона частот. Здесь L_E - индуктивность звуковой катушки. Видно, что частотная характеристика, пропорциональная току I_h , имеет низкочастотный характер с относительно высоким значением Q .

Этот встроенный фильтр нижних частот может использоваться как часть цепи кроссовера. Получается полезный кроссовер, если значение Q уменьшается за счет уменьшения значения отрицательного сопротивления R на высоких частотах, которое создает сопротивление последовательно с L_E , и за счет объединения с простым RC-фильтром в усилителе.

6 ИСКАЖЕНИЯ

Полного теоретического анализа искажений для метода ACE-bass не проводилось, но стоит упомянуть несколько наблюдений. Измерения на низких частотах обычно показывают значительное уменьшение искажений, и, как правило, чем больше кажущиеся параметры преобладают над реальными, тем меньше искажения.

В обычных громкоговорителях некоторыми источниками искажений являются нелинейности в силовом факторе A и в механических параметрах Z_M . С ACE-bass кажущиеся параметры A^2/Z_p часто доминируют над Z_M . Скорость конуса для обычных систем с бесконечным экраном может быть записана

$$V_{MCON} = \frac{U_{in} A}{R_E Z_M}$$

в то время как скорость в динамиках ACE-bass с доминирующими кажущимися параметрами может быть аппроксимирована как

$$V_{MACE} = \frac{U_{in} GA}{A^2/Z_p} = \frac{U_{in} GZ_p}{A}$$

Уменьшение искажений может быть объяснено устранением Z_M и помещением силового фактора A в знаменатель вместо числителя.

По мере приближения к верхнему пределу частоты может появиться усиление искажений преимущественно за счет второй гармоники. Поскольку индуктивность звуковой катушки оказывает значительное влияние на этих частотах, искажения вызваны нелинейностью индуктивности, которая возникает во время больших отклонений диффузора. Эта нелинейность возникает из-за того, что «железный сердечник» индуктивности (и, следовательно, ее значение) уменьшается, когда звуковая катушка выходит из магнита, и увеличивается, когда она заходит в магнит. Это искажение можно уменьшить, используя громкоговоритель с медным кольцом вокруг его центрального полюса, которое закорачивает индуктивность звуковой катушки. Еще один очень эффективный метод - использовать два громкоговорителя последовательно или параллельно. Если один из громкоговорителей установлен об-

ратной стороной наружу (при электрическом подключении полярность естественным образом меняется на обратную), то одна звуковая катушка движется к магниту, а другая - от магнита. В результате вторая гармоника уменьшается до незначительных значений во всем диапазоне частот.

7 АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

ACE-bass был опробован с рядом громкоговорителей в различных типах акустического оформления. Наилучшие результаты были получены в фазоинверторных корпусах с двумя двухтактными («тяги-толкай») динамиками, установленными, как показано на Рис. 16. Чтобы получить большое количество низких частот, необходимо уделить особое внимание максимальной величине excursии диффузора. Хороший способ сохранить её на низком уровне - использовать схемы Баттерворта (B6) шестого порядка, предложенные Тилем [3] и Смоллом [2].

На Рис. 17 и 18 показаны различия в частотной характеристике и амплитуде конуса для выравниваний Баттерворта второго, четвертого и шестого порядков, представляющих закрытые системы, системы фазоинвертора, и системы фазоинвертора с фильтром высоких частот 12 дБ на октаву. Видно, что для системы B6 требуется только одна четвертая объема смещения по сравнению с системой с закрытым ящиком для тех же выходных сигналов и частоты среза. Используя эту возможность, можно создавать небольшие басовые системы с очень впечатляющими данными. Одна система,

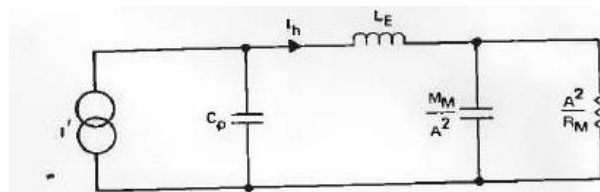


Рис. 15. Упрощенная эквивалентная схема для определения верхней границы частоты.

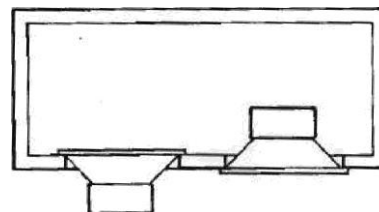


Рис. 16. Монтаж динамика для устранения искажения второй гармоники.

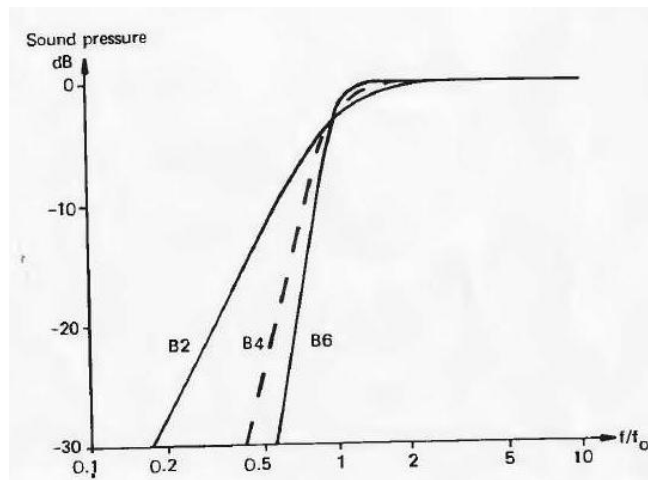


Рис. 17. Амплитудно-частотная характеристика для различных акустических систем Баттерворта.

которая работает очень хорошо, воспроизводит басы с искажениями менее 3% до 30 Гц (-3 дБ) при 96 дБ в полупространстве (27) на расстоянии 1 м. Это достигается с помощью басовой системы B6 ACE-bass, состоящей из двух стандартных 5-дюймовых (127-мм) вуфферов с пиковым ходом диффузора 4 мм в 12-литровом корпусе. Максимальная требуемая выходная мощность усилителя - 40 Вт.

Характеристики ACE-bass лучше всего можно описать, показав, как была разработана система сабвуфера. Были установлены следующие требования:

- 1) Плоская частотная характеристика до 20 Гц (-3 дБ).
- 2) Минимальный уровень выходного звукового давления 100 дБ на расстоянии 1 м в полупространстве.
- 3) Низкие искажения, менее 5% в худшем случае.
- 4) Умеренный размер, около 50 литров полезного объёма.
- 5) Умеренная входная мощность, максимум 80 Вт.

Анализ показывает, что этого можно достичь с помощью двух громкоговорителей 6,5 дюймов (165 мм) с высоким коэффициентом силы и сверхдлинным ходом в системе Баттерворта шестого порядка. Специальные низкочастотные динамики были изготовлены в соответствии с требованиями, и важными их характеристиками являются:

- 1) Площадь конуса $S = 140 \text{ cm}^2$
- 2) Максимальная экскурсия конуса $x = \pm 9 \text{ mm}$ (выступ звуковой катушки)³
- 3) Фактор силы $A = 8.8 \text{ N/A}$
- 4) Сопротивление звуковой катушки $R_E = 6.7 \Omega$
- 5) Масса подвижной системы 19 гр.
- 6) Затухание (механ. сопротивление головки) 1.6 kg/s
- 7) Гибкость 0.9 mm/N

Частотная характеристика этих драйверов, установленных в 50-литровом корпусе с фазоинвертором, настроенном на 20 Гц, показана на Рис. 19. Для достижения заданного отклика (Баттерворта шестого порядка, отсечка 20 Гц) необходимы как изменение различных механических параметров с помощью ACE-bass, так и фильтр верхних частот второго порядка. Передаточную функцию шестого порядка можно разделить на три функции второго порядка, каждая из которых математически представлена парой полюсов. Таким образом, существует три различных альтернативы разделению пар полюсов между фильтром второго порядка и системой четвертого порядка, состоящей из системы громкоговорителей в сочетании с ACE-bass. Все три варианта дают одинаковую частоту и переходную характеристику, но разные значения искажений. Измерения показали, что наименьшие искажения возникали, когда пара полюсов с наименьшей Q была назначена фильтру, а две другие пары полюсов были синтезированы в громкоговорителе при помощи ACE-bass. Такое поведение типично для ACE-bass и подразумевает, что наименьшие искажения достигаются, когда кажущиеся механические параметры в наибольшей степени доминируют над реальными параметрами.

Чтобы получить желаемую передаточную функцию, в усилитель был включен фильтр 12 дБ на октаву с резонансом на 20 Гц и $Q = 0.52$, а ACE-bass использовался для изменения механических параметров обеих головок, объединенных следующим образом:

³ Причина, по которой не следует выбирать большую площадь конуса при более умеренном ходе конуса, заключается в том, что фактор силы должен увеличиваться пропорционально площади конуса для достижения заданного выхода при той же входной мощности. Тогда потребуется магнит гораздо большего размера.

- 1) Увеличена подвижная масса с 38 до 260 гр.
- 2) Увеличено затухание с 26 (включая электрическое сопротивление головки) до 58 кг/с.
- 3) Снижена гибкость с 0,45 до 0,25 мм/N.

Эти параметры было бы практически невозможно реализовать механическими средствами, а в противном случае КПД был бы чрезвычайно низким. Однако с ACE-bass это не проблема, и эффективность такая же, как показана на Рис. 19. Нет необходимости жертвовать КПД на более высоких частотах. АЧХ и искажения на разных уровнях выходного сигнала для всей системы сабвуфера показаны на Рис. 20.

Чтобы проиллюстрировать, как различные конструктивные характеристики способствуют уменьшению искажений, описанная система, имеющая двухтактные головки в корпусе с фазоинвертором, была измерена без использования ACE-bass, то есть с обычным усилителем (Рис. 21). Для достижения ровной частотной характеристики испытательное оборудование Bale' & Kjaer использовалось в режиме компрессора.

Рис. 22 показывает, как увеличиваются искажения второй гармоники, когда громкоговорители монтируются обычным способом, а не двухтактным. Т.е. получилась бы хорошая система с фазоинвертором.

Наконец, система была преобразована в закрытый ящик (Рис. 23). Полная отдача ниже 40 Гц стала более невозможной, так как был достигнут максимальный ход диффузора, и искажения

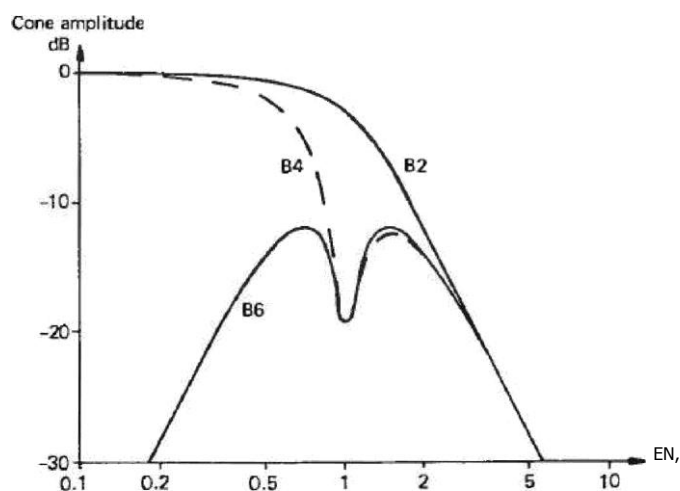


Рис. 18. Амплитуда конуса для различных акустических систем Баттерворта.

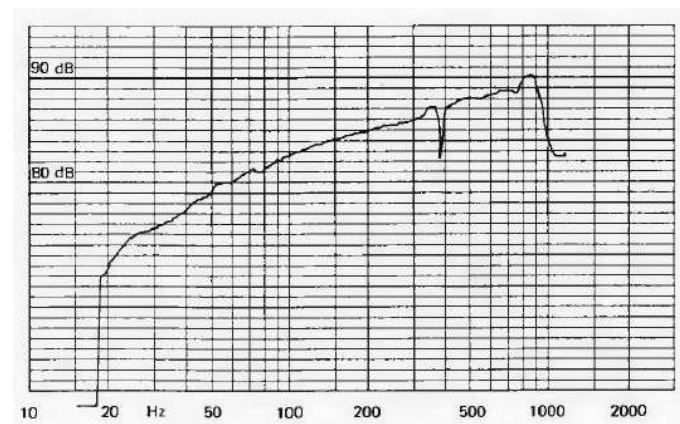


Рис. 19. АЧХ в безэховой камере сабвуфера при работе с обычным усилителем. Уровень звукового давления на расстоянии 1 м в полупространстве при подаче на вход 1 вольта.

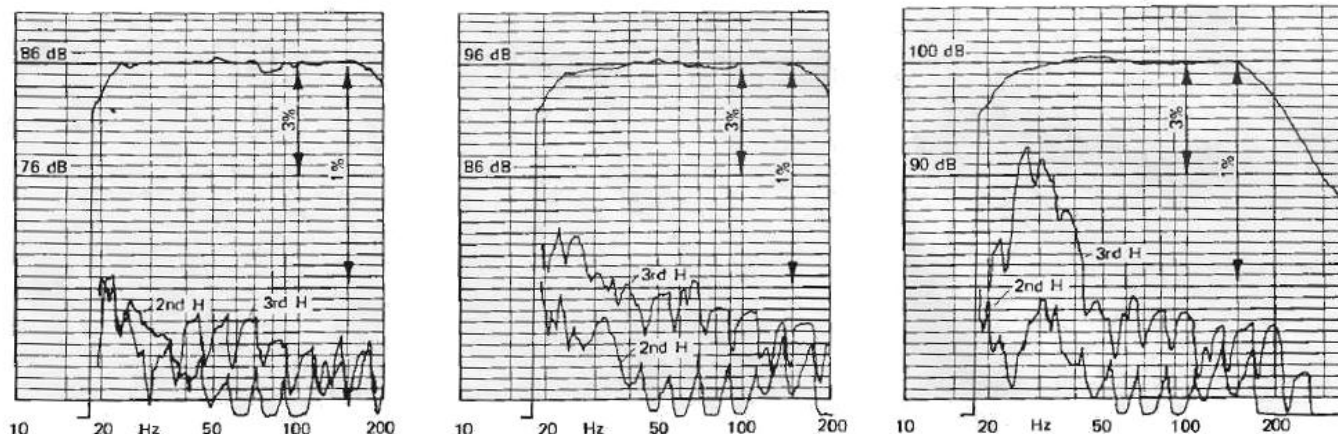


Рис. 20. Частотная характеристика и искажения для полного басового сабвуфера ACE, измеренные с помощью чистой синусоиды в безэховой камере. Скорость бумаги 3 мм/сек; скорость записи 100 мм/сек. Вторая и третья гармоники измерялись с помощью переключаемых 1/3 - октавных фильтров и усиливались на 20 дБ относительно кривой частотной характеристики. Уровень звукового давления на расстоянии 1 м в полупространстве.

значительно возросли на низких частотах. Для достижения заданного выходного уровня в закрытом корпусе с использованием обычного динамика с пределом хода конуса ± 4 мм потребуется головка диаметром 24 дюйма (600 мм). Это потребует огромного магнита, и, несмотря на это, 80 Вт в 50-литровом корпусе не обеспечат полную мощность. Искажение, несомненно, можно было бы сделать ниже, чем на рис. 23, но маловероятно, что оно получилось бы таким же низким, как на рис. 20, даже если бы использовался какой-либо тип обратной связи.

8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описан эффективный метод достижения чрезвычайно точного воспроизведения низких частот. Цена в том, что акустическая система должна быть активной, то есть усилитель должен быть специально разработан для динамика.

Большим преимуществом перед сервоприводами или системами обратной связи является то, что этот метод позволяет использовать фазоинверторные корпуса. Поскольку амплитуда диффузора не связана напрямую с выходной мощностью фазоинверторной системы, обратная связь по движению неприменима, и в целом системами четвертого порядка практически невозможно управлять с помощью обратной связи.

По сравнению с системами с эквалайзером, ACE-bass обеспечивает меньшие искажения. Кроме того, системы ACE-bass нечувствительны к изменениям реальных механических параметров громкоговорителей. Изменения в сопротивлении звуковой катушки R_E и силовом коэффициенте A действительно влияют на частотную характеристику, но в этом усилителе их можно аккуратно подрезать.

ПРИЛОЖЕНИЕ РАЗНИЦА МЕЖДУ СИСТЕМАМИ ACE-BASS И MOTIONAL FEEDBACK

Для достижения улучшенного низкочастотного отклика метод ACE-bass в громкоговорителях работает путем назначения новых механических параметров низкочастотному динамику с помощью выходного сопротивления усилителя мощности. Однако с момента его первой публикации его неоднократно

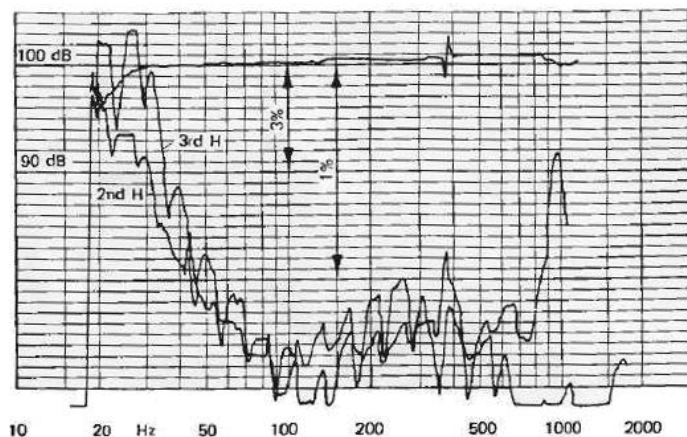


Рис. 21. Искажение для той же системы, как на Рис. 20, но без ACE-bass. Частотная характеристика поддерживалась ровной за счет обратной передачи уровня амплитуды (по каналу обратной связи). Головки смонтированы по двухтактной схеме.

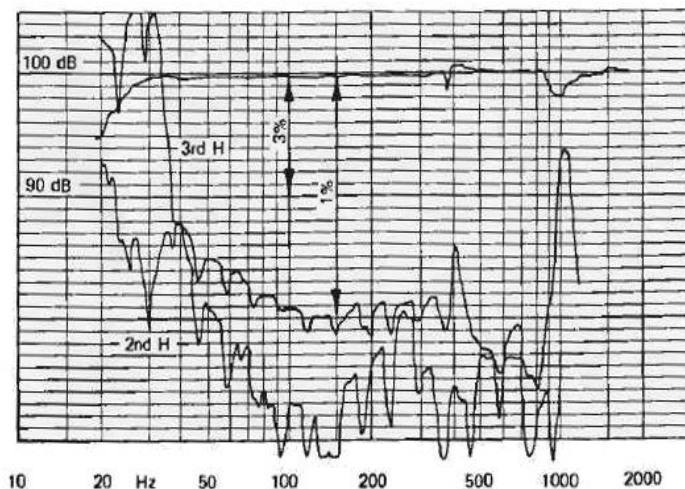


Рис. 22. Искажения при тех же условиях, что и на Рис. 21, но при нормальной установке головок.

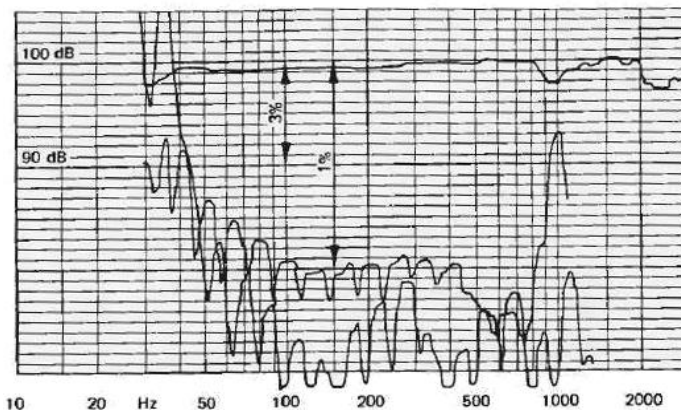


Рис. 23. Искажения при тех же условиях, что и на Рис. 22, но с закрытым корпусом вместо фазоинвертора.

путали с системами обратной связи по движению (MFB).

Цель этого приложения - прояснить важную разницу в базовом подходе и установить тот факт, что ACE-bass и MFB не эквивалентны.

В некоторых случаях, действительно, системы MFB могут давать такую же функцию передачи сигнала (вывод звука по отношению к электрическому входу), что и системы ACE-bass, однако система с фильтром также может это делать, что недостаточно, чтобы утверждать, что методы одинаковы.

ACE-Bass - это не система обратной связи

В системе MFB выходной сигнал из громкоговорителя воспринимается и тем или иным образом возвращается в усилитель. Вместо этого в ACE-bass используется усилитель со специальным выходным сопротивлением, к которому подключен громкоговоритель (Рис. 24 и 25).

Для создания специального выходного сопротивления усилителя ACE-bass обратная связь может использоваться внутри усилителя. Однако в этой обратной связи нет необходимости, и она не включает в себя громкоговоритель. На Рис. 26 показан пример усилителя ACE-bass без обратной связи (за исключением создания отрицательного сопротивления, которое здесь можно рассматривать как компонент).

Могут ли мостовые системы MFB быть эквивалентными ACE Bass?

В некоторых предлагаемых системах MFB фактический выходной сигнал из громкоговорителя не определяется. Вместо этого низкочастотный динамик подключен к мосту, из которого получается сигнал, пропорциональный скорости звуковой катушки. Этот сигнал также можно дифференцировать или интегрировать, чтобы получить сигнал ускорения или отклонения, прежде чем он будет возвращен в усилитель (Рис. 27).

Если такая система рассматривается не как система MFB, а как «специальный усилитель», управляющий низкочастотным динамиком, может ли она быть эквивалентна ACE-bass? Самый простой способ показать, что это не так, - это рассчитать выходное сопротивление «специального усилителя» с точки зрения НЧ-динамика.

Пусть $R_0 \ll R_E$, что дает сигнал обратной связи:

$$\left(U \frac{R_0}{R_E} + IR_0 \right) \left(sl + r + \frac{1}{sc} \right)$$

если $U_{in} = 0$, то

$$\begin{aligned} U &= -K \left(U \frac{R_0}{R_E} + IR_0 \right) \left(sl + r + \frac{1}{sc} \right) \Leftrightarrow U \left[1 + K \frac{R_0}{R_E} \left(sl + r + \frac{1}{sc} \right) \right] \\ &= -IKR_0 \left(sl + r + \frac{1}{sc} \right) . \end{aligned}$$

Поскольку $R_0 \ll R_E$, выходное напряжение U равно напряжению динамика, что дает выходное сопротивление

$$Z = \frac{U}{I} = - \frac{KR_0 (sl + r + 1/sc)}{1 + K(R_0/R_E)(sl + r + 1/sc)} = \frac{1}{-1/R_E + \frac{1}{-KR_0 (sl + r + 1/sc)}}$$

Этот выходной импеданс совсем не равен выходному сопротивлению усилителя ACE-bass (Рис. 28 и 29),

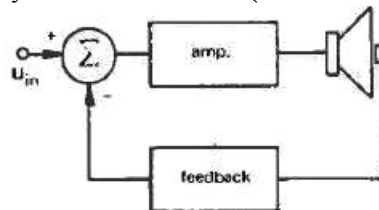


Рис. 24. Система MFB.

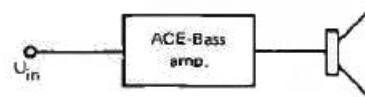


Рис. 25. Система ACE-bass.

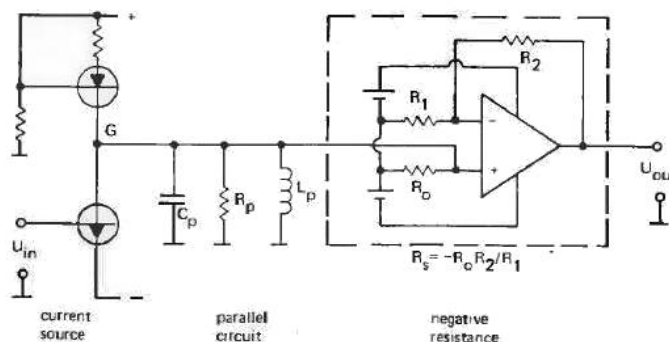


Рис. 26. Усилитель ACE-bass без обратной связи.

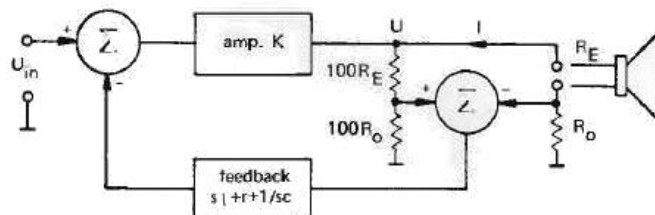


Рис. 27. Общая мостовая система MFB

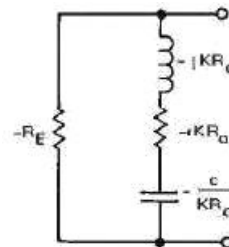


Рис. 28. Выходное сопротивление системы MFB.

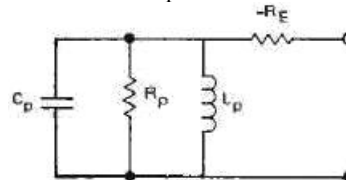


Рис. 29. Выходное сопротивление усилителя ACE-bass.

и, следовательно, система MFB мостового типа не может рассматриваться как система ACE-bass.

9 ССЫЛКИ

[1] Р. Х. Смолл, "Закрытые акустические системы". *J. Audio Eng. Soc.*, Т. 20, стр. 798-808 (декабрь 1972 г.); т. 21, стр. 11-18 (январь 1973 г.).

[2] Р. Х. Смолл, "Громкоговорители с вентилируемым корпусом". *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 21., pp. 363-372, 438-444, 549-554 (июнь 1973 г., июль / август, сентябрь).

[3] А. Н. Тиль. "Громкоговорители в вентилируемых боксах". *J. Audio Eng. Soc.*, Т. 19, стр. 382-392, 471-483 (май 1971 г., июнь).

[4] Л. Л. Беранек, *Акустика* (McGraw-Hill. Нью-Йорк, 1954).

[5] Дж. Дж. Адамс и Р. Йорк. «Обратная связь по движению в акустических системах». *Монитор-Proc. IREE*, стр. 85 (март 1976 г.).

АВТОР



Карл Эрик Шталь окончил Королевский институт технологий (КИТ) в Стокгольме, Швеция, в 1976 г. со степенью магистра наук (Civilingenjör) в области электроники. Во время учебы в КИТ он преподавал там математику и теорию электричества.

Работает в Audio Pro AB в Стокгольме,

где в качестве инженера-консультанта он отвечает за разработку акустических систем, а также принимает участие в проектировании аудиоусилителей. До прихода в Audio Pro AB он работал в области компьютерного программирования и медицинской электроники. Г-н Шталь является изобретателем ACE-bass и членом Общества аудио-инженеров.