

Бать С.Д. Токовый усилитель глазами инженера

Начнем с определения. Под токовым усилителем мы будем понимать устройство, которое создает в нагрузке изменения **тока**, строго соответствующие изменениям сигнала на входе. Этому определению удовлетворяет обычный **усилитель**, охваченный глубокой отрицательной обратной связью, если он работает на чисто активное сопротивление, величина которого не изменяется под действием выходного сигнала. Реальной нагрузкой УМЗЧ является громкоговоритель, величина полного сопротивления которого зависит от частоты и от уровня подводимой мощности.

Рассмотрим более простой случай, когда **усилитель** нагружен на громкоговоритель, в котором имеется одна динамическая головка и, соответственно, отсутствует кроссовер. (О токовых кроссоверах мы поговорим несколько позже.) Если **усилитель** поддерживает на входе динамической головки напряжение, строго соответствующее входному сигналу, изменения **тока**, протекающего через звуковую катушку, не будут строго соответствовать изменениям входного сигнала. Это связано с тем, что звуковая катушка не является чисто активным сопротивлением, кроме того, величина полного сопротивления звуковой катушки зависит от уровня входного сигнала. Активное сопротивление звуковой катушки увеличивается с ростом подводимой мощности вследствие нагрева. Звуковая катушка обладает индуктивностью, величина которой зависит от частоты и от амплитуды колебаний. Нагрев звуковой катушки приводит к некоторой термической компрессии сигнала. Нелинейность индуктивности (т.е. зависимость от частоты и амплитуды сигнала) приводит к возникновению линейных и нелинейных искажений. Линейные искажения проявляются в виде фазовой модуляции сигнала, нелинейные искажения проявляются в виде генерации гармоник и комбинационных частот.

Перечисленные нежелательные эффекты можно существенно ослабить, если поддерживать изменения **тока** через звуковую катушку, строго соответствующие входному сигналу. Это связано с тем, что сила, прикладываемая к диффузору динамической головки пропорциональна току, протекающему через звуковую катушку.

$$F = BL \times I \quad (1)$$

Формула (1) по существу является главной предпосылкой, лежащей в основе идеи использования токовых усилителей. Используя токовый **усилитель**, мы надеемся устранить или существенно ослабить нежелательные эффекты, о которых сказано выше, что приведет к снижению искажений, повышению динамичности звучания и улучшению стабильности пространственного расположения кажущихся источников звука.

Возникает вполне резонный вопрос: «Почему столь простая и очевидная идея не нашла воплощения в промышленных изделиях, а пока осталась только в сфере интересов энтузиастов - любителей?»

Возможно специалисты, занимающиеся выпуском аппаратуры для звуковоспроизведения, посчитали, что улучшение качества, которое может быть получено от использования токовых усилителей, не оправдывается затратами на преодоление технических трудностей и усложнение аппаратуры, связанное с применением токовых усилителей. Проблема состоит не в трудностях разработки и производства токовых усилителей, а в согласовании их с громкоговорителями. Плоские АЧХ динамических головок, обеспечивающие правильный тональный баланс, получаются при питании от источника напряжения. При питании от источника **тока** АЧХ приобретают значительную неравномерность. Возникает необходимость компенсации неравномерности АЧХ. Значительные трудности возникают вблизи резонансных частот динамических головок. По мере приближения к частоте резонанса модуль полного сопротивления динамической головки начинает быстро возрастать. Напряжение на выходе токового усилителя пропорционально сопротивлению нагрузки. Следовательно, вблизи резонансной частоты напряжение на головке быстро возрастает, что приводит, как правило, к перегрузке головки со всеми вытекающими из этого последствиями для качества воспроизведения.

На рис.1 показаны АЧХ по звуковому давлению одной и той же головки в акустическом оформлении, измеренные при питании от усилителя напряжения и от усилителя **тока**. АЧХ, снятая при питании головки от усилителя **тока**, показана сплошной линией. Сравнение АЧХ наглядно подтверждает приведенные выше соображения. В процессе измерения АЧХ от токового усилителя динамическая головка вышла из

линейного участка хода звуковой катушки на частотах вблизи 60Гц. Начиная с 500 Гц, АЧХ имеет заметную тенденцию к подъему, связанную с ростом полного сопротивления при увеличении частоты. На частоте 2500 Гц подъем достигает 9 дБ относительно АЧХ, снятой от усилителя напряжения. Результаты измерений заставляют усомниться в рекомендациях по использованию токовых усилителей с громкоговорителями на одной динамической головке.

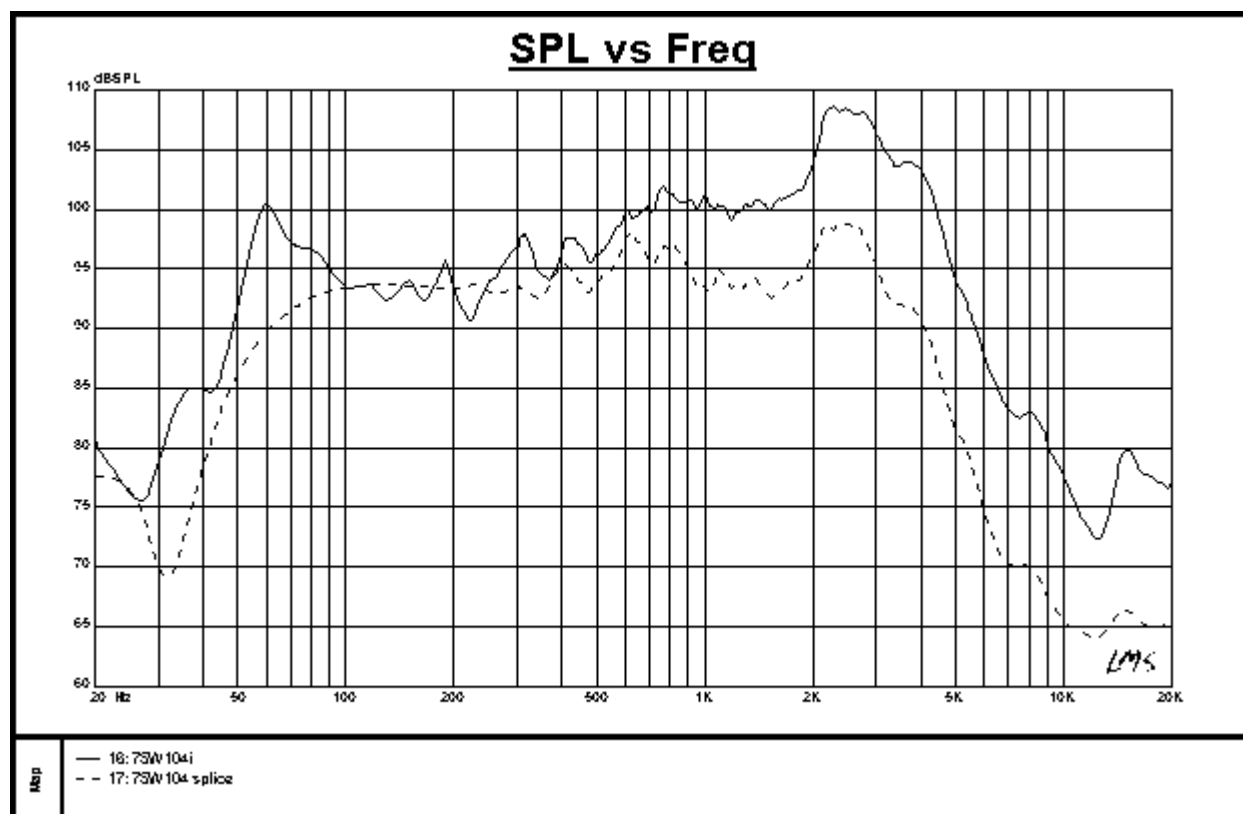


Рис.1 АЧХ динамической головки, работающей от усилителя напряжения и усилителя **тока**.

Техническое решение, позволяющее избавиться от рассмотренных недостатков, состоит в построении активного громкоговорителя с электронным кроссовером. В состав электронного кроссовера придется ввести компенсацию неравномерностей АЧХ СЧ и ВЧ головок, работающих от токовых усилителей.

Частоты раздела и параметры фильтров кроссовера необходимо выбрать так, чтобы сильно ослабить сигнал вблизи резонансных частот СЧ и ВЧ головок. НЧ головку придется питать от усилителя напряжения, поскольку необходимо обеспечить электрическое демпфирование ее резонанса. Подобная система позволит наилучшим образом реализовать преимущества токового питания динамических головок. Подобная система успешно разработана и изготовлена А. Сырицо и получила самую высокую оценку, как в профессиональных кругах, так и среди аудиофилов.

Система, построенная на базе одного усилителя, которая позволила бы реализовать преимущества токового питания динамических головок, требует разработки специального кроссовера. При этом необходимо выяснить, обеспечивается ли токовое питание динамических головок с учетом влияния элементов кроссовера. Поэтому, прежде чем приступить к разработке кроссовера, было бы полезно оценить, при какой минимальной величине выходного сопротивления эквивалентного генератора, питающего головку, можно получить заметное снижение искажений, связанных с нелинейностью индуктивности звуковой катушки.

Индуктивность (L_{vc}) и активное сопротивление (R_{vc}) звуковой катушки образуют фильтр нижних частот первого порядка, частота среза которого вычисляется по формуле:

$$F = R_{vc} / 6,28 L_{vc} \quad (2)$$

Для примера в таблице приведены значения R_{vc} , L_{vc} и F для нескольких типов НЧ-СЧ динамических головок, часто используемых в двухполосных громкоговорителях

головок, часто используемых в двухполосных громкоговорителях

Тип головки	R_{vc} (Ом)	L_{vc} (мГн)	F (Гц)
SEAS H1216	5,5	0,76	1152
SEAS H571	5,7	0,65	1190
SEAS H1215	6,1	1,1	883
SEAS H626	5,7	0,65	1390
SEAS H333	6,1	0,6	1620
VIFA M18WO 09	5,7	0,9	1008
VIFA P17WJ 00	5,8	0,55	1670
VIFA P13 WH 00	5,7	0,7	1990
ASW WG-150	3,3	0,3	1750

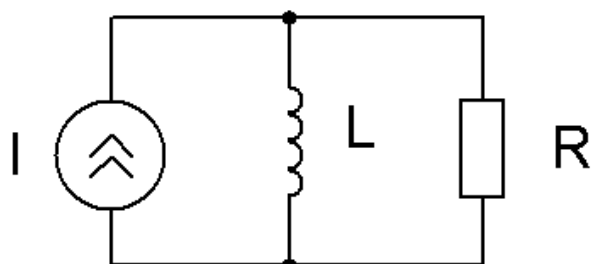
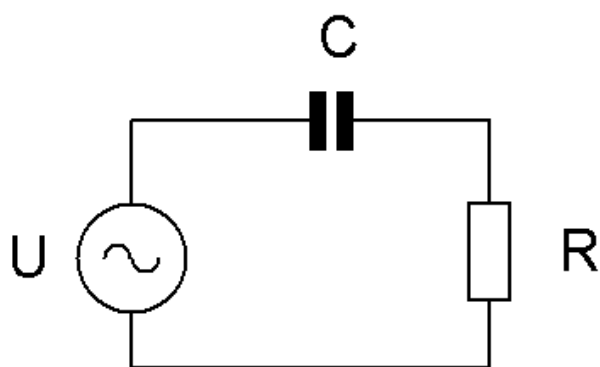
Согласно данным таблицы частоты среза «встроенных» фильтров располагаются в интервале примерно от 1 до 2 кГц. Влияние нелинейности индуктивности звуковой катушки на форму **тока** и соответственно на качество воспроизведения звука будет особенно заметно проявляться, начиная с указанного интервала частот и кончая верхней частотой, на которой используется динамическая головка. Если за счет увеличения выходного сопротивления эквивалентного генератора, питающего динамическую головку, сдвинуть частоту среза «встроенного» фильтра вверх за границу рабочего диапазона, то можно рассчитывать на заметное снижение искажений, связанных с нелинейностью индуктивности звуковой катушки. Обычно подобные динамические головки используются для воспроизведения частот не выше 3,5 кГц. Нетрудно подсчитать, что для динамических головок, приведенных в таблице, частота среза встроенного фильтра сдвинется выше 3,5 кГц при питании от генератора с выходным сопротивлением 6 - 12 Ом.

Большинство современных ВЧ головок имеют индуктивность звуковой катушки порядка 0,05 мГн и, соответственно, частоту среза «встроенного» фильтра порядка 12 -15 кГц. Чтобы сдвинуть частоту «встроенного» фильтра выше 20 кГц требуется выходное сопротивление генератора порядка 5 Ом. При проектировании пассивных фильтров нам придется принимать во внимание величины выходных сопротивлений эквивалентных генераторов, питающих головки.

Привычные для нас фильтры, работающие от источника напряжения, представляют собой частотнозависимые делители напряжения.

В дальнейшем для краткости мы будем называть фильтры, предназначенные для работы от источника **тока**, токовыми фильтрами. Соответственно токовые фильтры являются частотнозависимыми делителями **тока**.

Рассмотрим более подробно принцип построения токовых фильтров.



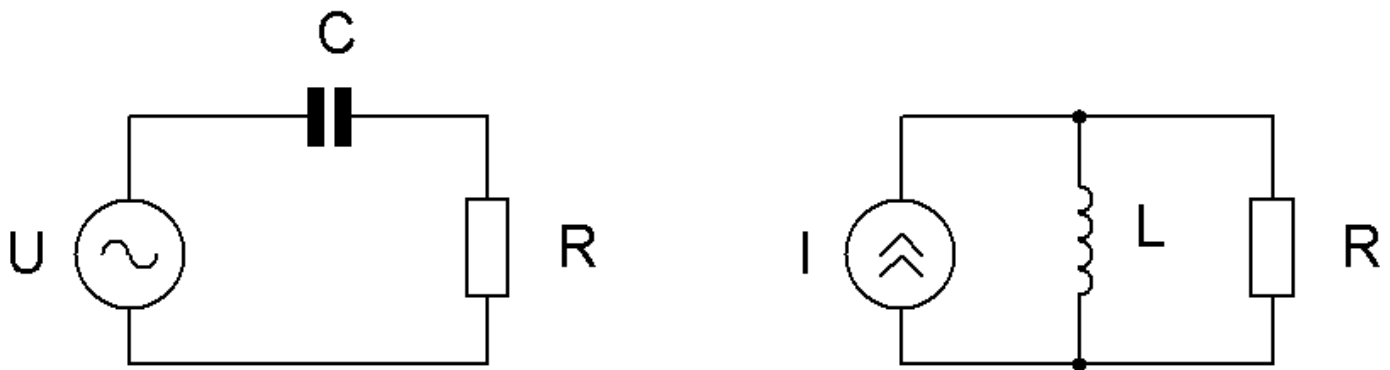


Рис.2 ФВЧ первого порядка для напряжения и **тока**.

На рис.2 показаны схемы фильтров верхних частот первого порядка для источника напряжения и для источника **тока**. Напряжение источника сигнала U делится между емкостью C и сопротивлением нагрузки R . С уменьшением частоты сопротивление емкости увеличивается, уменьшается часть напряжения источника U , приложенная к нагрузке R . Частота, на которой коэффициент передачи фильтра равен 0,707, вычисляется по формуле:

$$F = 1/6,28 RC \quad (3)$$

Соответственно в токовом фильтре ток источника I делится между индуктивностью L и сопротивлением нагрузки R . С уменьшением частоты сопротивление индуктивности уменьшается и возрастает доля **тока**, который ответвляется в индуктивность, уменьшая долю **тока** в нагрузке. Частота, на которой в нагрузку попадает 0,707 от **тока** источника, вычисляется по формуле:

$$F = R/6,28L \quad (4)$$

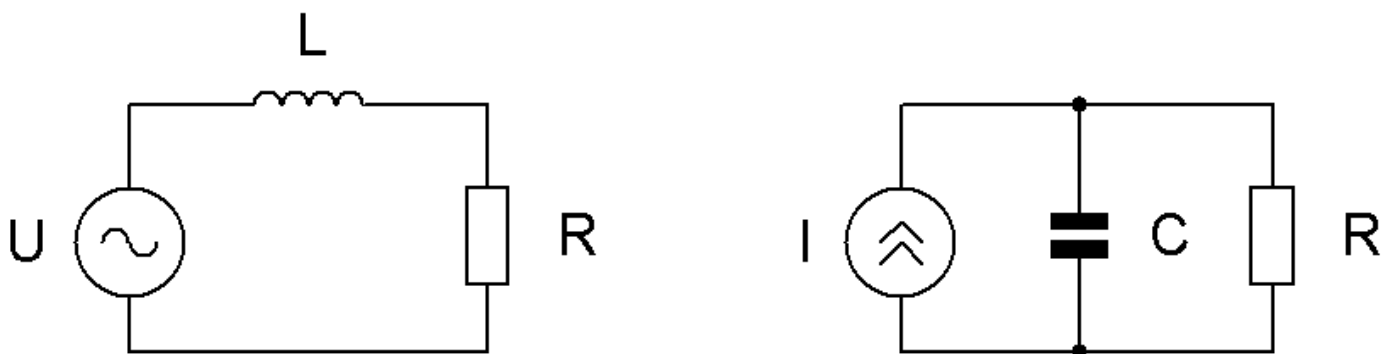


Рис.3 ФНЧ первого порядка для напряжения и **тока**.

На рис.3 показаны схемы фильтров нижних частот первого порядка для источника напряжения и источника **тока**. Для фильтров нижних частот справедливы формулы (3) и (4). Сопоставление конфигураций фильтров позволяет заметить, что для того, чтобы перейти от фильтров для источника напряжения к фильтрам для источника **тока**, нужно последовательное соединение элементов заменить на параллельное, индуктивности заменить на емкости, а емкости - на индуктивности.

На рис. 4 и 5 показаны схемы токовых фильтров второго порядка соответственно верхних и нижних частот.

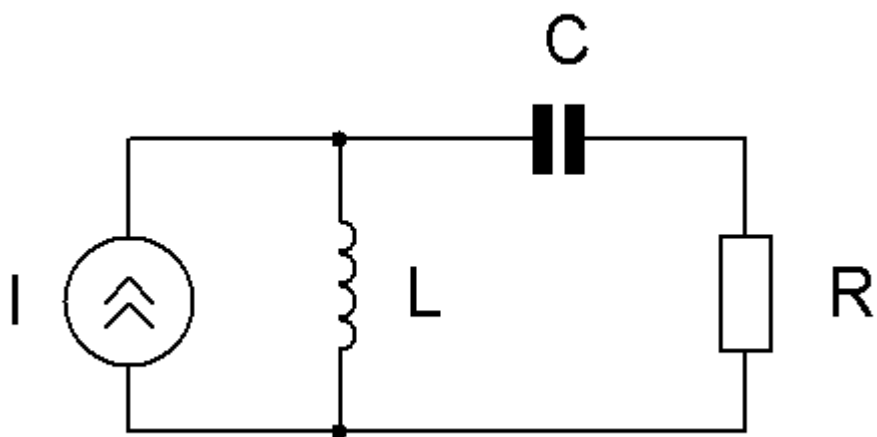


Рис.4 Токовый ФВЧ второго порядка.

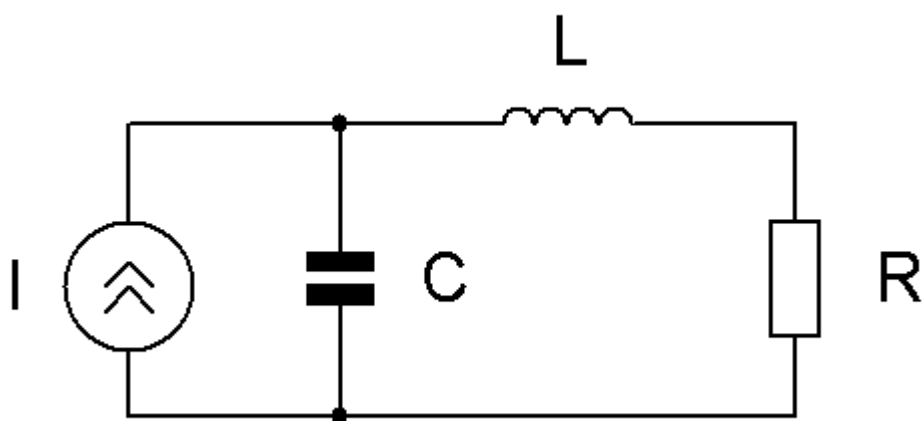
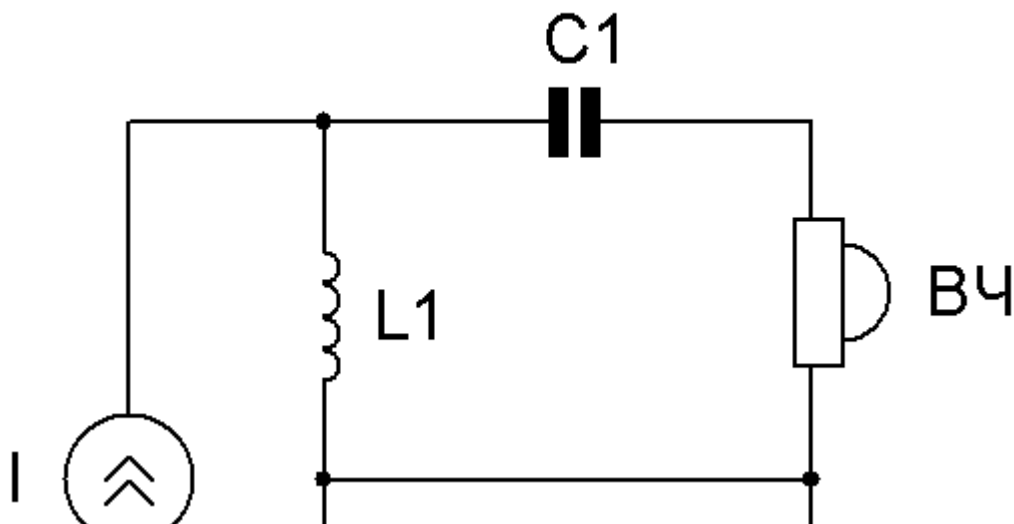


Рис.5 Токовый ФНЧ второго порядка.

Представляется целесообразным построить токовый кроссовер путем последовательного соединения ФВЧ и ФНЧ как показано на рис.6. При параллельном соединении фильтров больше вероятность нарушить режим токового питания.



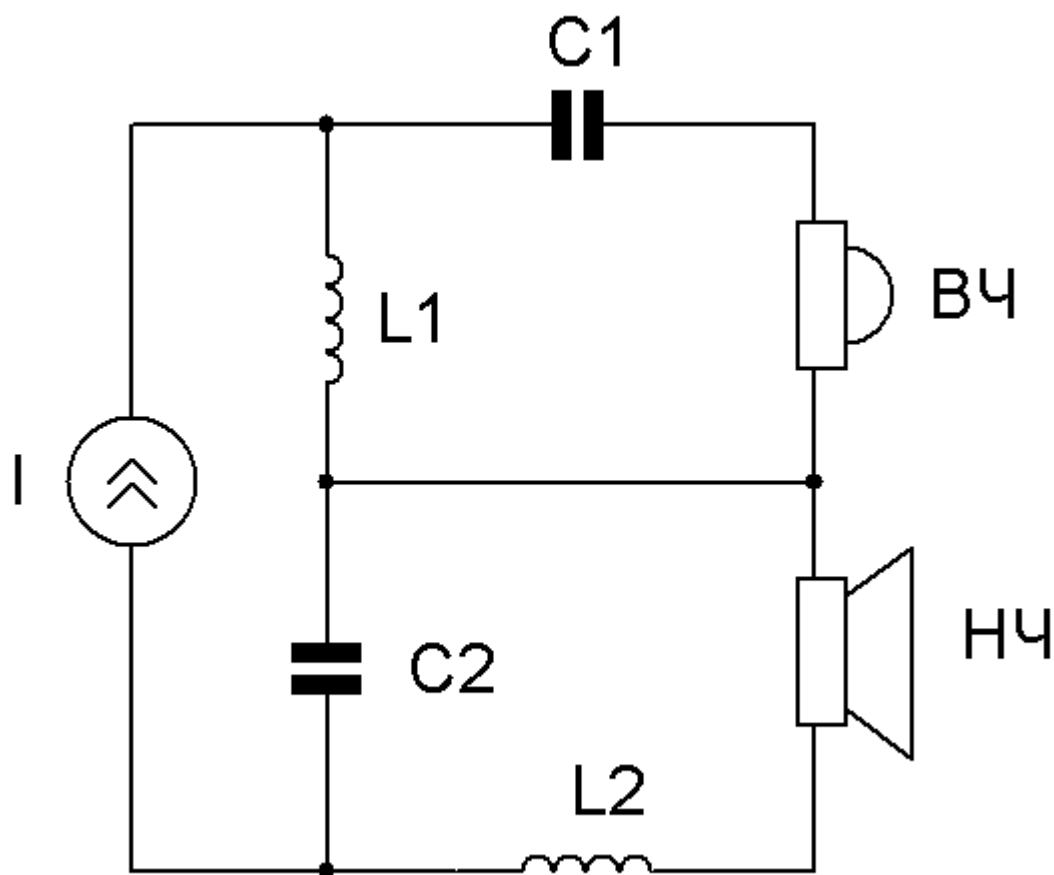
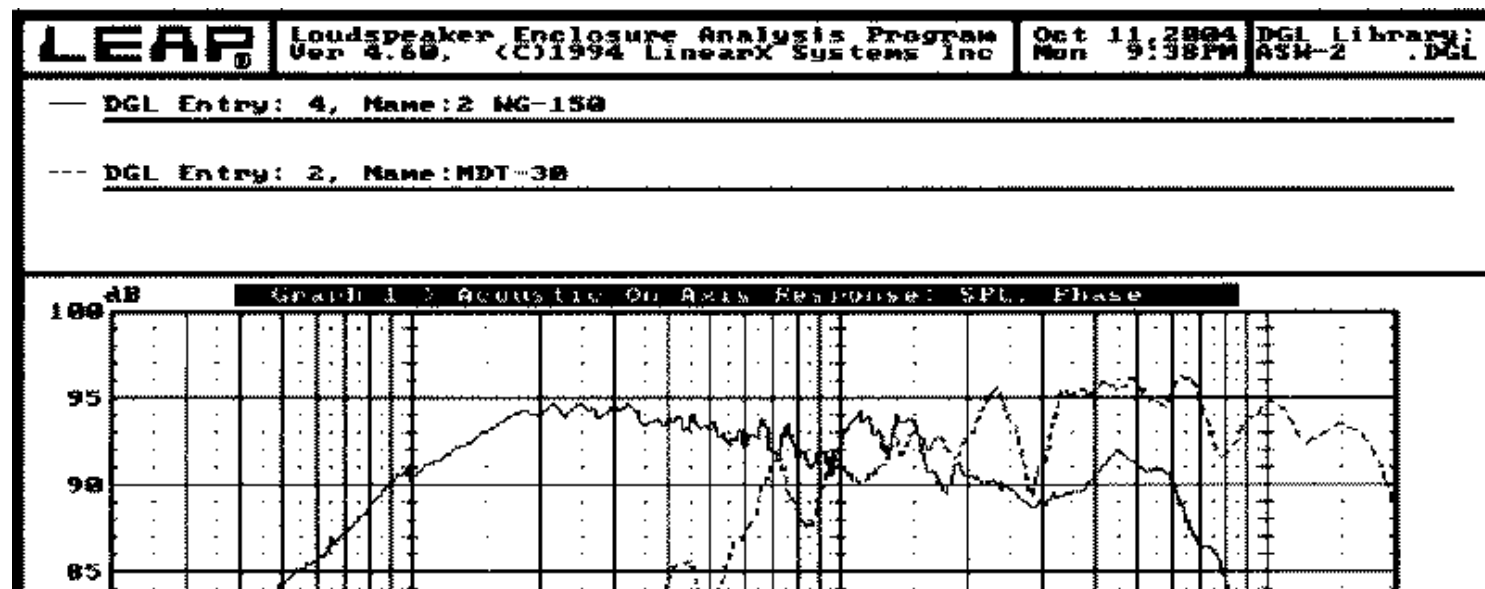


Рис.6 Соединение токовых ФВЧ и ФНЧ.

Мы определились с принципом построения пассивного токового кроссовера и можем попытаться построить двухполосный громкоговоритель, предназначенный для работы с токовым усилителем.

На рис.7 показаны АЧХ по звуковому давлению НЧ и ВЧ головок, работающих с усилителем напряжения. Для НЧ диапазона использованы две головки WG-150, соединенные последовательно, в закрытом корпусе объемом 10 литров. ВЧ головка типа MDT-30 установлена между НЧ головками. АЧХ измерены микрофоном, расположенным вдоль оси ВЧ головки на расстоянии 0,5 м.

На рис. 8 показаны АЧХ головок, работающих от усилителя **тока**, снятые при том же расположении микрофона. Начнем с компенсации импеданса головок НЧ звена, чтобы избежать бубнения и перегрузки головки на резонансной частоте и подъема АЧХ в верхней части рабочего диапазона.



— DGL Entry: 4, Name: 2 NG-150

--- DGL Entry: 2, Name: MDT-30

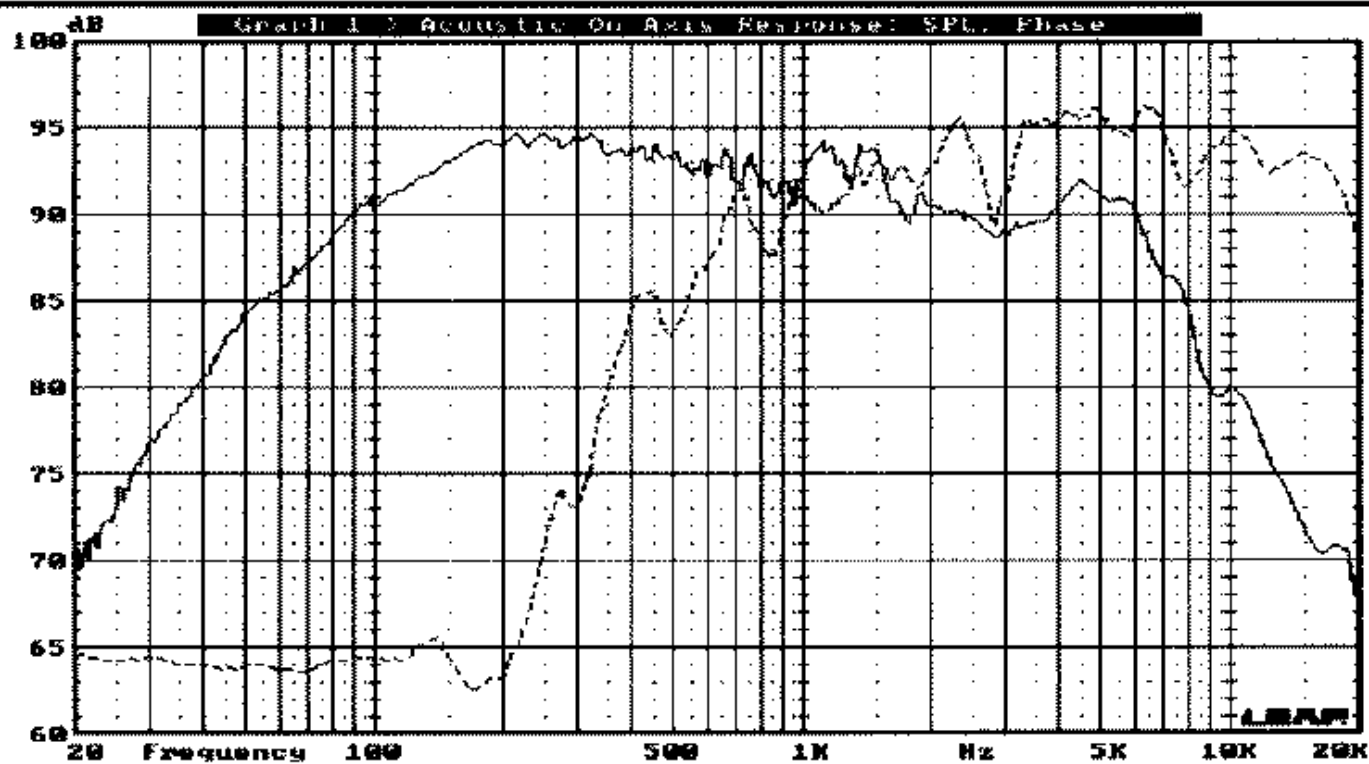


Рис.7 АЧХ динамических головок, работающих от усилителя напряжения.

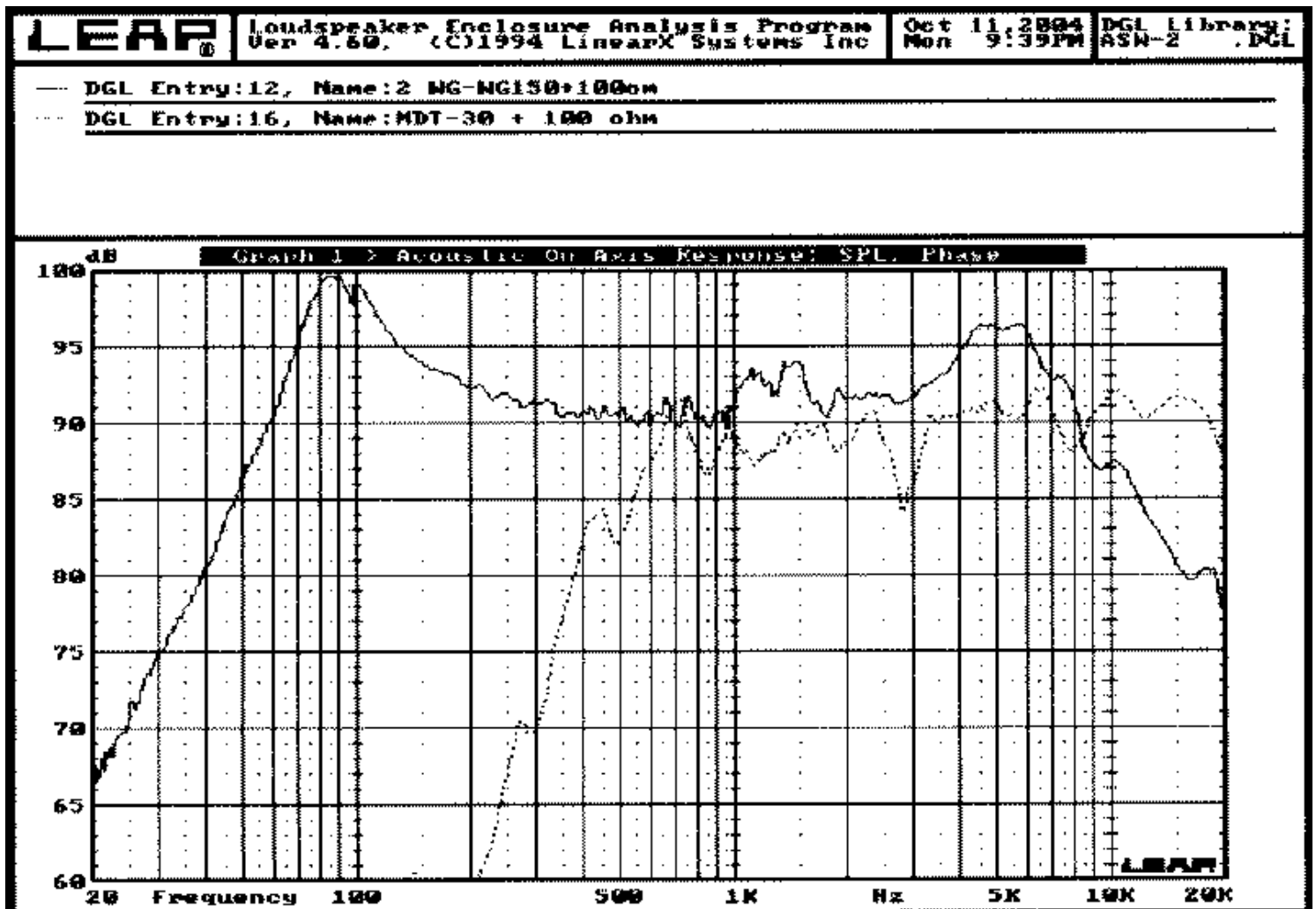


Рис.8 АЧХ динамических головок, работающих от усилителя тока.

На рис 9 показано изменение АЧХ в результате подключения цепей компенсации, схема которых показана на рис 10.

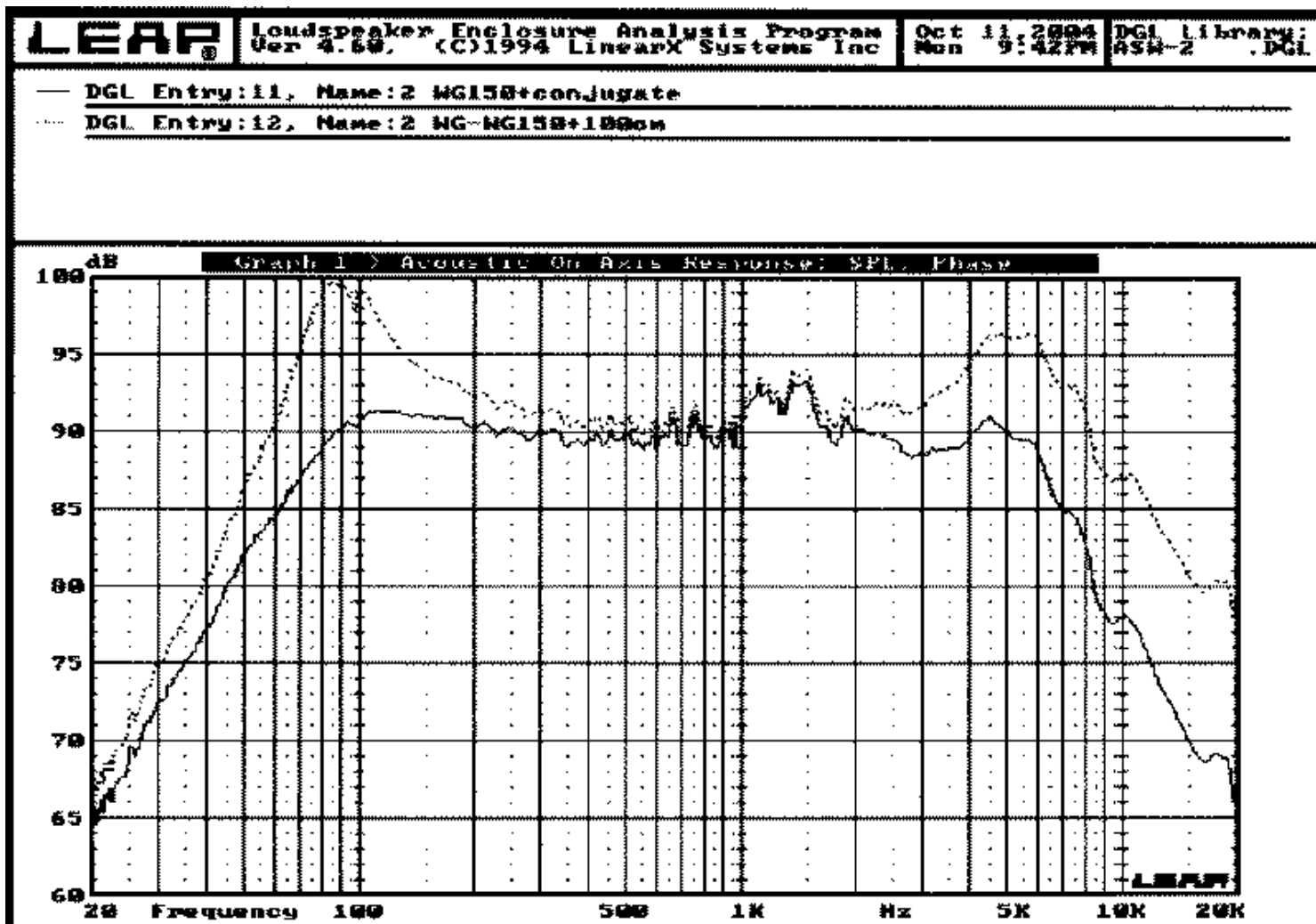


Рис.9 Компенсация подъемов АЧХ НЧ головок.

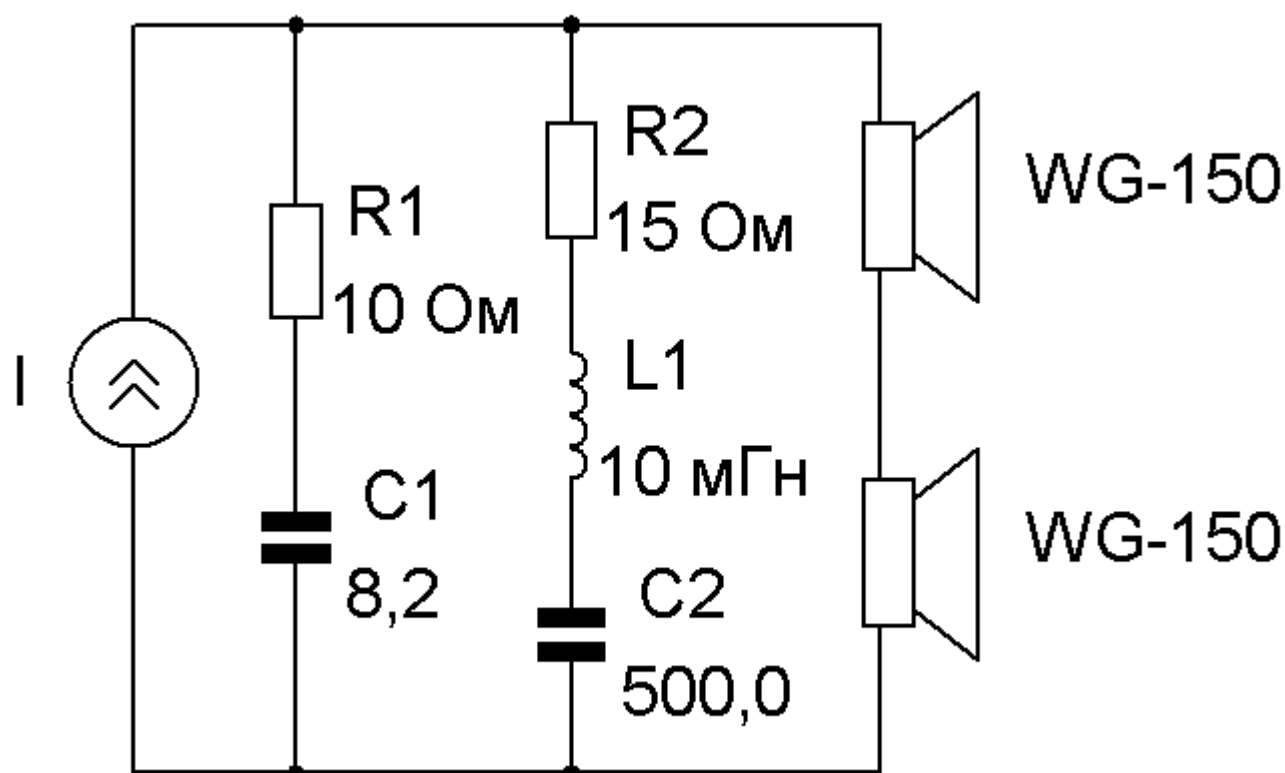


Рис.10 Схема компенсации НЧ головок.

Теперь полезно оценить, как повлияли компенсационные цепи на режим токового питания. Цепь компенсации резонансного пика R2, L1, C2 на частотах выше 1кГц практически не влияет. Модуль полного сопротивления цепи R1,C1 равен 14 Ом на частоте 2 кГц. Сопротивление 14 Ом сдвигает частоту встроенного фильтра до 5,4 кГц. Если выбрать частоту раздела 2 кГц, согласно критерию, который мы сформулировали выше, подключение компенсационных цепей оставляет некоторый запас по обеспечению режима токового питания.

Для фильтра первого порядка на частоту раздела 2 кГц требуется емкость 10 мкФ. Подключив параллельно генератору **тока** (рис.10) емкость 10 мкФ мы получим на частоте 2 кГц выходное сопротивление генератора, питающего головки, 5 Ом. При сопротивлении эквивалентного генератора 5 Ом частота встроенного фильтра получается 3 кГц, т.е. частота встроенного фильтра всего лишь в 1,5 раза выше частоты раздела. При таком соотношении частоты встроенного фильтра и частоты раздела в полной мере не удастся реализовать преимущества токового питания динамических головок. Такова плата за получение АЧХ по звуковому давлению с приемлемой неравномерностью.

На рис. 11 показаны АЧХ динамических головок, работающих совместно с токовыми фильтрами. Для ВЧ головки используется токовый фильтр второго порядка. Полная схема кроссовера показана на рис. 12, АЧХ по звуковому давлению громкоговорителя с токовым кроссовером - на рис.13.

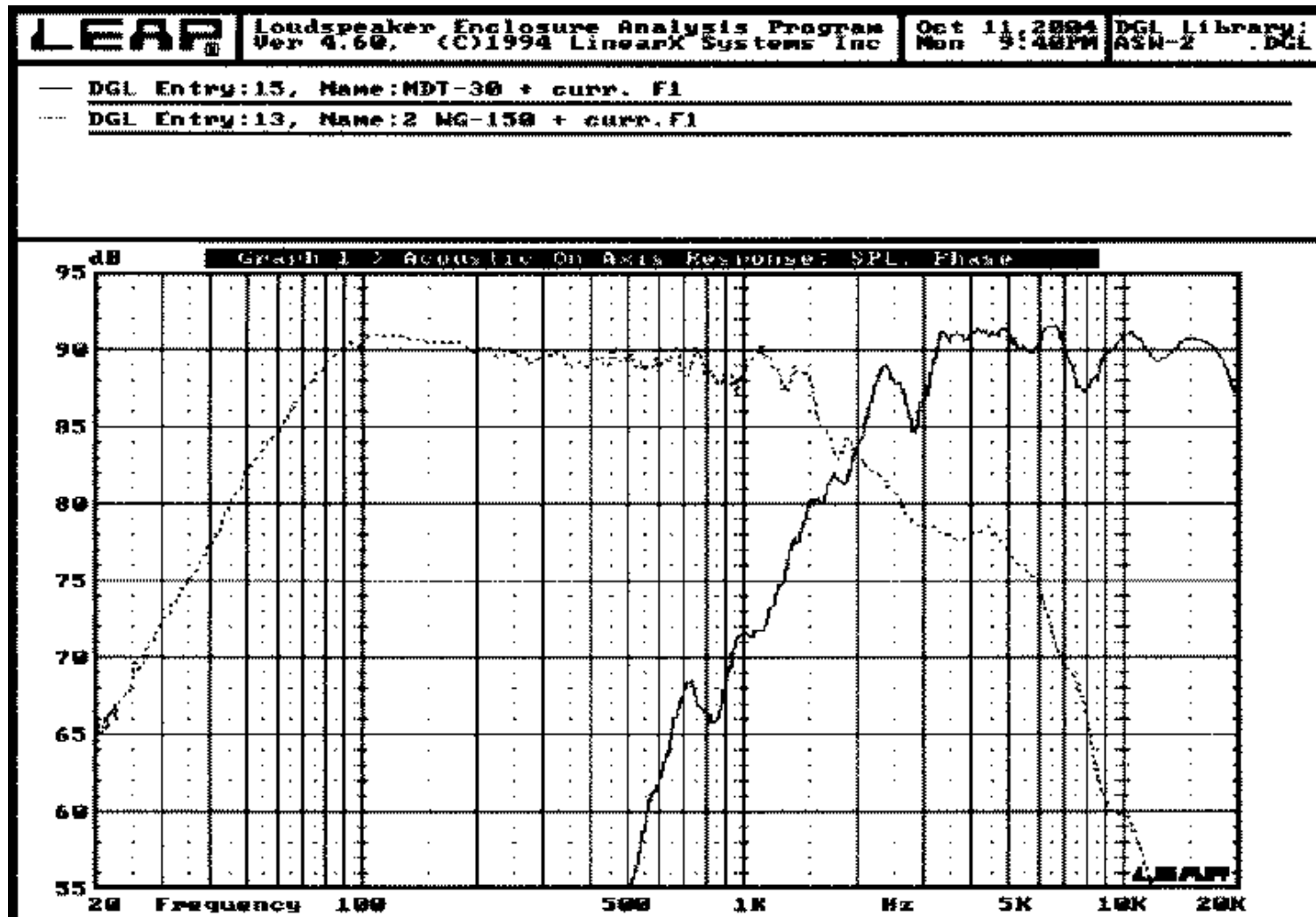


Рис.11 АЧХ динамических головок, работающих с токовыми фильтрами.

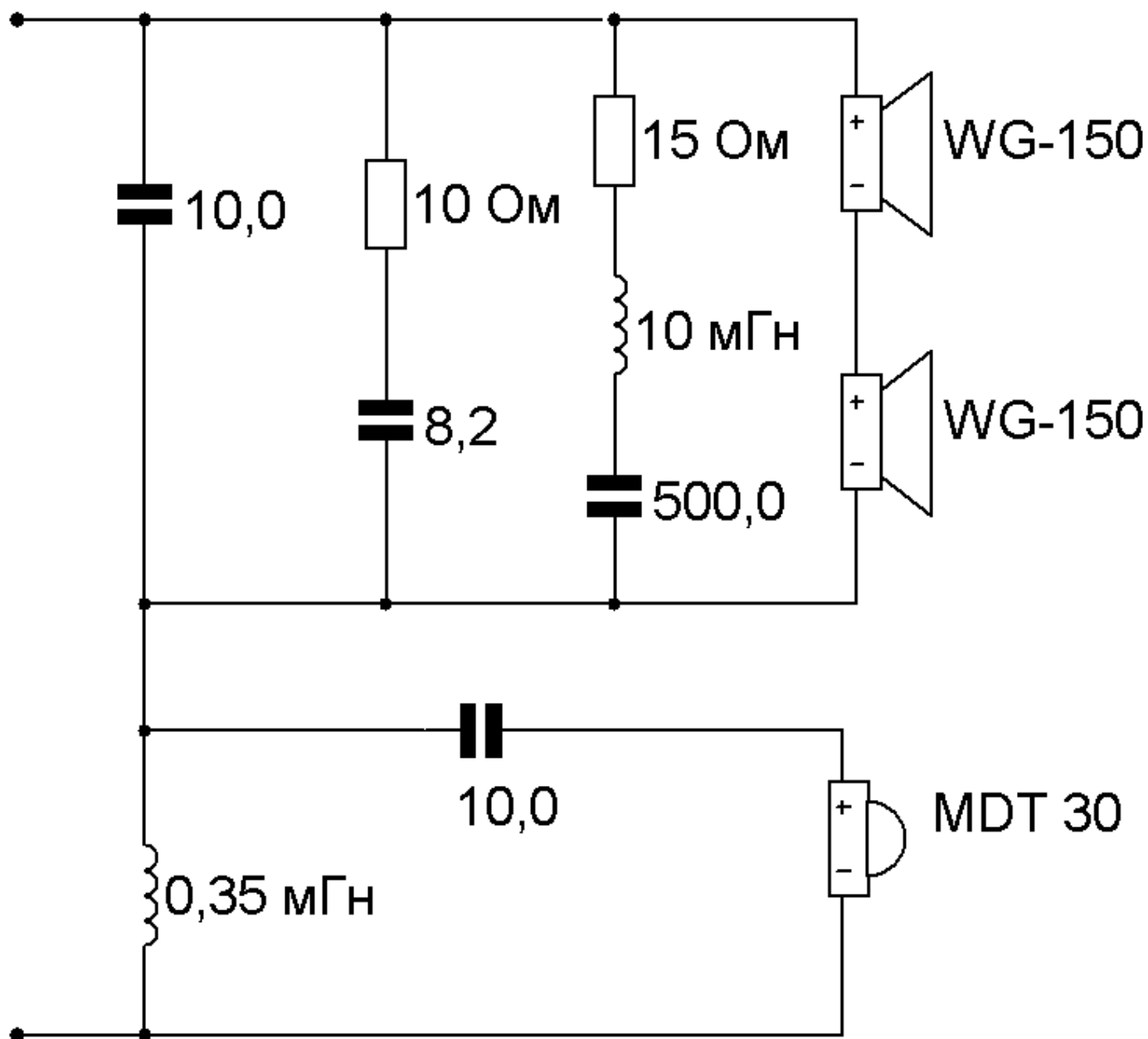


Рис.12 Схема кроссовера с токовыми фильтрами.

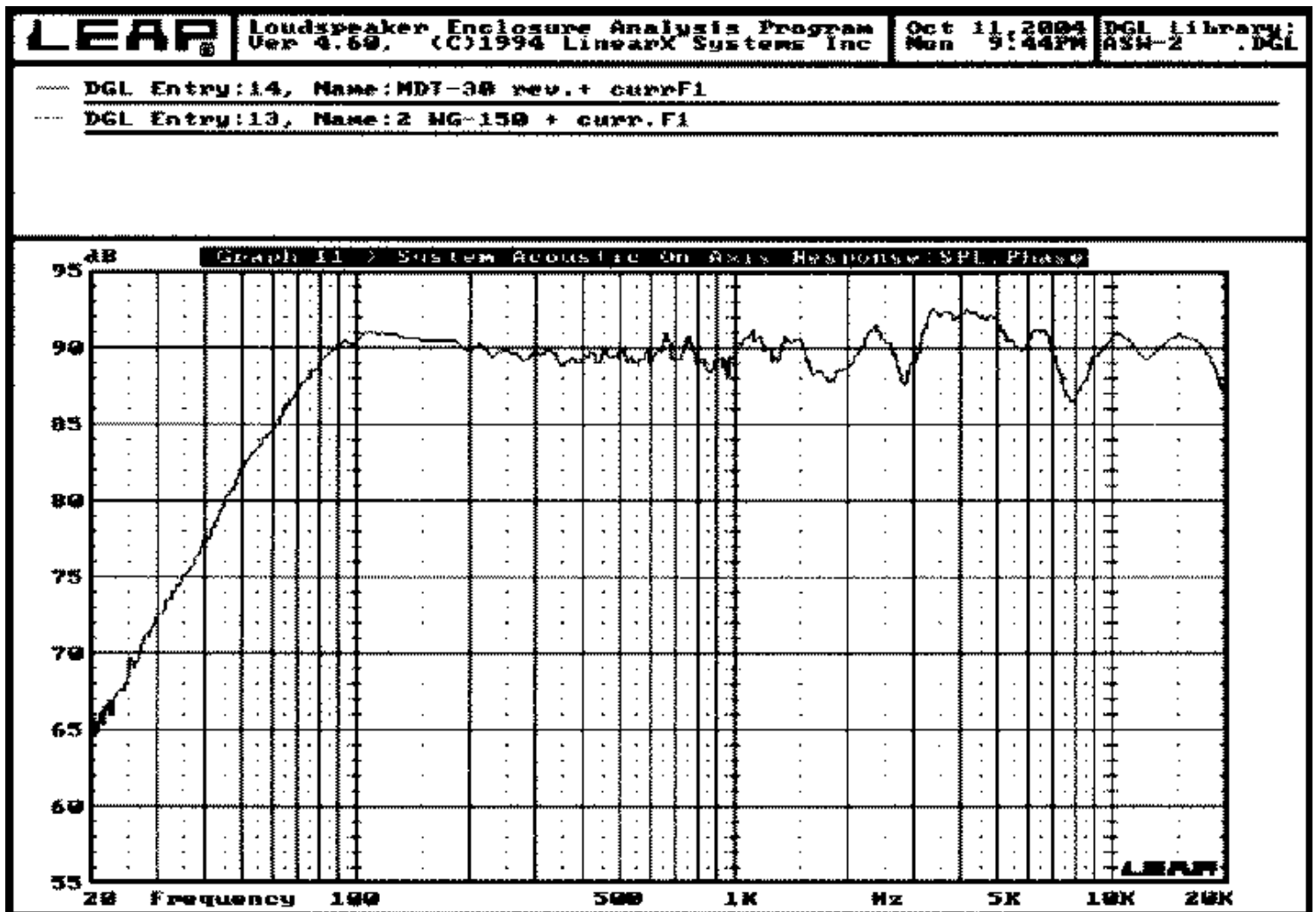


Рис.13 АЧХ громкоговорителя с токовым кроссовером.

Осталось кратко сформулировать основные результаты работы.

1. Питание громкоговорителей от токовых усилителей дает улучшение качества звучания в части локализации кажущихся источников звука и передачи динамических контрастов. Одновременно, нарушается тональный баланс и повышается возможность перегрузки громкоговорителя на низких частотах.
2. Наилучший способ устранения недостатков и реализации преимуществ токового питания состоит в построении активных громкоговорителей с электронными кроссоверами.
3. Использование токовых усилителей с громкоговорителями, построенными для усилителей напряжения, нецелесообразно, поскольку происходит существенное нарушение тонального баланса. Для обеспечения приемлемого тонального баланса необходим специально разработанный кроссовер.
4. Пассивные кроссоверы для токовых усилителей имеют определенную специфику в части построения фильтров, компенсационных цепей и соединения фильтров. Использование пассивных кроссоверов неизбежно приводит к ухудшению режима токового питания динамических головок.
5. Разработанный громкоговоритель, несмотря на все рассмотренные выше недостатки, в токовом режиме дает некоторый выигрыш в качестве воспроизведения звука в сравнении с таким же громкоговорителем, построенным традиционным способом и работающим от усилителя напряжения.

Автор благодарит А. Тучкова за изготовление корпуса громкоговорителя, который использовался в этой работе.