

Пример проектирования TQWT ('¼-волновой трубы переменного сечения')

Настоящая статья о влиянии резонаторов Гельмгольца при проектировании TQWT, написанная E. Jakulis, является результатом активной дискуссии с Filippo Punzo.

Компромиссы при разработке АС неизбежны, и в случае схемы с применением TQWT неотвратимой расплатой за хорошую чувствительность будут размер (АС) и сложность конструкции. Для выравнивания (линеаризации) резонансных гармоник TQWT требуется использовать несколько полостей Гельмгольца, а также оптимизировать размеры горловины/раструба <раскрыва, устья> и длины линии относительно низкочастотной чувствительности громкоговорителя. К сожалению, это в большой степени процесс сложного математического моделирования, не слишком доступный любителю-самодельщику. Цель настоящей работы – показать, что проектирование TQWT – задача с четко определенными условиями.

1. Выбор громкоговорителя для эффективной отдачи на СЧ.
2. Линия (труба) должна быть рассчитана, исходя из отдачи громкоговорителя на НЧ.
3. Определение соотношения (размеров) горловина-раструб для длины линии, чтобы получить требуемый коэффициент усиления по НЧ.
4. Изгиб трубы для использования характеристик затухания ВЧ для подавления гармоник резонанса трубы на высоких частотах.
5. Выравнивание (линеаризация) отдачи (характеристики) на НЧ за счет применения полостей (резонаторов) Гельмгольца, настроенных на 1-ю, 3-ю или 4 гармоники трубы.

Uncompensated TQWT system response.



Формальная (теоретическая) незаполненная и некомпенсированная TQWT обладает достаточно бурной характеристикой, как показано на рис. 1.0. Это является результатом сложения диаграммы направленности раструба TQWT и громкоговорителя. При $f_0 \rightarrow 2$ кГц видны последствия резонанса недемпфированной линии (трубы), всплеск в +12 дБ на 180 Гц – до резкого спада в –6 дБ на 520 Гц. Целью данного опытного проекта является показать, как можно управлять некоторыми из этих проблем, и как линеаризовать характеристику d.

Рис. 1.0 Характеристика номинальной

(теоретической) TQWT

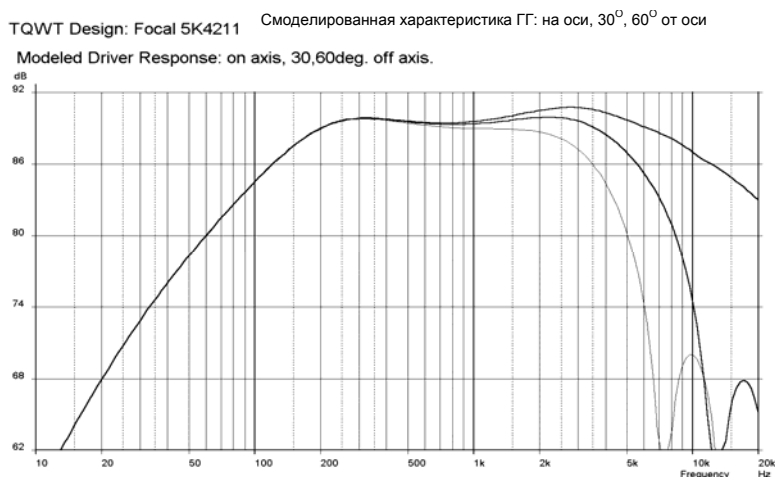
Громкоговоритель для TQWT

Выбор динамической головки был продиктован стремлением получить диапазон отдачи в 100 – 10 кГц на оси головки, и отсутствие каких-либо пиков резонанса конуса, требующих применения кроссовера высокого порядка. Очень широкая полоса частот желательна для перекрытия критичного диапазона человеческого голоса без использования кроссовера. Таким требованиям соответствуют головки Jordan 92, Focal 4V3211 и Focal 5NV4211. Головка Focal 5K 4211 диаметром 5 дюймов была выбрана из-за более высокого уровня звукового давления и применения фазовыравнивающего колпачка. Любой из этих ГГ соответствует указанным требованиям. У Jordan 92 самый низкий уровень звукового давления, но наилучшая звуковая сигнатура, и я бы выбрал ее в первую очередь, однако, моделирование было выполнено на основании головки Focal из-за ее стоимости и доступности. Чувствительность Focal 5K 4211 составляет 89 дБ, и из нее получился бы хороший ГГ для 50-Гц-овой трубы TQWT длиной примерно в 3,4 метра, или в согнутом виде – в 1,7 м. Немного великовато для сред-

© E. Jakulis

Reproduction without written permission is prohibited.

ней комнаты. Если принять предел первичного резонанса в 70 Гц, длину согнутой трубы можно сократить до примерно 2,2 метра, или трубы в свернутом состоянии как 110 см. Характеристика головки 5K 4211 на оси – ровная как стол до 10 кГц, но в 30° от оси затухание падает примерно (до) 6 кГц. Это означает, что конструкция конуса обладает хорошо управляемым пиком резонанса, расширяющим характеристику на оси излучения.

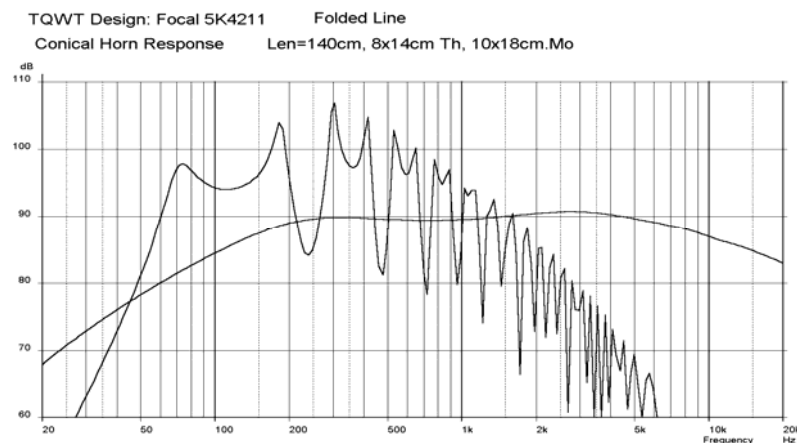


Характеристика ГГ на рис. 1.0 устанавливает необходимый коэффициент усиления, которым труба TQWT должна обладать на частоте f_0 . Смоделированная характеристика ГГ на рис.1.0 предполагает, что схема TQWT для $f_0 \sim 70$ Гц должна обладать коэффициентом усиления примерно в +9 Дб. Фактический подъем в раструбе будет выше, поскольку для характеристики системы суммирование – векторное.

Рис. 1.1 Промоделированная характеристика ГГ

Резонанс некомпенсированной линии

Изогнутая TQWT с ГГ, размещенным на 1/2 длины трубы даст резонанс трубы, примерно эквивалентный 65% линии (трубы). Следовательно,



если мы возьмем $\frac{1}{2}$ длины трубы=110 см, мы сможем смоделировать резонанс трубы $f_0 \sim 70$ Hz.

Моделирование TQWT для горловины 8x14 см и раструба 10x18 см даст в результате:

$f_0 = 68$ Hz, подъем 13.5 dB

P1=182 Hz, подъем 13.4 dB

P2= 302 Hz, подъем 17.4 dB. P3= 182 Hz, подъем 14.9 dB.

Всплеск усиления/полосы частот на P2.

Рис. 1.2 Характеристика резонанса трубы TQWT.

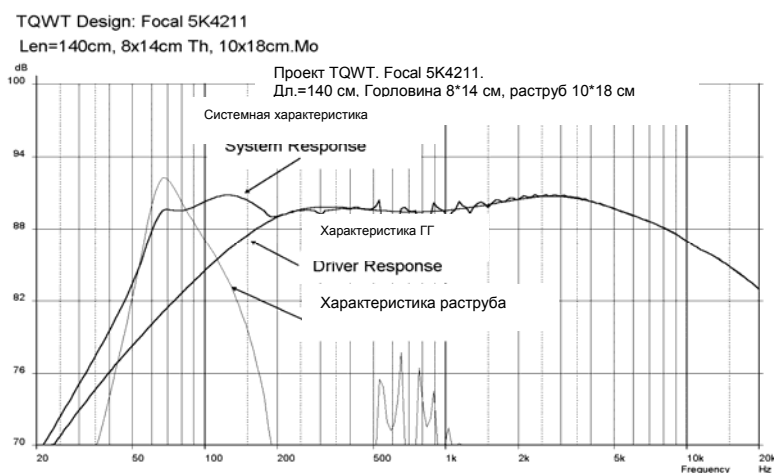


Рис. 1.3 Проектная характеристика TQWT

Смоделированная характеристика TQWT.

Ожидаемая характеристика системы показана на рис. 1.2 в виде наложения характеристик «система-раструб-громкоговоритель». Значительное изменение характеристики системы по сравнению с рис.1.0а вызвано исключительно резонаторами Гельмгольца, ослабление волокнистой массой не применяется.

Обратите внимание, что в характеристике системы заметны гармоники на 500 Гц с уровнем ~ - 12 дБ. Это указывает, что гармоники должны быть подавлены примерно на -20dB.

Reproduction without written permission is prohibited.

Варьирование размеров TQWT.

TQWT является коническим рупором и f_0 для длины линии (трубы) равняется $\frac{1}{2} \lambda$. Модель конического рупора устанавливает размеры горловины и раструба, (соотношение) усиление/полоса частот для трубы. То, что модель математическая, позволяет использовать подход «что, если...» при исследовании изменений характеристики системы, когда мы меняем размеры площади горловины/раструба. Для простейшего случая неизогнутой трубы характеристика приведена на рис. 2.0, результатом являются всплеск f_0 характеристики системы примерно в 0,3 дБ на 66 Гц, и широкий всплеск примерно в 1,2 дБ на 140 Гц.

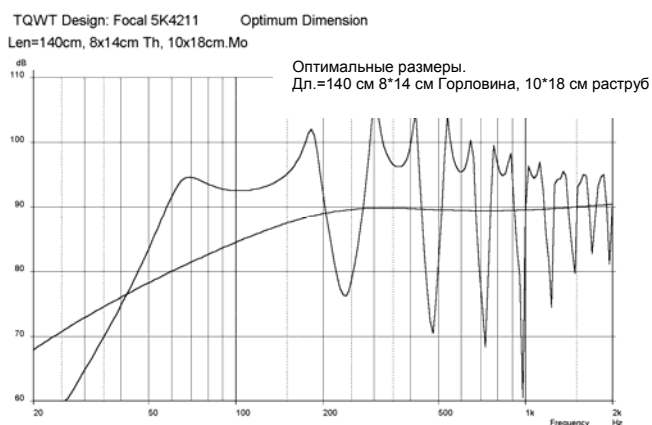


Рис.2.0 Характеристика раструба TQWT.

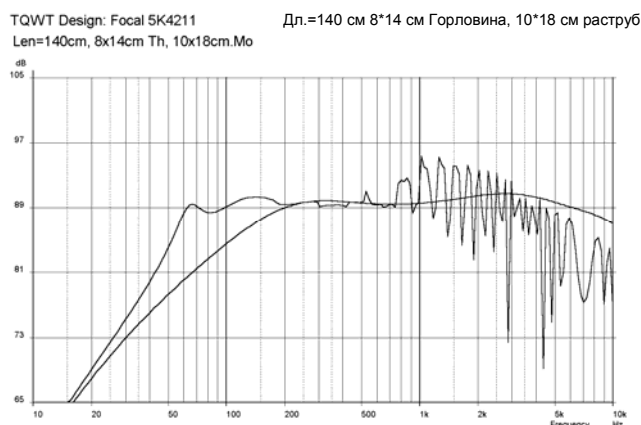
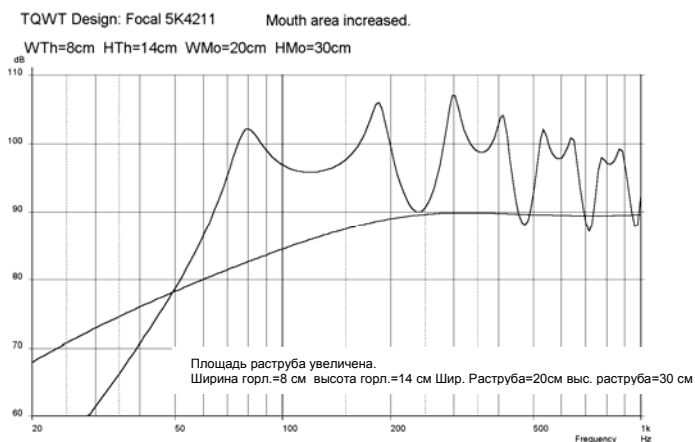


Рис. 2.1 Системная характеристика TQWT.

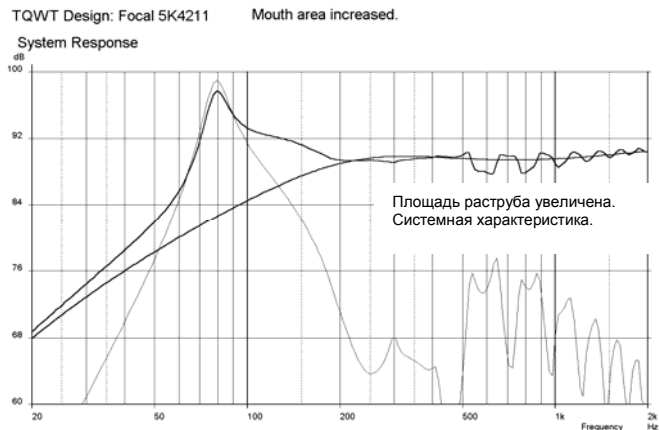
Обратите внимание – для случая на рис.2.1 труба не изогнута, и, следовательно, высокочастотные гармоники сверх 1 кГц не ослаблены. При сравнении с рис. 3.0 получаем хорошую иллюстрацию преимуществ согнутой /сложенной/ линии TQWT.

Рис.2.2 Характеристика раструба TQWT.



Если горловину оставить на том же (уровне), а площадь раструба увеличить, на рис.2.2 показано изменение в усилении/полосе частот с увеличением усиления на частоте f_0 . Результатом этого является всплеск в 9,5 дБ на частоте f_0 на графике характеристики системы.

Рис. 2.3 Системная характеристика TQWT.



© E. Jakulis

Reproduction without written permission is prohibited.

Если площадь раструба оставлена на прежнем значении, а площадь горловины уменьшена. f_0 конической линии (трубы) \rightarrow повышается по частоте, а относительное усиление на f_0 уменьшается. Данный вариант дает слегка уменьшенную f_0 , но и немного больший пик на частоте f_0 , тем не менее, это изменение приемлемо.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area decreased.

WTh=6cm HTh=8cm WMo=10cm HMo=18cm

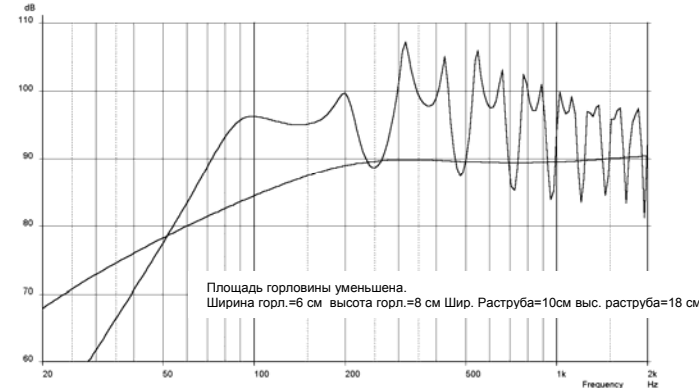
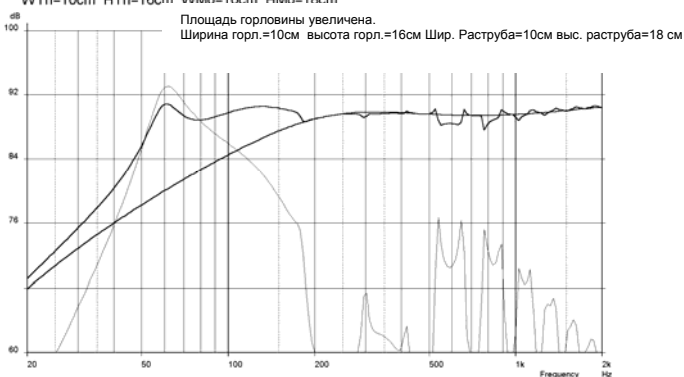


Рис. 2.5 Системная характеристика

Рис.2.4 Характеристика раструба TQWT.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area increased.

WTh=10cm HTh=16cm WMo=10cm HMo=18cm



характеристика TQWT

Если площадь горловины увеличивается, а раструб остается неизменным, конический рупор сокращается и стремится к цилиндрическим размерам трансмиссионной линии. На рис. 2.6 видно, что f_0 раструба смещается вниз, однако, системная характеристика показывает, что результатом фазового изменения в сложении векторов является смещение системного пика примерно на 100 Гц. Все это иллюстрирует влияние фазы на характеристику TQWT.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area increased.

WTh=10cm HTh=16cm WMo=10cm HMo=18cm

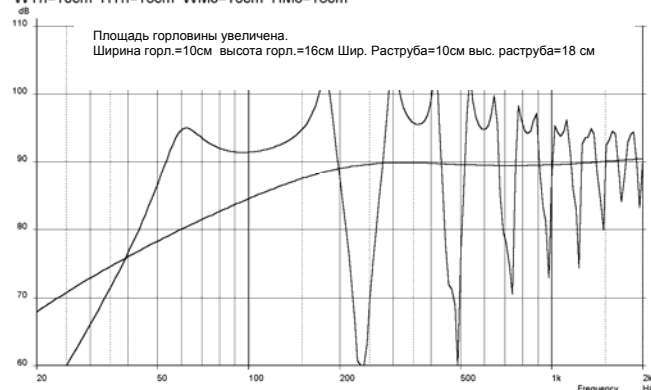


Рис.2.6 Характеристика раструба TQWT.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area decreased.

WTh=5cm HTh=8cm WMo=10cm HMo=18cm

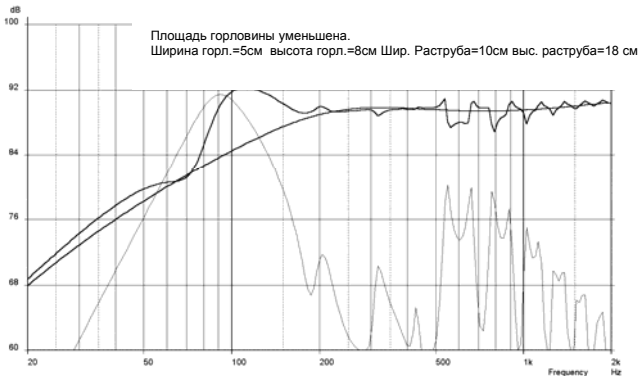
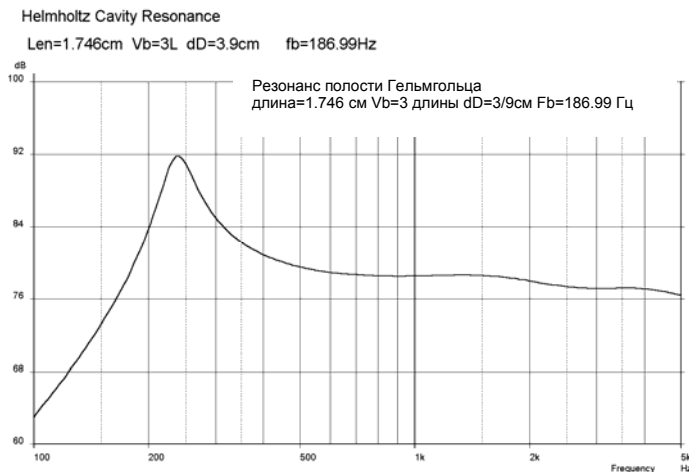


Рис. 2.7 Системная характеристика TQWT.

Обратите внимание, что на системной характеристике имеется пик примерно в +3 дБ в районе 110 Гц, и резкий завал по графику затухания ГГ. Надеюсь, этих примеров достаточно для того, чтобы показать, что площади горловины/раструба и длина линии TQWT должны быть согласованы с графиком затухания ГГ. Это процесс расчета математической модели и <он> не может быть выполнен эмпирически по несколькими измеренным точкам. Характеристика TQWT в большой степени зависит от характеристики «усиление/частотный диапазон», как определяется геометрией линии.

Характеристика резонаторов Гельмгольца

В данном разделе рассматриваются влияния резонаторов Гельмгольца на характеристику TQWT «раструб – система». Расчет резонатора Гельмгольца представляет собой отдельную тему, поэтому приводятся только необходимые размеры.

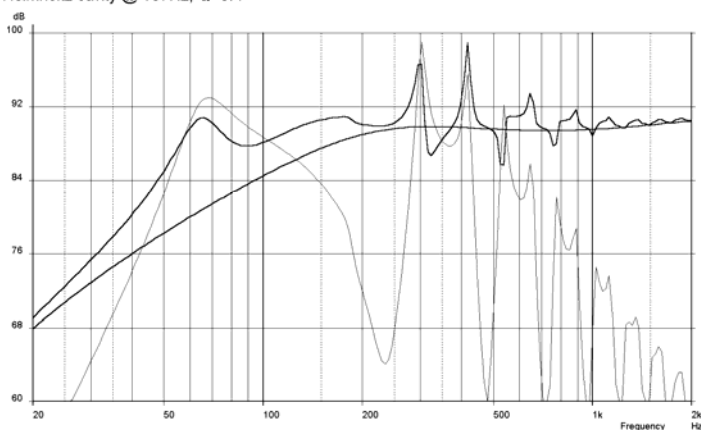


Характеристика резонатора Гельмгольца может быть смоделирована как <для> резонансной полости. Поглотитель, применяемый в TQWT будет обладать такими же характеристиками, но будет действовать, как узкополосный режекторный фильтр. Резонансная полость используется для определения физических размеров и характеристика (отклика) усиления/полосы частот.

Рис. 5.0. Характеристика резонатора Гельмгольца по полосе частот.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area optimized

Helmholtz cavity @ 187Hz, Q=0.4



1-ый резонатор Гельмгольца.

Длина=1.746 см Vb=3 длины dD=3.9 см
fb=186.99 Гц

По сравнению с рис. 1.0 резонанс на пике P1 устранен, а пик на f_0 немного ослаблен (притушен). Обратите внимание, что характеристика раструба, серая линия, предполагает, что форма полосы частот имеет центр на f_0 .

Рис. 5.1 Характеристика 1-го резонатора Гельмгольца.

Не следует забывать, что системная характеристика является результатом <взаимодействия> амплитуды и изменения фазы. Следовательно, несомненное изменение характеристики раструба TQWT не обязательно представляет собой отражение уровней в системной характеристике.

© E. Jakulis

Reproduction without written permission is prohibited.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area optimized
Helmholtz cavity @ 187Hz, $Q=0.4$, @ 300Hz, $Q=0.7$,

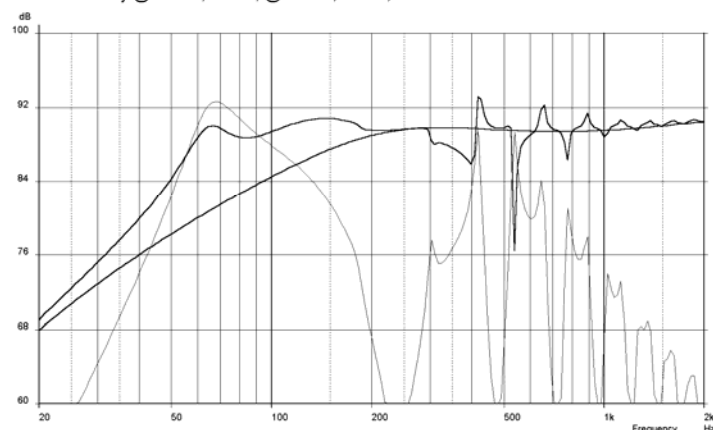


Fig. 5.2 Характеристика 2-го резонатора Гельмгольца.

2-ой резонатор Гельмгольца

Длина=2.309 cm $V_b=1L$ $dD=3.9$ cm $f_b=300$ Hz

2-ой резонатор Гельмгольца ослабляет пик P2, а также сокращает пик на f_0 . Однако, получающееся фазовое изменение приводит к широкому провалу на 300 Гц и усугубляет (акцентирует) выброс на 520 Гц.

3-ий резонатор Гельмгольца.

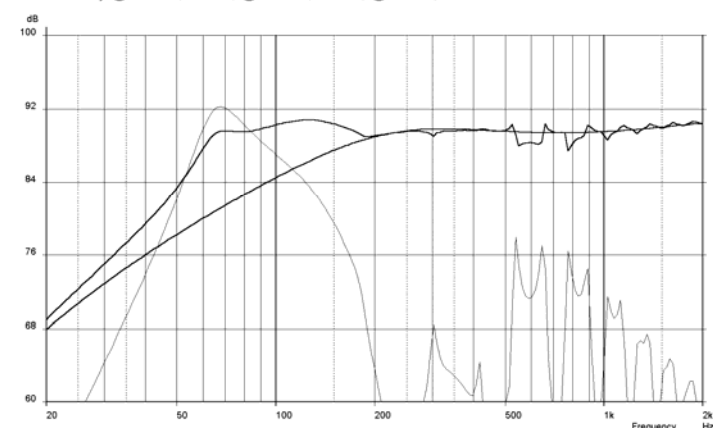
$F_b=420$ Hz

Длина=2.389 cm $V_b=500$ cm³ $dD=3.9$ cm

3-ий резонатор Гельмгольца эффективно линеаризовал характеристику TQWT. После 500 Гц наблюдается остаточные эффекты гармоник, имеющих уровень только -14 дБ от характеристики ГГ. Более предпочтительным был бы уровень минимум -20 дБ.

Рис. 5.3 3-ий резонатор Гельмгольца.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area optimized
Helmholtz cavity @ 187Hz, $Q=0.4$, @ 300Hz, $Q=0.7$, @ 420Hz, $Q=0.3$



TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area optimized
Helmholtz cavity @ 187Hz, $Q=0.4$, @ 300Hz, $Q=0.7$, @ 420Hz, $Q=0.3$, @ 648Hz, $Q=0.8$

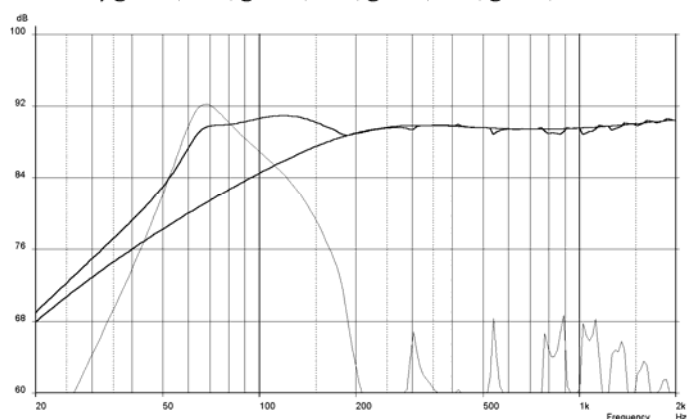


Рис. 5.4 4-ый резонатор Гельмгольца.

4-ый резонатор Гельмгольца.

Дополнительный поглотитель, настроенный примерно на 680 Гц и с низким Q , может быть использован для снижения оставшихся гармоник.

Параметры (замеренные) системной характеристики TQWT.

Графики являются сравнением характеристики TQWT, особенно по шкале времени, с характеристикой серьезно демпфированного закрытого ящика, в котором применен такой же ГГ. Это должно дать сравнение переходной характеристики.

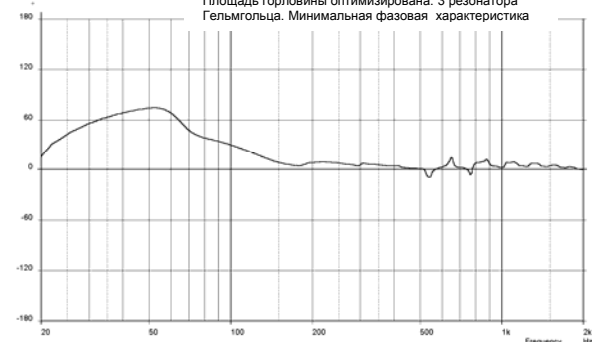
Минимальная фаза

Крутизна фазы хорошо контролируется (управляется), и незначительно отличается от значений для закрытого ящика с параметрами $V_b=100L$, результатом чего серьезно демпфированная система с $Q_{tc}=0.5$.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area optimized, 3 Helmholtz cavities.

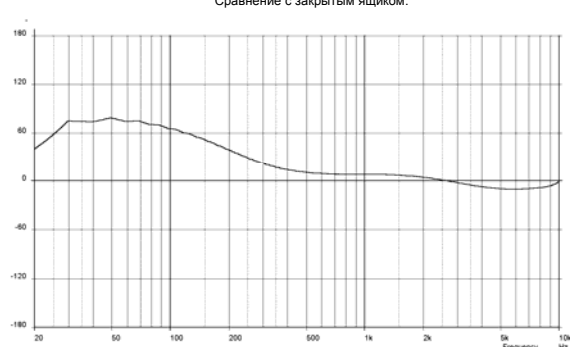
Minimum Phase Response

Площадь горловины оптимизирована. 3 резонатора Гельмгольца. Минимальная фазовая характеристика



Closed Box Comparison

Сравнение с закрытым ящиком.



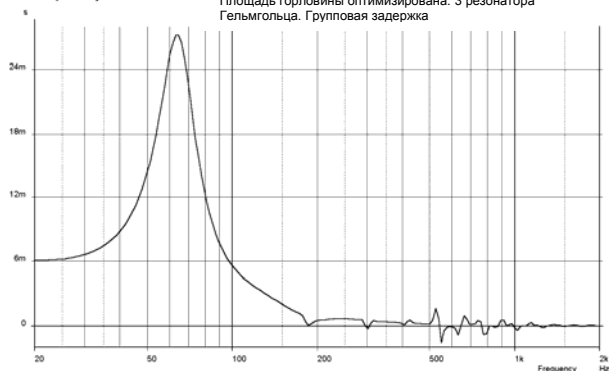
Групповая задержка

Групповая задержка для TQWT значительно больше, последствия резонанса линии (трубы) очевидны даже с демпфированием Гельмгольца.

TQWT Design: Focal 5K4211 Throat area optimized, 3 Helmholtz cavities.

Group Delay

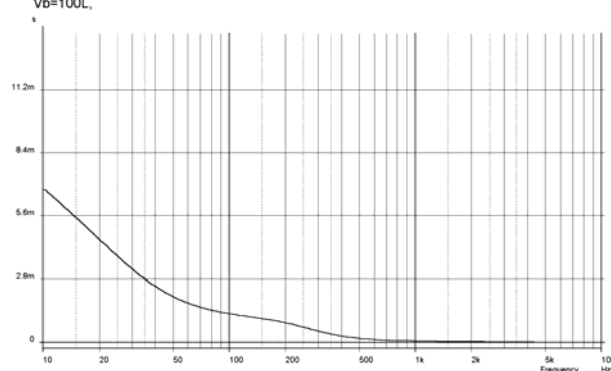
Площадь горловины оптимизирована. 3 резонатора Гельмгольца. Групповая задержка



Closed Box Comparison

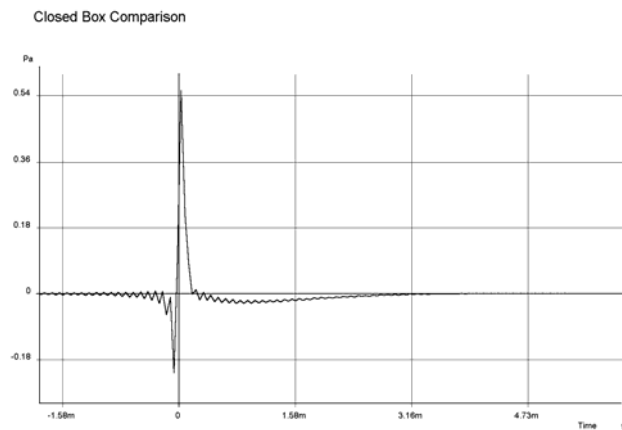
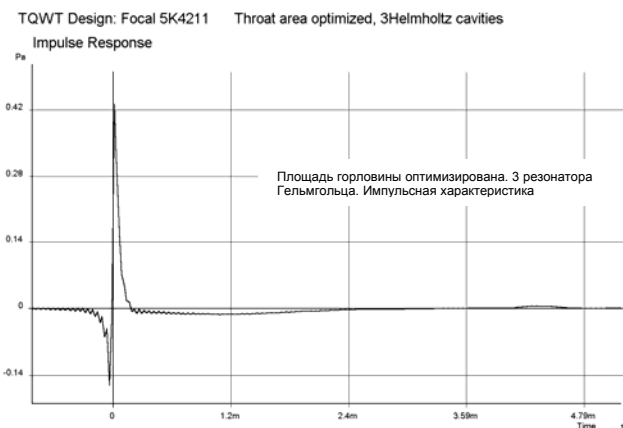
Сравнение с закрытым ящиком.

$V_b=100L$



Импульсная характеристика.

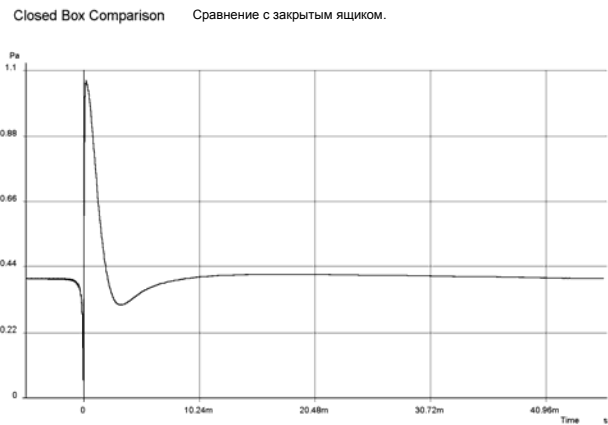
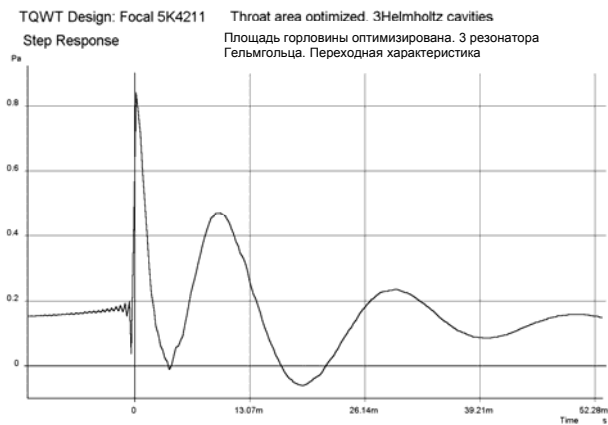
Данный график демонстрирует выдающуюся импульсную характеристику, практически не имеющую «затягивания» (негативной амплитуды). Практически полное совпадение с графиком серьезно демпфированного закрытого ящика.



Сравнение с закрытым ящиком.

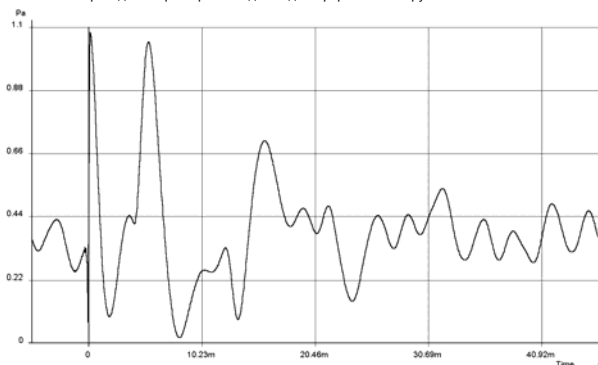
Переходная характеристика (реакция на скачок).

Переходная характеристика (реакция на единичный скачок) для TQWT демонстрирует длительную реверберацию на заднем фронте импульса. Это говорит о том, что резонаторы Гельмгольца запасают энергию на значительный период затухания волны. Ничего даром не дается.

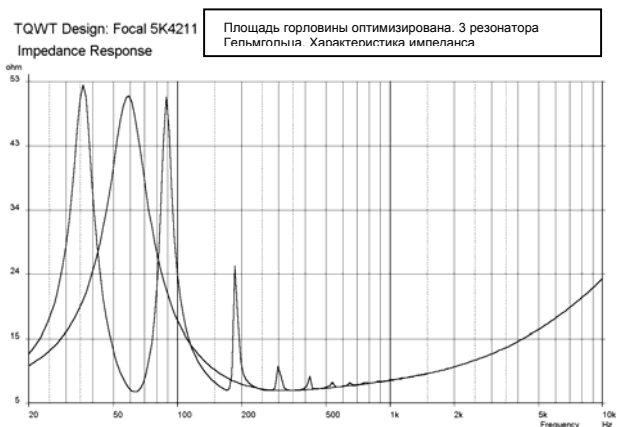


TQWT Step Response for undamped line.

Переходная характеристика для недемпфированной трубы TQWT



Интересное сравнение с характеристикой не демпфированной TQWT (без резонаторов Гельмгольца). Это означает, что первый пик ослаблен, но расширен и сдвинут по времени. Вопрос в том, какова будет характеристика, если первый пик P1 будет ослаблен в большей степени с помощью резонатора с более высоким Q или двойного резонатора, настроенного на ту же самую частоту P1.

Полное сопротивление.

При наложении на график импеданса системы выявляются некоторые интересные свойства:

1. Пик импеданса ГГ смещается с ~ 60 Гц на ~ 36 Гц.
2. Пик импеданса TQWT - ~ 90 Гц, тогда, как системная $f_0 \sim 60$ Hz. Следовательно, пик импеданса не является точным индикатором f_0 системы.
3. Интересный вопрос – что сделает Zobel с импедансом системы, а также с характеристикой.

Применение Zobel (компенсирующей RC цепи параллельно с ГГ) приведет к серьезным осложнениям, т.е. влияние на фазу TQWT, и, следовательно, сложение векторов. Из-за этого придется полностью пересмотреть проектирование «усиление/полосы частот» трубы. Так что советуем не использовать Zobel.

Подробности конструкции

Поскольку настоящий опыт проектирования был в первую очередь задуман, как иллюстрация последовательности этапов, направленных на получение приемлемой характеристики TQWT, читателю самому предоставляется возможность разработать габаритные размеры АС. Обратите внимание, что размеры резонаторов Гельмгольца определены на рис. 5.1 ... 5.4.

