

Вопросы нелинейной акустики в проектировании громкоговорителей

М. С. Шушнов, Т. В. Шушнова, А. М. Оноприенко, Н. О. Абросимова

Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы нелинейной акустики. Составлена математическая модель нелинейных искажений акустического тракта применительно к работе громкоговорителя в поршневом режиме. Приведены и проанализированы результаты экспериментальных измерений. Даны рекомендации по снижению искажений в конструкциях высококачественных акустических систем.

Ключевые слова: звук, искажения, нелинейность, громкоговоритель, динамическая головка, эффект Доплера, мониторинг акустика, психоакустика.

Для цитирования: Шушнов М. С., Шушнова Т. В., Оноприенко А. М., Абросимова Н. О. Вопросы нелинейной акустики в проектировании громкоговорителей // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 1. С. 78–90. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-1-78-90>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Шушнов М. С., Шушнова Т. В.,
Оноприенко А. М., Абросимова Н. О., 2024

Статья поступила в редакцию 10.09.2023;
принята к публикации 01.10.2023.

1. Введение

Для звукооператора, саундпродюсера при выполнении трудовых функций необходимо слышать неискаженную звуковую картину, с хорошо заметными недостатками фонограммы, а для систем массмедиа, к которым относятся телерадиовещание, концертная деятельность в учреждениях культуры и др., важнее передать звуковую информацию прежде всего в красивой, приятной на слух форме, чем достоверно. Несмотря на кажущееся различие в задачах звуковых решений, важно соотносить субъективные критерии оценки качества звуковоспроизведения, основанные на психоакустике, с электроакустическими свойствами громкоговорителей.

В подавляющем большинстве работ по акустике, в частности по громкоговорителям, считается, что акустическое давление и скорости частиц достаточно малы, чтобы можно было считать процессы излучения и распространения звуковых волн линейными. Если система или процесс линейны, то существует несколько правил, определяющих, что происходит с сигналами, когда они проходят через систему или процесс. Эти правила включают в себя принцип суперпозиции, который гласит, что реакция на сигнал $A+B$ равна реакции на сигнал A + реакция на сигнал B . Большинство инструментов и методов анализа, таких как анализ Фурье и функций частотной и фазовой характеристик, полностью полагаются на принцип суперпозиции и, следовательно, на линейность системы.

Когда система или процесс нелинейны, принцип суперпозиции больше не применим, и нельзя использовать обычные методы анализа. Рассмотрим причины и условия, при которых акустическое излучение и распространение могут стать нелинейными, а также некоторые

примеры степени нелинейного акустического поведения, встречающегося в громкоговорителях.

2. Нелинейная акустика

2.1. Нелинейное распространение звуковых волн

Скорость звука в воздухе зависит от термодинамических свойств воздуха. Акустическая волна состоит из чередующихся положительных и отрицательных давлений выше и ниже статического давления, и, поскольку это изоэнтропический процесс, соотношение между мгновенным давлением и плотностью становится все более нелинейным по мере увеличения уровня звукового давления (SPL). В линейной акустической теории связь между давлением и плотностью считается линейной, что справедливо, если изменения давления малы по сравнению со статическим давлением. Линейная зависимость между давлением и плотностью означает, что ни температура, ни скорость звука не меняются.

Звуковые колебания в воздухе приводят к его сжатию и разрежению. В областях сжатия давление воздуха возрастает, а в областях разрежения – понижается. Когда изменения давления значительны по сравнению со статическим давлением, нельзя игнорировать изменения мгновенной температуры и, следовательно, скорости звука. Кроме этого, когда акустическая волна существует в воздушном потоке, скорость распространения волны увеличивается в направлении потока и уменьшается в направлении против потока; создается эффект «конвекции» акустической волны вместе с потоком. Хотя постоянный поток воздуха обычно не встречается там, где работают громкоговорители, скорость частиц, связанную с распространением акустических волн, можно рассматривать как переменный нестационарный поток. Опять же, если скорости частиц малы по сравнению со скоростью звука, эффектом можно пренебречь, но в ситуациях, когда скорости частиц значительны по сравнению со скоростью звука, зависимость скорости распространения от скорости частицы должна быть принята во внимание. Результатом этого является то, что скорость распространения акустической волны увеличивается при увеличении давления и скорости частиц и уменьшается при уменьшении давления и скорости частиц.

Для плоской бегущей волны положительные давления сопровождаются положительными скоростями частиц, поэтому скорость распространения в положительном полупериоде акустической волны больше, чем в отрицательном. Затем положительный полупериод распространяется быстрее, чем отрицательный, и форма сигнала искажается по мере его распространения [1, 2].

Нелинейная трансформация акустической волны приводит к искажению формы волны, а первоначально синусоидальный профиль на некотором расстоянии становится близким к пилообразному. Искажение формы акустической волны приводит к появлению в ее спектре новых гармонических составляющих, то есть имеют место нелинейные искажения. Если в пространстве перекрываются две интенсивные волны, происходит их нелинейное взаимодействие, в частности, низкочастотная акустическая волна может модулировать высокочастотную.

2.2. Поршневой режим низкочастотных громкоговорителей

При уровнях звука, обычно возникающих при работе громкоговорителей, влияние давления и скорости частиц на мгновенную скорость звука настолько мало, что им можно пренебречь, и результирующее линейное приближение является достаточно точным. Однако бывают ситуации, когда это не так. Двумя распространенными примерами являются высокое звуковое давление в горловине рупорных громкоговорителей и высокие скорости диффузора низкочастотных динамиков с длинным ходом.

Использование небольших низкочастотных динамиков с длинным ходом диффузора в компактных мощных громкоговорителях также может привести к нелинейным искажениям. Выходная мощность диффузора громкоговорителя пропорциональна квадрату объемной скорости диффузора, поэтому для данной выходной звуковой мощности требуемая скорость диффузора пропорциональна обратной площади диффузора. Рассмотрим два громкоговорителя: один с диаметром диффузора 160 мм, другой – 25 мм. Чтобы излучать такое же количество акустической мощности на низких частотах, динамику меньшего размера требуется скорость, в 40 раз превышающая скорость большого динамика, поскольку он занимает 1/40 площади. Среднеквадратичная скорость большого динамика при излучении уровня звукового давления 104 дБ на расстоянии 1 м при частоте 100 Гц составляет примерно 1 м/с, в то время как этот же уровень звукового давления от меньшего динамика требует около 37 м/с. Величину 1 м/с можно считать незначительной по сравнению со скоростью звука (средней величиной прямо считать 340 м/с), а 37 м/с представляет собой вариацию скорости звука уже около 11 % [3], что должно быть принято во внимание.

2.3. Модель доплеровских искажений в электроакустической системе

Вторичным эффектом, являющимся прямым следствием значительных по сравнению со скоростью звука вариаций скоростей частиц, является так называемое доплеровское искажение. Если одновременно с излучением сигнала частотой 60 Гц небольшой динамик также излучал сигнал с частотой 1 кГц, циклическое приближение и опускание диффузора из-за низкочастотного сигнала при линейном ходе диффузора X_{LIN} , равном ± 6 мм, будет частотно модулировать (ЧМ) излучение более высокочастотного сигнала примерно на 35 Гц. С ростом излучаемой вторым громкоговорителем частоты этот эффект станет еще заметнее, и на частоте 3400 кГц составит уже около 410 Гц.

Для подтверждения теоретических утверждений приведем результаты моделирования смещения диффузора (CD – Cone Displacement) для трех динамических головок (ДГ) разных моделей в акустическом оформлении типа «закрытый ящик» (ЗЯ) (рис. 1) и фазоинверторного типа (ФИ) (рис. 2).

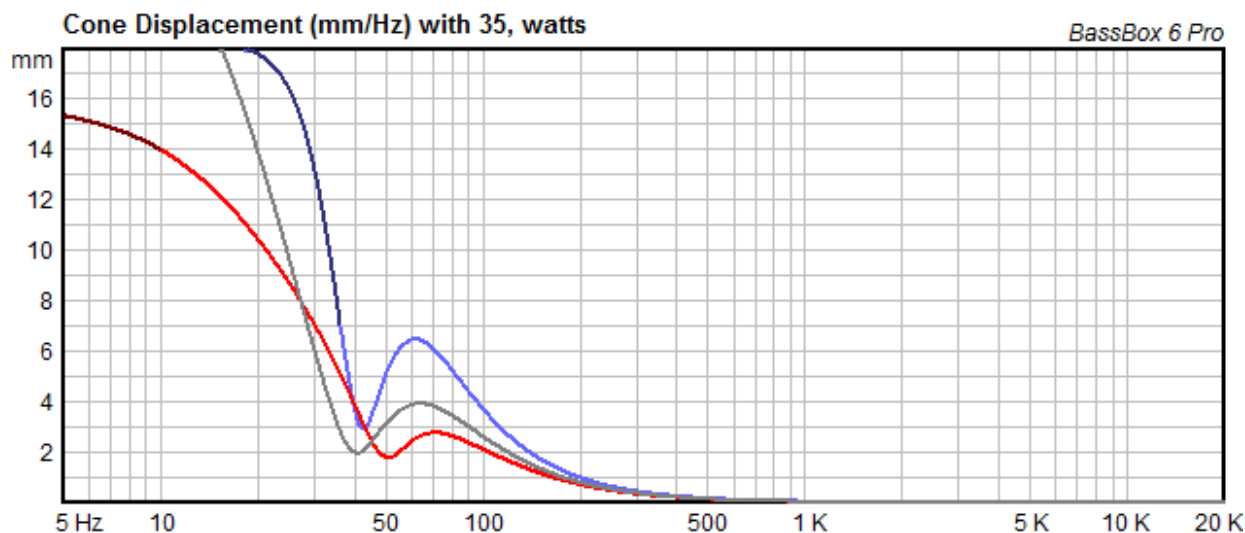


Рис. 1. Смещение диффузора ДГ для акустического оформления ЗЯ

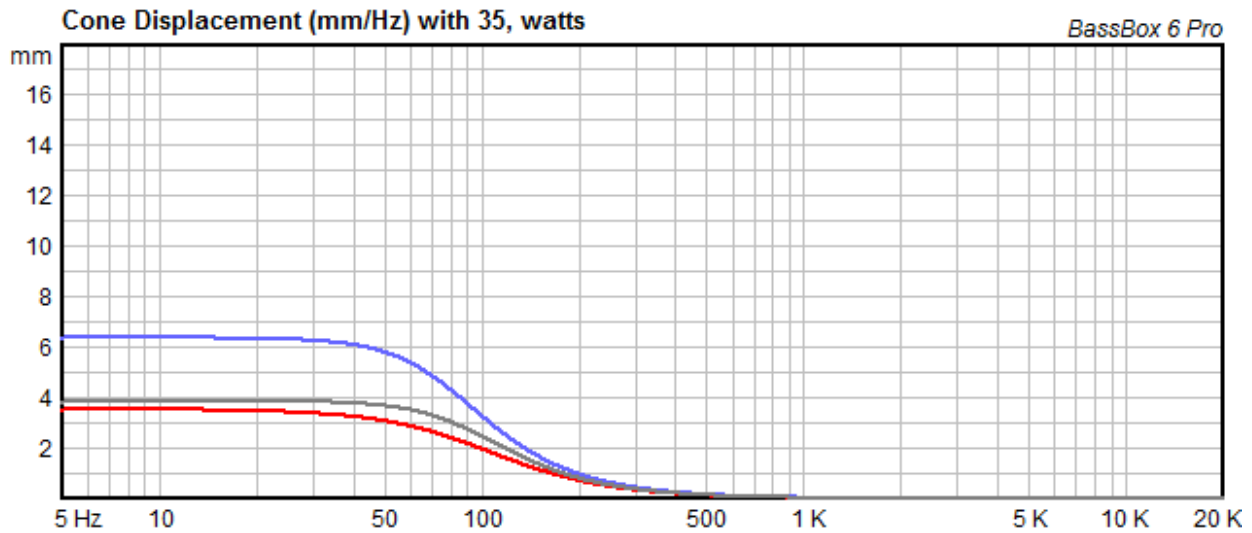


Рис. 2. Смещение диффузора ДГ для акустического оформления ФИ

Математически во временной области упрощенно можно описать процесс доплеровских искажений в следующем виде:

$$y(t) \sim x(t) + \sum_{i=0}^{\infty} K_D(f, X)(x(t))^i, \quad (1)$$

где $y(t)$ – акустическая волна, создаваемая громкоговорителем; $x(t)$ – смещение диффузора громкоговорителя; K_D – двумерная функция связи влияния доплеровского эффекта на акустическую волну, определяемая частотой колебаний волны f и амплитудой волны X .

Следует заметить, что выражение (1) носит теоретический характер и учитывает влияние нелинейностей всех порядков, при этом нелинейностями высоких порядков можно пренебречь ввиду незначительности их влияния.

Результат действия доплеровских искажений при работе громкоговорителя с двухтоновым сигналом с амплитудами U_{f1} и U_{f2} в пересчете на электрический тракт и при условии, что частоты сигналов соотносятся как $f_2 > f_1$, можно записать по аналогии с [4] в виде:

$$\begin{aligned} u(t) &= u_{f2}(t) \cos\left(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau\right) = u_{f2}(t) \cos\left(2\pi \int_0^t [f_2 + f_{\Delta} u_{f1}(\tau)] d\tau\right) = \\ &= u_{f2}(t) \cos\left(2\pi f_2 t + 2\pi f_{\Delta} \int_0^t \Delta u_{f1}(\tau) d\tau\right). \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) $f_{\Delta} = K_D U_{f1}$, $f(\tau)$ – мгновенная частота, а f_{Δ} – наибольшее возможное смещение частоты f_2 в предположении, что u_{f1} принимает значения в интервале $[-1, +1]$ при симметричном линейном ходе диффузора ДГ X_{LIN} , что справедливо для большинства ДГ.

При приближении к границам хода диффузора ДГ X_{MAX} интервал u_{f1} может оказаться несимметричным относительно нуля, однако в этом режиме ДГ не может эксплуатироваться из-за риска разрушения подвижной системы ДГ, поэтому (2) справедливо для случаев безопасной эксплуатации ДГ.

Для нахождения спектра акустического сигнала с доплеровскими искажениями запишем его математическую модель (2) в более простом виде [5]:

$$u(t) = u_{f_2}(t) \cos(2\pi f_2 t - M_D \cos(2\pi f_1 t) + \varphi), \quad (3)$$

где $M_D = \left\lceil \frac{\Delta f_2}{f_1} \right\rceil$ – индекс доплеровской модуляции, а $\Delta f_2 \approx f_\Delta$ – максимальное изменение частоты f_2 . Для рассмотренного выше примера для соотношения частот $f_2 / f_1 > 10$ имеет место $M_D > 1$, то есть широкополосная частотная модуляция.

Для подтверждения обоснованности утверждения в табл. 1 приведены результаты расчета доплеровского смещения и индекса частотной модуляции.

Таблица 1. Результаты расчета доплеровского смещения частоты f_2 второго сигнала при воздействии первого сигнала с частотой f_1 , равной 60 Гц, при линейном ходе X_{LIN} , равном ± 6 мм

f_2 , Гц	λ_2 , м	λ_2^+ , м	λ_2^- , м	f_2^+ , Гц	f_2^- , Гц	f_Δ , Гц	M_D
100	3.400	3.406	3.394	99.82	100.18	0.35	0.00
250	1.360	1.366	1.354	248.90	251.11	2.21	0.02
400	0.850	0.856	0.844	397.20	402.84	5.65	0.05
600	0.567	0.573	0.561	593.71	606.42	12.71	0.11
1000	0.340	0.346	0.334	982.66	1017.96	35.31	0.29
2000	0.170	0.176	0.164	1931.82	2073.17	141.35	1.18
3400	0.100	0.106	0.094	3207.55	3617.02	409.47	3.41
5000	0.068	0.074	0.062	4594.59	5483.87	889.28	7.41
6400	0.053	0.059	0.047	5750.53	7214.85	1464.33	12.20
8000	0.043	0.049	0.037	7010.31	9315.07	2304.76	19.21

Хотя большая часть передаваемой энергии приходится на отрезок частот $[f_2 - f_\Delta, f_2 + f_\Delta]$, используя анализ Фурье, можно показать, что спектр ЧМ-сигнала в действительности неограничен, но амплитуда его компонент с большим отклонением частоты уменьшается, и этими компонентами обычно пренебрегают [3].

В общем виде частотный спектр (3) будет определяться функциями Бесселя, а его ширина будет тем больше, чем выше M_D . Запишем спектр (3) через гармонические составляющие:

$$u(t) = u_{f_2}(t) J_0(M_D) \cos(2\pi f_2 t + \varphi_0) + \sum_{i=1}^{\infty} u_{f_2}(t) J_i(M_D) \cos(2\pi(f_2 - if_1)t + \varphi_i), \quad (4)$$

где $J(M_D)$ – коэффициенты пропорциональности, зависящие от индекса доплеровской модуляции, определяемые по функциям Бесселя.

2.4. Имитационное моделирование доплеровских искажений

Выполним моделирование доплеровских искажений и оценим практические ширины спектров продуктов модуляции. Используем методы натурного и имитационного компьютерного моделирования по (4) для двухчастотного воздействия.

Для имитационного компьютерного моделирования использовалась программная среда Micro-CAP 12. Результаты моделирования спектра искажений в окрестности f_2 показаны на рис. 3–5.

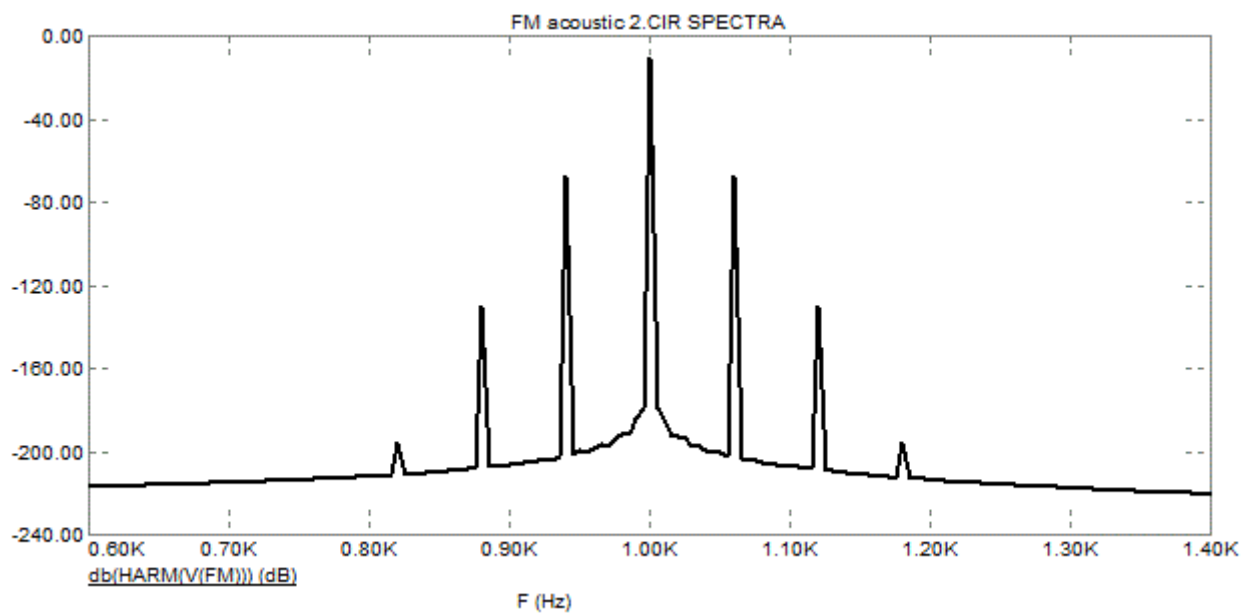


Рис. 3. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 1000 Гц при $M_D = 0.29$

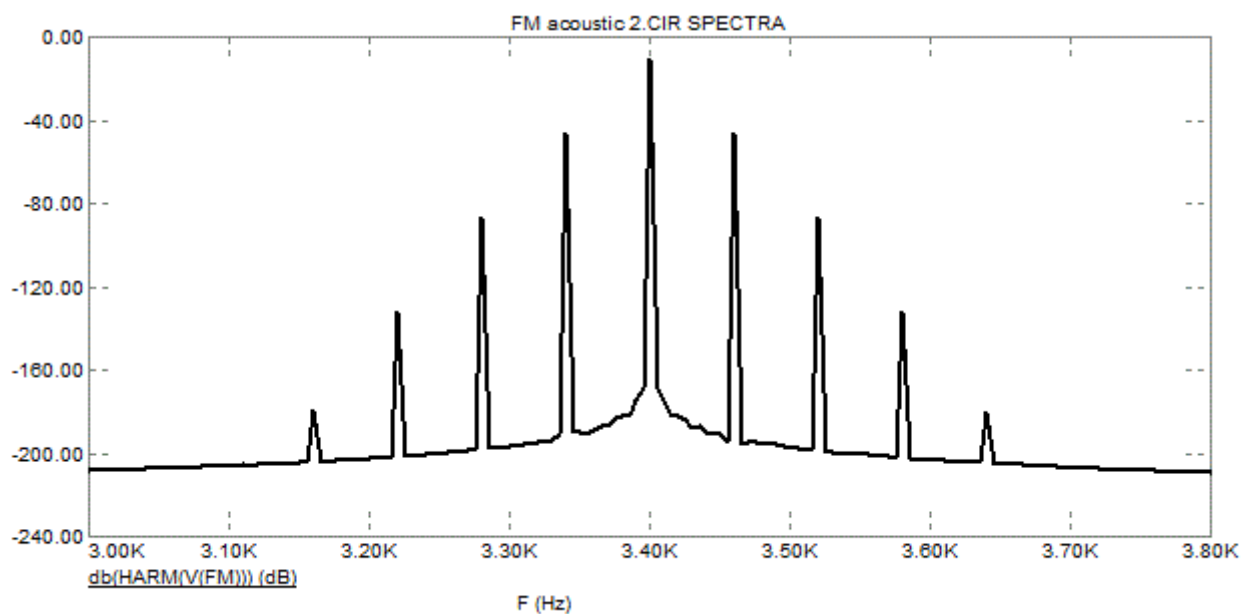


Рис. 4. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 3400 Гц при $M_D = 3.41$

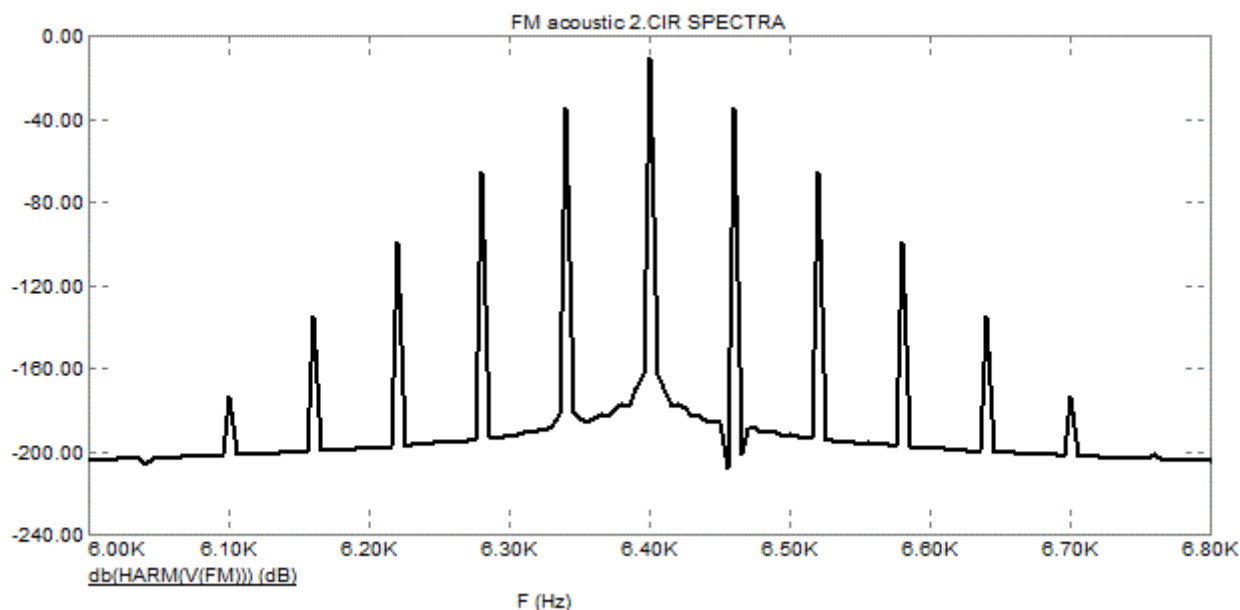


Рис. 5. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 6400 Гц при $M_D = 12.2$

Из рис. 3–5 видно расширение спектра из-за роста M_D вследствие повышения f_2 . Результаты моделирования на рис. 3–5 показывают хорошее соответствие с табл. 1.

2.5. Натурное моделирование доплеровских искажений

Выполним натурное моделирование доплеровских искажений и оценим практические ширины спектров продуктов модуляции. Используем метод натурального моделирования по (4) для двухчастотного воздействия.

Натурное моделирование осуществлялось по схеме на рис. 6. Использовался набор тестовых сигналов чистого тона с частотой f_1 , равной 16 Гц и 60 Гц, и частотой f_2 , равной 1000 Гц, 3400 Гц и 6400 Гц. Сигналы синтезированы и воспроизведены программным обеспечением (ПОС) Audacity 2.0.6 через встроенный плагин «Создание – Волна». Для ввода-вывода аудиосигнала использовался цифровой звуковой интерфейс (ЦЗИ) E-MU 1920m в режиме разрядности 24 бита и частотой дискретизации 44.1 кГц. Для усиления аудиосигнала по мощности применялся усилитель мощности звуковой частоты (УМЗЧ) с выходной мощностью 75 Вт на нагрузку 4 Ом. Снятие акустического сигнала осуществлялось при помощи измерительного микрофона-пушки (ИМ) Behringer ECM8000. Все соединительные линии были симметричными (балансное подключение). Для спектрального анализа записанного аудиосигнала использовалось бесплатное программное обеспечение (ПОА) RMAA v.5.5. В ходе натурального моделирования были получены результаты – спектры в окрестности частоты, приведенные на рис. 7–11.

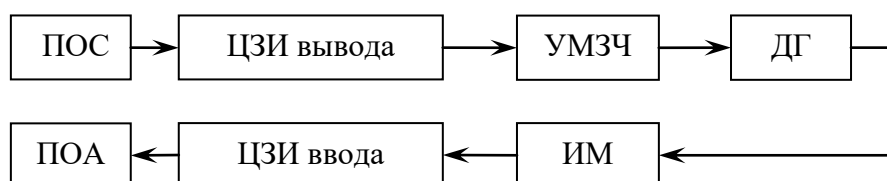


Рис. 6. Схема установки натурального моделирования

На рис. 7 показан спектр акустического сигнала при $f_1 = 60$ Гц и $f_2 = 1000$ Гц с соотношением амплитуд 2:1. Из рис. 7 видно, что спектр ЧМ узкий и подобен спектру продуктов интермодуляционных искажений низкого, преимущественно до 4-го, порядка.

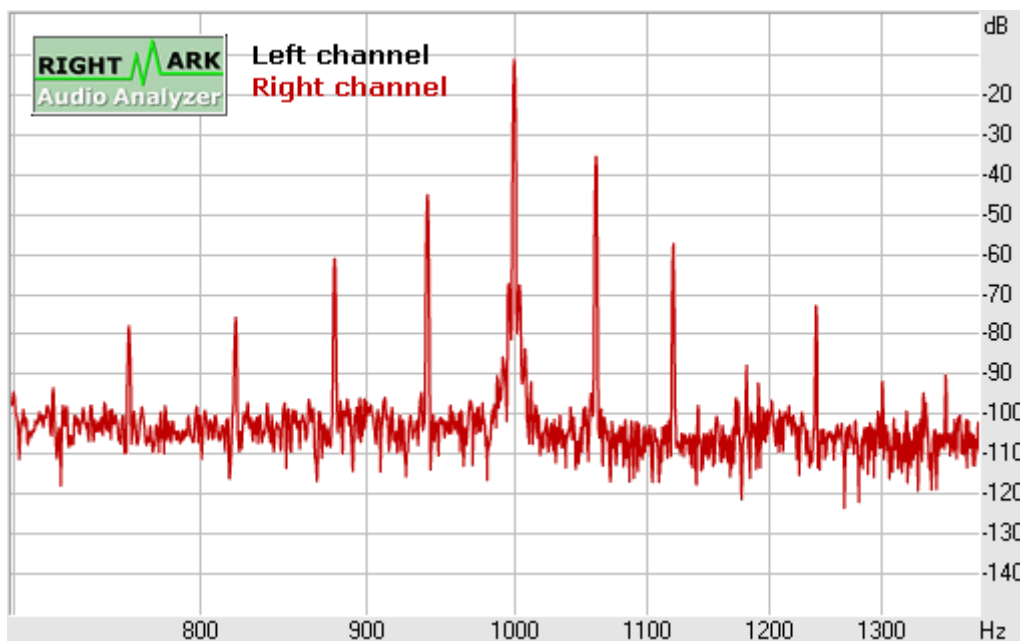


Рис. 7. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 1000 Гц с соотношением амплитуд 2:1

На рис. 8 показан спектр акустического сигнала при $f_1 = 60$ Гц и $f_2 = 3400$ Гц с соотношением амплитуд 2:1. Из рис. 8 видно, что спектр ЧМ стал шире с ростом частоты второго сигнала, присутствуют продукты интермодуляционных искажений низкого и высокого, преимущественно до 6-го, порядков.

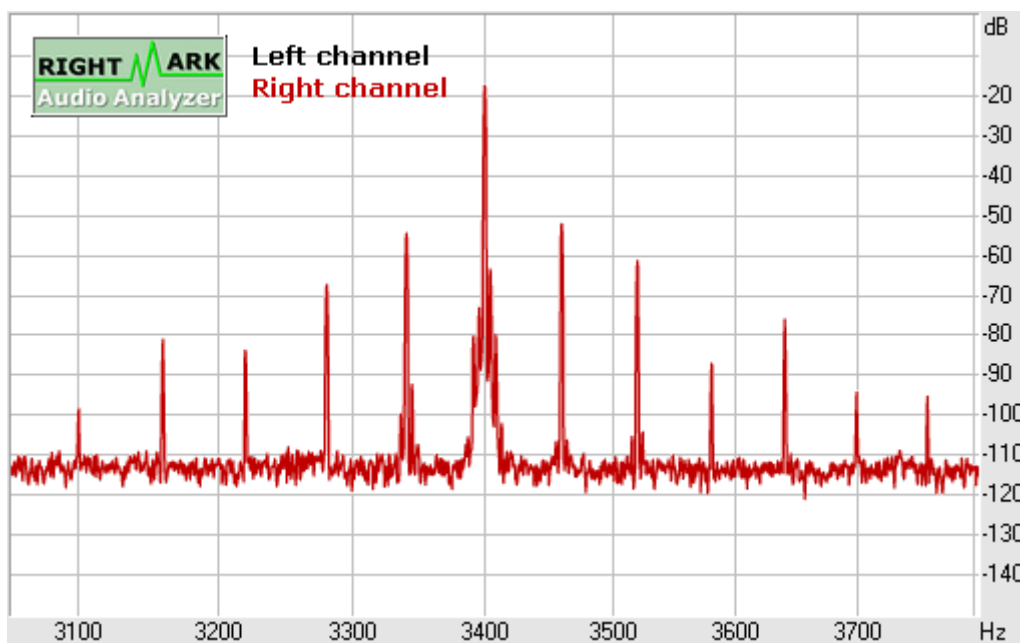


Рис. 8. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 3400 Гц с соотношением амплитуд 2:1

На рис. 9 показан спектр при $f_1 = 60$ Гц и $f_2 = 6400$ Гц с соотношением амплитуд 2:1. Из рис. 9 видно, что спектр ЧМ стал шире с ростом частоты второго сигнала, присутствуют продукты интермодуляционных искажений низкого и высокого порядков с высоким уровнем.

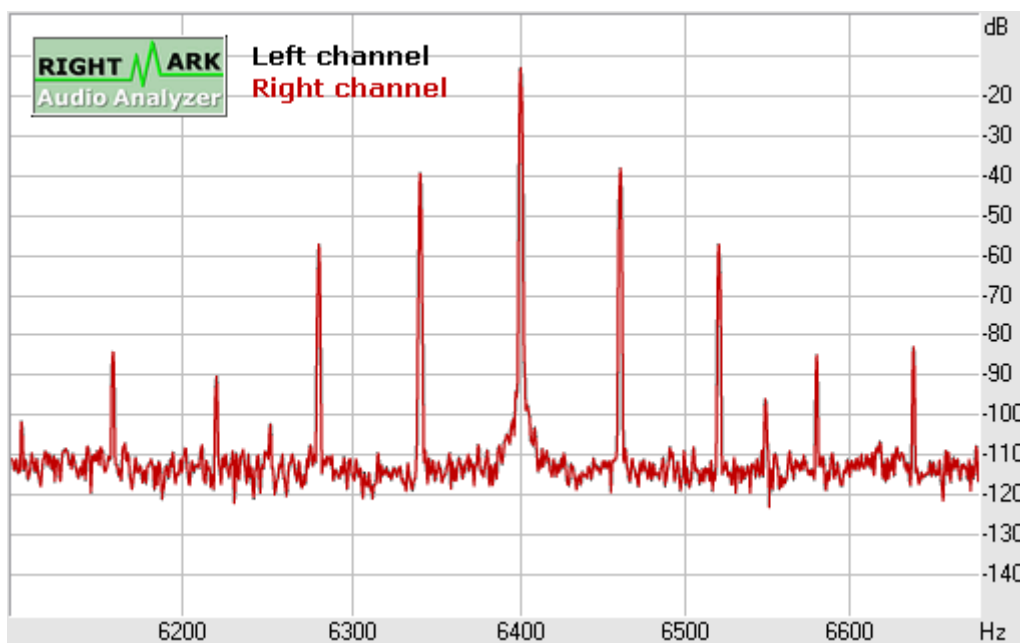


Рис. 9. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 6400 Гц с соотношением амплитуд 2:1

На рис. 10 показан спектр при $f_1 = 16$ Гц и $f_2 = 6400$ Гц с соотношением амплитуд 2:1. Из рис. 10 видно, что спектр ЧМ стал шире с понижением частоты первого сигнала, присутствуют продукты интермодуляционных искажений низкого и высокого, преимущественно до 8-го, порядков с очень высоким уровнем. Следует заметить, что частота 16 Гц не ощущается слушателем, но, несмотря на это, доплеровские искажения из-за ее воздействия имеются, причём значительные по величине.

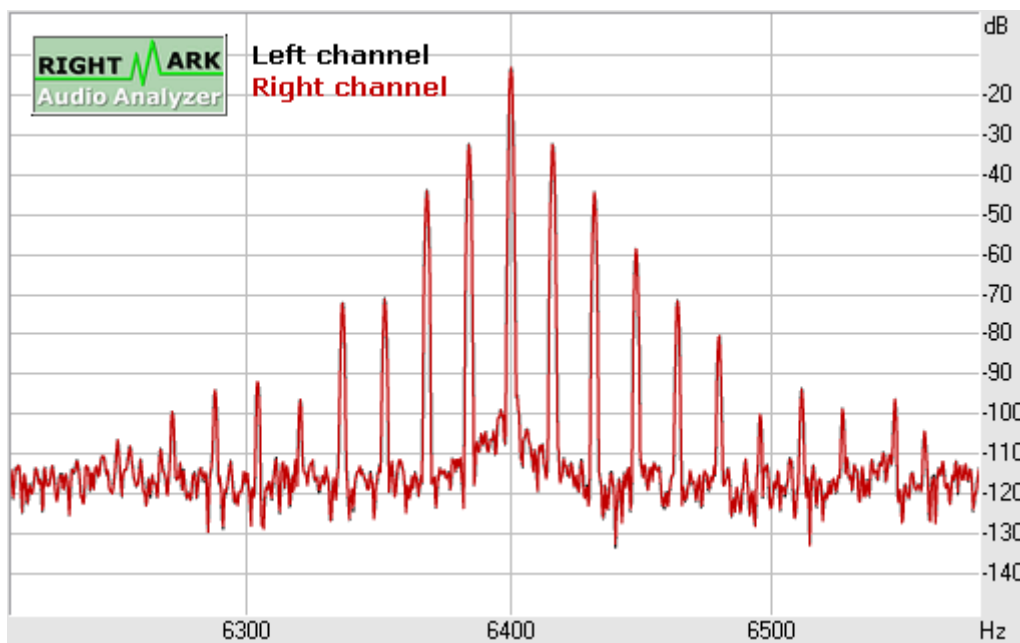


Рис. 10. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 16 Гц и 6400 Гц с соотношением амплитуд 2:1

Повышение уровня искажений на рис. 7–10 связано с ростом индекса частотной модуляции M_D .

Аналогичные исследования были проведены с ДГ другой модели, допускающей значение $X_{LIN} = \pm 6$ мм. Результаты натурного моделирования показали тождественные результаты. Так, можно наблюдать практически полное соответствие спектра на рис. 11 спектру на рис. 8.

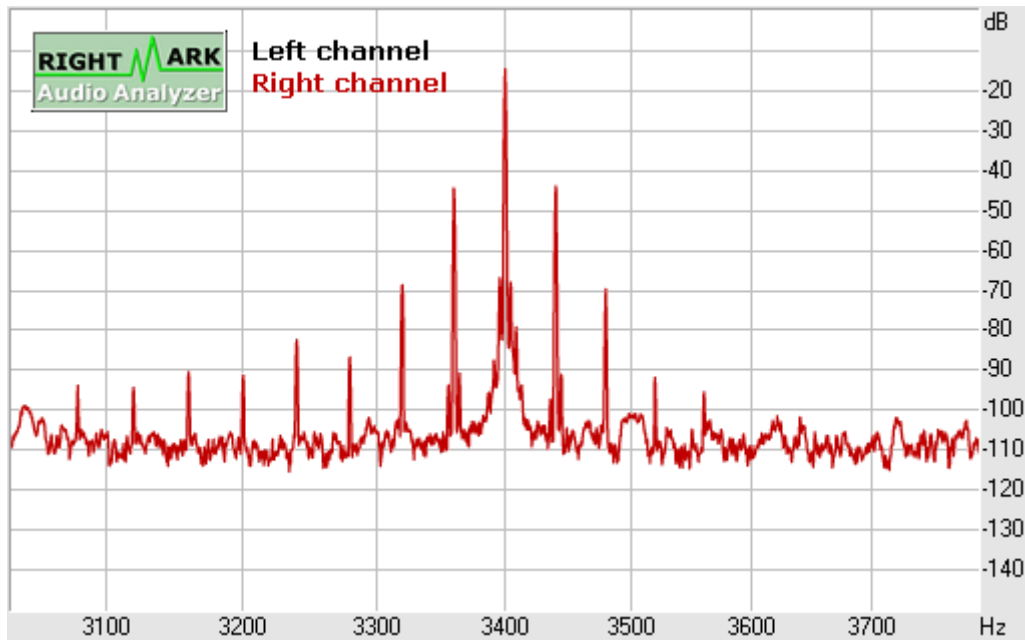


Рис. 11. Спектр акустического сигнала при воздействии частот 60 Гц и 3400 Гц с соотношением амплитуд 2:1 для ДГ другой модели

На рис. 11 показан спектр при $f_1 = 60$ Гц и $f_2 = 3400$ Гц с соотношением амплитуд 2:1. Из рис. 11 видно, что спектр ЧМ широкий, присутствуют продукты интермодуляционных искажений низкого и высокого, преимущественно до 8-го, порядков.

3. Анализ доплеровских искажений

Результаты расчетов и моделирования в достаточной степени соответствуют друг другу. Расхождения связаны со сложностью точной установки X_{LIN} в ходе натурного моделирования. Поскольку увеличение отношения составляющих частот приводит к росту ширины спектра интермодуляционных искажений акустического сигнала, следовательно, ширина спектра зависит от M_D . Так, для $M_D < 1$ ширина спектра сигнала соответствует ширине спектра амплитудно-модулированного сигнала, и в этом случае частотная модуляция является узкополосной. При увеличении M_D ширина спектра интермодуляционных искажений из-за доплеровского эффекта увеличивается, а ЧМ в этом случае становится широкополосной.

Как было показано ранее, индекс доплеровской модуляции при частоте 60 Гц для частот 1000 Гц и 3400 Гц может достигать 0.62 и 8.5 единиц соответственно. Поскольку как расширение спектра интермодуляционных искажений, так и увеличение амплитуд интермодуляционных частот определяет качество звучания громкоговорителя, то следует избегать $M_D > 1$ путем правильного подбора частот раздела в многополосном громкоговорителе.

Эффект доплеровского модуляционного воздействия U_{f2} на U_{f1} не проявляется из-за снижения подвижности диффузора динамика с ростом частоты, что видно из рис. 1, 2. Таким

образом, при необходимости получения высоких SPL доплеровский эффект динамиков с длинным ходом приводит к нелинейным искажениям акустической волны – доплеровскому эффекту. Следует учитывать это явление в проектировании громкоговорителей и акустических систем для высоких уровней SPL и при высоких требованиях к качеству звука.

Например, при работе в студиях музыкальной направленности, концертных залах при исполнении классических произведений требуемый проектный уровень SPL необходимо обеспечивать громкоговорителями с диффузорами большей площади (снижая подвижность диффузора и уменьшая тем самым K_D) или системами громкоговорителей (портальными акустическими системами), увеличивая площадь излучения акустической волны.

Низкочастотные ДГ с длинным ходом, которые должны использоваться при высоких уровнях звукового давления, не должны работать в среднечастотном и высокочастотном диапазонах, то есть частота раздела в многополосном громкоговорителе должна быть относительно низкой, если нужно избежать доплеровских искажений.

При невозможности увеличения площади диффузора динамической головки (ограниченные по массе размеры громкоговорителя или по габаритам места его установки) или при невозможности использования портальных систем (вес, занимаемая площадь) следует строить многополосные громкоговорители – с отработкой частотной области отдельной динамической головкой, отнесенной в пространстве. Частоту среза разделительного фильтра для НЧ-звена необходимо выбирать с учетом возможного появления ЧМ, избегая высоких значений M_D .

4. Заключение

При проектировании высококачественных громкоговорителей, предназначенных для студий звукозаписи, необходимо ограничивать диапазон воспроизводимых частот в области НЧ путем введения в схему УМЗЧ фильтра ВЧ с частотой среза ниже резонансной частоты громкоговорителя. Это следует выполнить, так как эффективность излучения звуковой волны ДГ на частотах ниже резонансной резко снижается, что видно по спаду АЧХ ДГ, но подвижность (смещение) диффузора остается постоянной, и его колебания будут вызывать доплеровский эффект (рис. 10).

Расширение рабочего диапазона частот ДГ путем введения в УМЗЧ цепей коррекции с подъемом в области НЧ (без ограничения нижней рабочей частоты ФВЧ) приводит к росту индекса ЧМ, так как этот метод вызывает увеличение подвижности (смещения) диффузора ДГ в области НЧ, в том числе ниже резонансной частоты ДГ, что приводит к ухудшению качества звуковоспроизведения.

Следует заметить, что в данном исследовании не были затронуты вопросы интермодуляционных и нелинейных искажений в электрическом тракте (УМЗЧ и ЗИ). Это не означает, что ими можно полностью пренебречь, но для современных усилительных устройств и устройств цифро-аналогового и аналого-цифрового преобразования величины интермодуляционных и нелинейных искажений существенно ниже и проявляются иначе, чем вызванные доплеровским эффектом.

Литература

1. Рыскин Н. М., Трубецков Д. И. Нелинейные волны: учеб. пособие для вузов по физ. спец. М.: Наука. Физматлит, 2000. 272 с.
2. Степанов Н. С. Волны / Большая российская энциклопедия. Т. 5. М., 2006. С. 645–649.
3. Newell P. R. et al. Loudspeakers: For Music Recording and Reproduction. Focal, 2007.
4. Faruque S. Radio Frequency Modulation Made Easy: Springer Cham, 2017. P. 33–37.
5. Thomas T. G., Sekhar S. C. Communication Theory. Tata-McGraw Hill 2005. P. 136.

Шушнов Максим Сергеевич

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: efemerian@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1713-5177.

Шушнова Татьяна Владимировна

старший преподаватель кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: t.shushnova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9977-1818.

Онопrienко Анна Михайловна

старший преподаватель кафедры цифрового телерадиовещания и систем радиосвязи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: anna_barabanova@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-9972-423X.

Абросимова Надежда Олеговна

аспирант 2-го года обучения, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: skachok94@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-3057-8215.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Non-linear Acoustic Problems in Loudspeaker Design

Maxim S. Shushnov, Tatiana V. Shushnova, Anna M. Onoprienko, Nadezhda O. Abrosimova

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: The article deals with the issues of non-linear acoustics. A mathematical model of non-linear distortions of the acoustic path has been compiled in relation to the operation of a loudspeaker in a piston mode. The results of experimental measurements are presented and analyzed. Recommendations are given to reduce distortion in the construction of high-quality acoustic systems.

Keywords: sound, non-linear distortion, loudspeaker, woofer, audio system, monitor, optimization.

For citation: Shushnov M. S., Shushnova T. V., Onoprienko A. M., Abrosimova N. O. Voprosy nelineynoy akustiki v proyektirovanii gromkogovoriteley (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 78-90. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-1-78-90>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Shushnov M. S., Shushnova T. V.,
Onoprienko A. M., Abrosimova N. O., 2024

The article was submitted: 10.09.2023;
accepted for publication 01.10.2023.

References

1. Ryskin N. M., Trubetskov D. I. *Nelineynyye volny* [Nonlinear waves]. Moscow, Nauka, Fizmatlit, 2000. 272 p.
2. Stepanov N. S. *Volny* [Waves]. *Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya*, Moscow, 2006, vol. 5, pp. 645-649.
3. Newell P. R. et al. *Loudspeakers: For Music Recording and Reproduction*. Focal, 2007.
4. Faruque Saleh. *Radio Frequency Modulation Made Easy*. Springer Cham, 2017, pp. 33-37.
5. Thomas T. G., Sekhar S. C. *Communication Theory*. Tata-McGraw Hill, 2005, 136 p.

Maxim S. Shushnov

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Digital Television, Radio Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), e-mail: efemerian@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1713-5177.

Tatiana V. Shushnova

Senior lecturer of the Department of Digital Television, Radio Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, e-mail: t.shushnova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-9977-1818.

Anna M. Onoprienko

Senior lecturer of the Department of Digital Television, Radio Broadcasting and Radio Communication Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, e-mail: anna_barabanova@mail.ru, ORCID ID: 0009-0006-9977-1818.

Nadezhda O. Abrosimova

Postgraduate student of the 2nd year of study at Siberian State University of Telecommunications and Information Science, e-mail: skachok94@mail.ru, ORCID ID: 0009-0000-3057-8215.