

Нелинейность громкоговорителей - причины, параметры, симптомы

Вольфганг Клиппель, Клиппель ГмбХ, Дрезден, Германия, klippel@klippel.de

АБСТРАКТ

В данной статье рассматривается связь между измерениями нелинейных искажений и нелинейностями, которые являются физическими причинами искажения сигнала в громкоговорителях, наушниках, микродинамиках и других преобразователях. С помощью методов моделирования определяются характерные симптомы для каждой нелинейности и систематически представляются в виде руководства по диагностике громкоговорителей. Эта информация важна для понимания последствий нелинейных параметров и для проведения измерений, которые более полно описывают громкоговоритель. Практическое применение новых методов продемонстрировано на трех различных громкоговорителях.

1. ВВЕДЕНИЕ

Громкоговорители и другие виды исполнительных механизмов, воспроизводящих звук или вибрации, ведут себя по-разному при малых и больших амплитудах. Зависимость от амплитуды свидетельствует о нелинейности, присущей системе. Вторым нелинейным эффектом является генерация дополнительных спектральных компонентов, которые отсутствуют в возбуждающем стимуле. Эти компоненты, как правило, являются целочисленными кратными приложенного основного сигнала и поэтому обозначаются как гармонические и интермодуляционные искажения. Результаты измерений этих искажений сильно зависят от свойств стимула, таких как выбранная частота, амплитуда и фаза возбуждающих тонов. Результаты не полностью описывают характеристики большого сигнала, но их следует понимать как симптомы. В этом заключается основное отличие от результатов измерений в области малых сигналов, где линейная передаточная функция или импульсная характеристика полностью описывает связь между входом и выходом.

Измерения, основанные на симптомах, являются проблематичными, поскольку они вызывают следующие вопросы: Активирует ли метод измерения и обнаруживает ли он существенные признаки нелинейности громкоговорителя?

Имеют ли симптомы значение?

Как они связаны с физическими причинами?

Как сократить время и усилия на проведение измерений и при этом получить полный набор данных?

Эти вопросы будут рассмотрены в следующей статье. Ответы будут получены на основе моделирования громкоговорителей и результатов практических измерений. Сначала обсуждаются основные нелинейные механизмы в громкоговорителях. Затем обобщаются традиционные и новые методы измерений. После обсуждения общих симптомов и их связи с формой нелинейной кривой, систематически рассматриваются конкретные симптомы доминирующих нелинейностей в громкоговорителях. Представлено простое руководство по оценке характеристик громкоговорителей по большому сигналу. Затем это руководство применяется для диагностики трех громкоговорителей, предназначенных для домашнего и автомобильного применения. Наконец, сделаны выводы для практической работы и дальнейших исследований.

2. ГЛОССАРИЙ СИМВОЛОВ

AMD	амплитудно-модуляционные искажения в процентах
$Bl(x)$	эффективный мгновенный коэффициент электродинамической связи (коэффициент силы двигателя), определяемый интегралом плотности постоянного магнитного потока B по длине звуковой катушки l .
C	амплитудная компрессия основного сигнала в дБ
E	огibaющая временного сигнала
$ETHD$	эквивалентные суммарные гармонические искажения на клеммах преобразователя в процентах EHD_n
	эквивалентные гармонические искажения шестого порядка на клеммах преобразователя в процентах f_s
f_p	резонанс Гельмгольца порта в вентилируемых системах
FT	преобразование Фурье
$F_m(x, I)$	электромагнитная движущая сила (сила сопротивления), обусловленная изменением индуктивности в зависимости от x ,
HD_n	Гармонические искажения шестого порядка в процентах
$H(j\omega)$	линейная передаточная функция
$ICHD$	мгновенный коэффициент гребня гармонических искажений в дБ
IHD	мгновенное значение составляющей гармонических искажений в процентах
IMD_n	интермодуляционные искажения n -го порядка в процентах
IMD_{total}	суммарные гармонические интермодуляционные искажения в процентах

$i(t)$ входной электрический ток,

$K_s(x)$ механическая жесткость подвески водителя, которая является обратной величиной от податливости $C_{ms}(x)$,

$L_e(x,i)$ единичные параметры, зависящие от смещения x и тока i , необходимые для моделирования параиндуктивности звуковой катушки,
 $L_2(x,i)$
 $R_2(x,i)$

L_{AMD} искажение амплитудной модуляции в децибелах

$L_{HD,n}$ гармонические искажения n -го порядка в выходном сигнале звукового давления в децибелах

L_{THD} суммарное гармоническое искажение выходного звукового давления в децибелах

$L_{EHD,n}$ эквивалентные гармонические искажения

шестого порядка в децибелах L_{ETHD} эквивалентные

полные гармонические искажения в децибелах L_{THD}

эквивалентные полные гармонические искажения в

децибелах

$L_{IMD,n}$ Интермодуляционные искажения n -го порядка в выходном сигнале звукового давления в децибелах

L_{IMD} суммарные гармонические интермодуляционные искажения в выходном сигнале звукового давления в децибелах

M_{ms}	механическая масса мембранного блока динамика, включая звуковую катушку и воздушную нагрузку,
$p(t)$	выходное звуковое давление
$P(j\omega)$	спектр сигнала звукового давления
P_n	Гармоническая составляющая девятого порядка в звуковом давлении
P_t	среднеквадратичное значение полного сигнала звукового давления
$P_r(f_1, U)_i$	относительная амплитуда основного (отнесенного к напряжению U) _i
n	порядок компонента искажения
R_{ms}	механическое сопротивление потерь в подвеске водителя,
$R_e(T)_V$	Сопротивление постоянному току звуковой катушки,
THD	суммарное гармоническое искажение выходного звукового давления в процентах
$u(t)$	напряжение на клеммах громкоговорителя.
$u_D(t)$	эквивалентное искажение входного сигнала с учетом всех нелинейностей
$u'(t)$	полное эквивалентное входное
напряжение $u' = u + u_D$ $v(t)$ скорость движения	
звуковой катушки,	
$x(t)$	перемещение звуковой катушки,
$Z_m(c)$	механическое сопротивление, представляющее механическую или акустическую нагрузку.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

При больших амплитудах все громкоговорители ведут себя более или менее нелинейно, генерируя компоненты сигнала, которых нет во входном сигнале. Существует широкий спектр нелинейных механизмов, возникающих в акустических системах, и исследования в основном сосредоточены на "доминирующих нелинейностях", которые

- ограничение акустической мощности
- создают слышимые искажения

- указывают на перегрузку
- вызывают нестабильное поведение
- связаны с ценой, весом, объемом

- определить эффективность преобразователя
- влияют на выравнивание системы громкоговорителей.

3.1. Регулярные нелинейности

Большинство доминирующих нелинейностей обусловлено принципом работы преобразователя и напрямую связано с геометрией и свойствами материалов двигателя, подвеса, диффузора и корпуса. Физические ограничения требуют компромисса, но некоторые нелинейности также вносятся намеренно, чтобы добиться желаемого поведения при больших сигналах (например, прогрессивной жесткости). Таким образом, в процессе проектирования получаются преобразователи с регулярными нелинейностями, которые присутствуют в любом хорошем устройстве, прошедшем испытания в конце линии.

Наиболее распространенные регулярные нелинейности, встречающиеся в вуферах, твитерах, микродинамиках, рупорных компрессионных драйверах и акустических системах, обобщены в таблице 1 и рассмотрены в следующих разделах.

НЕЛИНЕЙНОСТЬ	ЭФФЕКТ	МНОГОКРАТНЫЙ ВРЕ МЕННЫЕ СИГНАЛЫ
Жесткость $K_{ms}(x)$ подвески	нелинейная восстанавливающая сила $F = K_{ms}(x)x$	перемещение x
Силовой фактор $Bl(x)$	движущая сила $F = Bl(x)i$ вызывает параметрическое возбуждение	перемещение x текущий i
	обратная ЭДС $u_{EMF} = Bl(x)v$ вызывает нелинейное демпфирование	перемещение x скорость v
Индуктивность $L_e(x)$ (магнитное ак-поле меняется в зависимости от положения катушки)	производная по времени от магнитного потока $\Phi_x = L(x)i$ создает обратное индуцированное напряжение	перемещение x текущий i
	дополнительная сила сопротивления $F_m \sim i^2$, приводящая в движение механическую систему	текущий i
Индуктивность $L_e(i)$ (магнитное переменное поле изменяет проницаемость)	производная по времени от магнитного потока $\Phi_i = L(i)i$ создает обратное	текущий i

магнитной цепи)	индуцированное напряжение	
Модуль Юнга $E(\epsilon)$ материала (конус, окружность)	напряжение в материале σ $=E(\epsilon)\epsilon$ - нелинейная функция деформации	деформация ϵ
геометрическая матрица переноса	геометрия изменяется с помощью	вектор деформации ϵ

	механическая вибрация	
Сопротивление потоку $R_p(v)$ порта в вентилируемых шкафах	звуковое давление внутри коробки является нелинейной функцией воздушного потока	скорость воздуха v в порту
Эффект Доплера (изменение положения диффузора)	переменный временной сдвиг $\tau=x/c$ в распространяемом сигнале вызывает фазовые искажения	перемещение x (скорость v) звуковое давление p
Нелинейное распространение звука	скорость звука $c(p)$ зависит от давления и вызывает крутизну волны	звуковое давление p

Таблица 1 Обзор важных регулярных нелинейностей в электродинамическом громкоговорителе

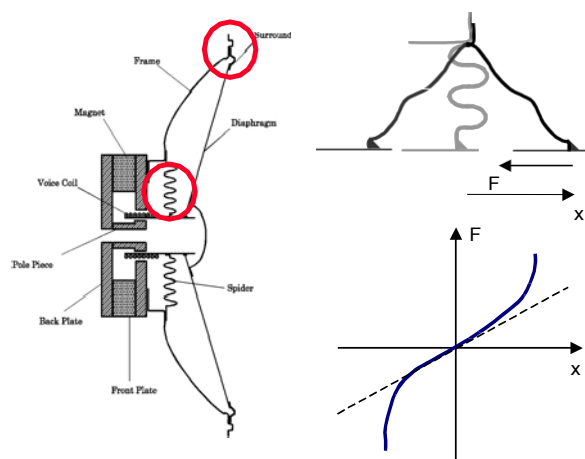


Рисунок 1: Система подвеса в обычном громкоговорителе (вид в разрезе) и нелинейная кривая "сила - прогиб".

3.1.1. Нелинейная жесткость

В громкоговорителях используется система подвеса для центрирования катушки в зазоре и создания восстанавливающей силы, которая перемещает катушку обратно в положение покоя. НЧ-динамики обычно имеют подвес, состоящий из паука и подвеса, как показано на рис. 1, который обеспечивает движение только в одном направлении и подавляет режимы качания.

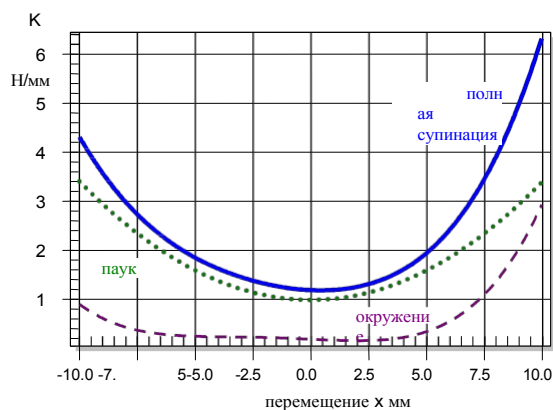


Рисунок 2: Жесткость прогрессивного паука (пунктирная кривая), ограничивающего окружения (пунктирная кривая) и всей подвески (сплошная кривая)

Большинство компонентов подвески изготовлены из пропитанной ткани, резины или пластика, сформованных в определенную форму. Подвеска ведет себя как обычная пружина и может быть охарактеризована кривой "усилие - прогиб", как показано на рис. 1. При малом смещении наблюдается почти линейная зависимость, но при большом смещении подвеска реагирует с большей силой, чем предсказывает линейная пружина. В ответ на медленное переменное усилие смещение обычно происходит с гистерезисом, вызванным потерями в материале.

Восстанавливающая сила $F = K_{ms}(x)x$ также может быть описана как произведение перемещения и нелинейной жесткости $K_{ms}(x)$. Жесткость $K_{ms}(x)$ соответствует секущей между любой точкой кривой "сила - отражение" и началом координат. Поскольку жесткость не постоянна, а сама является функцией смещения x , восстанавливающая сила содержит произведения смещений звуковой катушки. Эти составляющие вносят нелинейные искажения во временной сигнал, характерные для подвеса. Жесткость также изменяется с частотой из-за вязкоупругого поведения материала подвеса. Однако этот эффект можно смоделировать с помощью линейных систем [24].

На рис. 2 показан $K_{ms}(x)$ -характер паука с прогрессивной характеристикой и окружностью, ограничивающей экскурсию при положительном смещении.

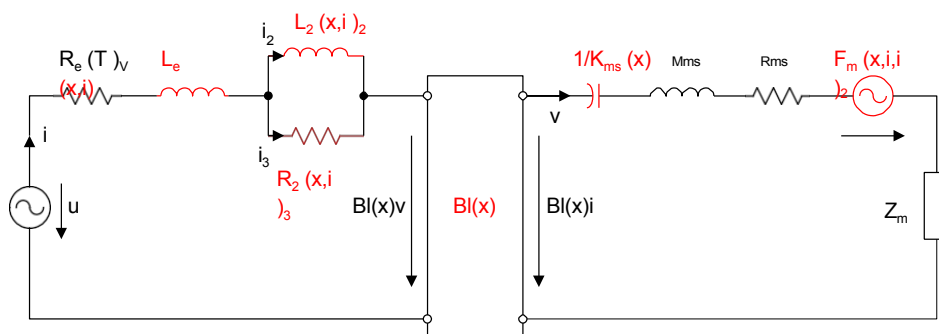


Рисунок 3: Электрическая эквивалентная схема громкоговорителя с учетом двигателя и системы подвеса

3.1.2. Фактор силы

Силовой фактор $Bl(x)$ описывает связь между механической и электрической сторонами модели электродинамического преобразователя с единичными параметрами, как показано на рисунке 3. Этот параметр представляет собой интеграл плотности потока B от длины провода звуковой катушки l . Силовой фактор $Bl(x)$ не является постоянной величиной, а зависит от смещения x звуковой катушки. Очевидно, что если витки катушки выходят из зазора, то коэффициент силы уменьшается. Нелинейная функция является статической (без зависимости от частоты) и может быть представлена в виде нелинейного графика, таблицы или разложения в ряд мощностей.

Форма кривой $Bl(x)$ зависит от геометрии конфигурации катушка-зазор и В-поля, создаваемого магнитом. На рисунке 4 показана конфигурация с выступом, в которой высота катушки h_{coil} больше глубины h_{gap} зазора. Соответствующая кривая $Bl(x)$ показана сплошной линией на рисунке 5. При малых смещениях значение силового фактора почти постоянно, поскольку в зазоре находится одинаковое количество витков. Высота катушки, равная глубине зазора, соответствует пунктирной кривой на рисунке 5, показывающей силовой фактор, который уменьшается без постоянной области при малых амплитудах.

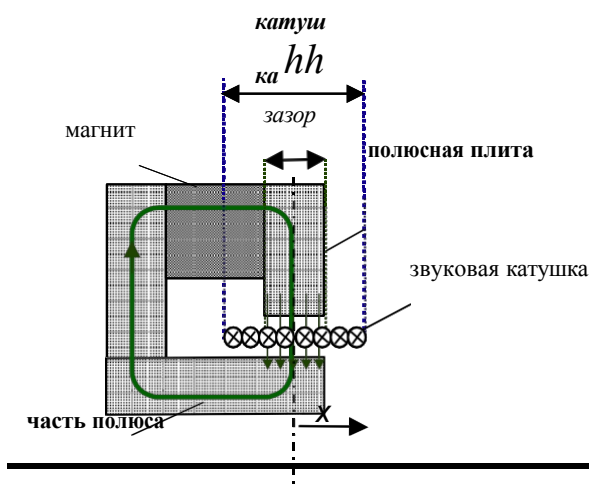


Рисунок 4: Структура двигателя в конфигурации свеса

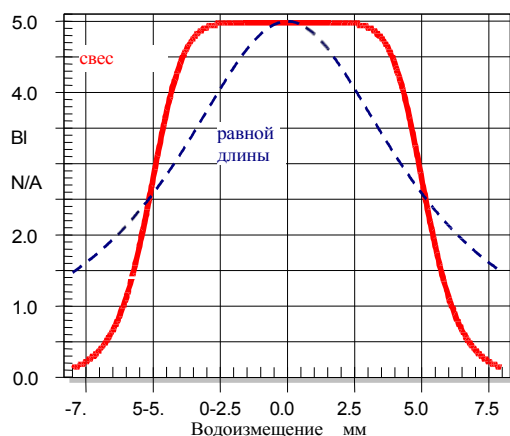


Рисунок 5: Силовой фактор $Bl(x)$ для конфигурации свеса и зазора в катушке

равной длины Силовой фактор $Bl(x)$ имеет два нелинейных эффекта,

перечисленных в таблице 1:

- Как фактор связи между электрической и механической областью, любое изменение $Bl(x)$ будет влиять на электродинамическую движущую силу $F=Bl(x)i$. Этот механизм также называется параметрическим возбуждением резонансной системы. Для возникновения значительных искажений требуются большие значения смещения x и тока i .
- Второй эффект $Bl(x)$ - зависимость обратной ЭДС, возникающей при движении катушки в постоянном поле, от смещения. Здесь коэффициент силы $Bl(x)^2$ умножается на скорость и вызывает изменение электрического демпфирования.

3.1.3. Индуктивность звуковой катушки

Входной электрический импеданс зависит от положения катушки. Например, на рис. 6 показано изменение входного электрического импеданса в зависимости от частоты, измеренное при трех положениях звуковой катушки ($x=0$, зажата на $+7$ мм и -7 мм). Выше резонанса на частоте 70 Гц (который не наблюдается для зажатой звуковой катушки) электрический импеданс значительно выше при отрицательном смещении (положение катушки "внутри"), чем при положительном смещении (положение катушки "наружу").

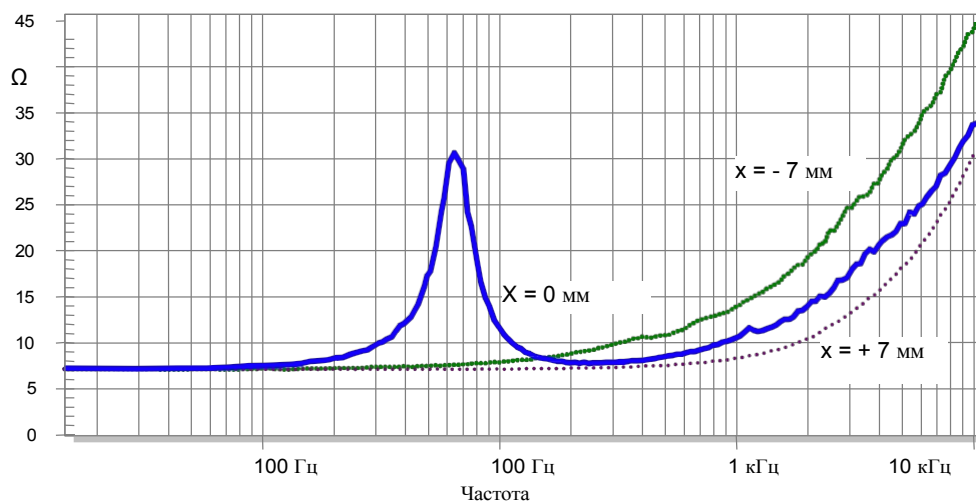


Рисунок 6: Электрический импеданс, измеренный в положении покоя ($x=0$) и с зажатой звуковой катушкой при положительном и отрицательном смещении.

Это свойство можно наблюдать у многих громкоговорителей и объяснить его изменением индуктивности в зависимости от перемещения. Ток в звуковой катушке создает магнитное поле переменного тока, пронизывающее магнит, железо и воздух, как показано на рисунке 7. Магнитный поток зависит от положения катушки и величины тока. Если катушка находится в свободном воздухе над зазором, индуктивность намного ниже, чем при работе катушки под зазором, где окружающим материалом является сталь, которая уменьшает магнитное сопротивление.

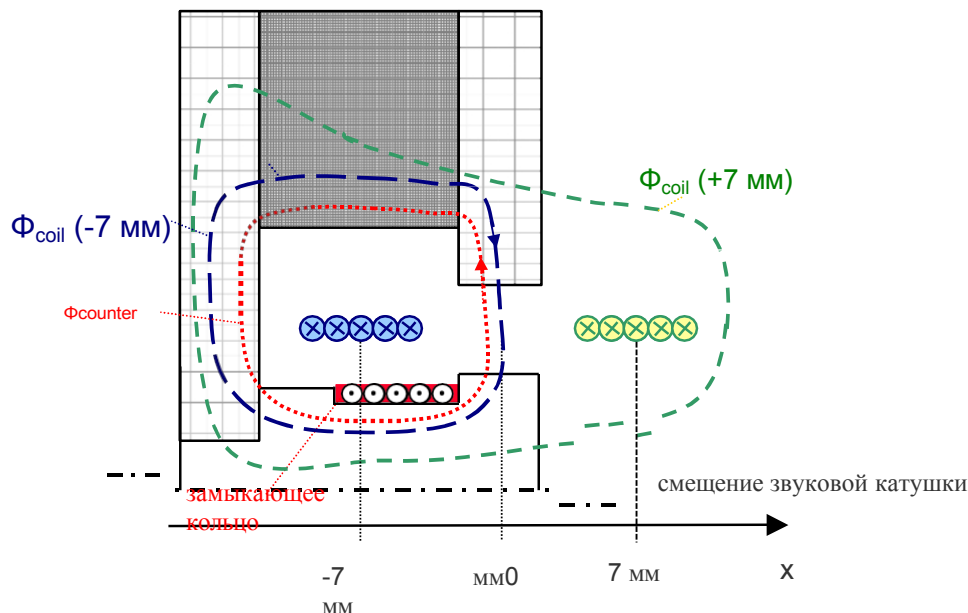


Рисунок 7: Структура двигателя обычного драйвера с использованием замыкающего кольца на полюсе.

Помимо зависимости от смещения x индуктивность также зависит от входного тока i . Это обусловлено нелинейной зависимостью между напряженностью магнитного поля H и плотностью потока (индукцией) $B = \mu(i)H$, как показано на рис. 8. При отсутствии тока в катушке постоянный магнит создает поле напряженностью H_2 , которое определяет рабочую точку на характеристике $B(H)$. Большой положительный ток ($i = 10 \text{ А}$) увеличивает общую напряженность поля до H_3 , где железо более насыщено и проницаемость μ уменьшается. И наоборот, при отрицательном токе ($i = -10 \text{ А}$) общая напряженность поля уменьшается, увеличивая значение μ . Эффект изменяющейся проницаемости $\mu(i)$, который очень сильно зависит от конкретного магнитного материала, также называется "модуляцией потока". Кроме того, переменный ток создает петлю гистерезиса, которая соответствует потерям в материале железа в течение одного периода синусоидального тока.

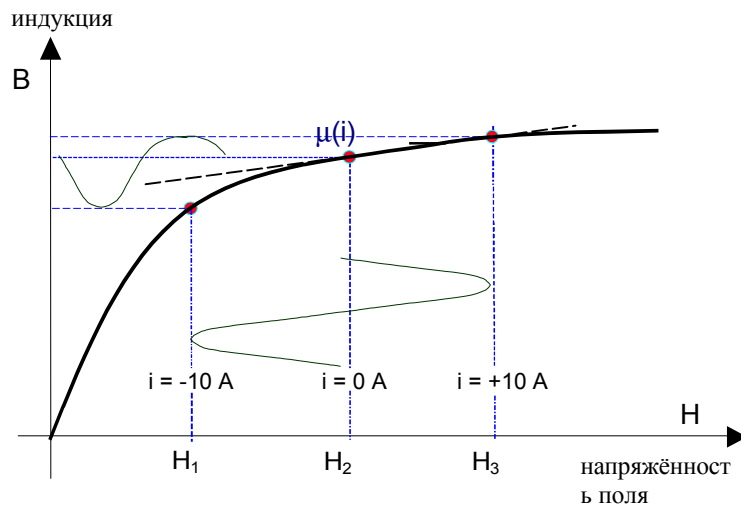


Рисунок 8: Зависимость плотности потока B от напряженности магнитного поля H магнитной цепи, показывающая, что проницаемость $\mu(i)$ зависит от тока звуковой катушки i .

Магнитный поток переменного тока увеличивает импеданс на более высоких частотах, как показано на рисунке 6. Это увеличение не может быть описано идеальной индуктивностью [2]. Для описания потерь, вызванных вихревыми токами в материале железа, требуются специальные модели (Leach [3], Wright [4], каскадная LR-сеть). Дискретная модель с использованием индуктивности $L_e(x, i)$ последовательно со второй индуктивностью $L_2(x, i)$, шунтированной резистором $R_2(x, i)$, как показано на рисунке 3, является хорошим кандидатом для отражения нелинейной зависимости от смещения и тока. Конкретные параметры зависят от диапазона частот, в котором выполняется подгонка [5]. Для большинства приложений удобно использовать простое приближение, которое пренебрегает нелинейным взаимодействием между током и смещением. В нем используется та же нелинейная форма кривой для параметров, изменяющихся в зависимости от смещения

$$\frac{L_e(x, i=0)}{L_e(0)} \approx \frac{L_2(x, i=0)}{L_2(0)} \approx \frac{R_2(x, i=0)}{R_2(0)}$$

и текущие изменяющиеся параметры

$$\frac{L_e(i, x=0)}{L_e(0)} \approx \frac{L_2(i, x=0)}{L_2(0)} \approx \frac{R_2(i, x=0)}{R_2(0)}.$$

Эта аппроксимация сокращает объем данных, используемых при диагностике громкоговорителей и расчетах их конструкции. Нелинейные характеристики $L_e(x)$ в зависимости от смещения x и $L_e(i)$ в зависимости от i , а также значения $L_2(0)$ и $R_2(0)$ в положении покоя $x=0$ достаточны в большинстве случаев для описания нелинейной характеристики параиндуктивности. Например, на рис. 9 показана зависимость $L_e(x)$ от

смещения, на рис. 10 - зависимость $L_e(i)$ от тока, соответственно.

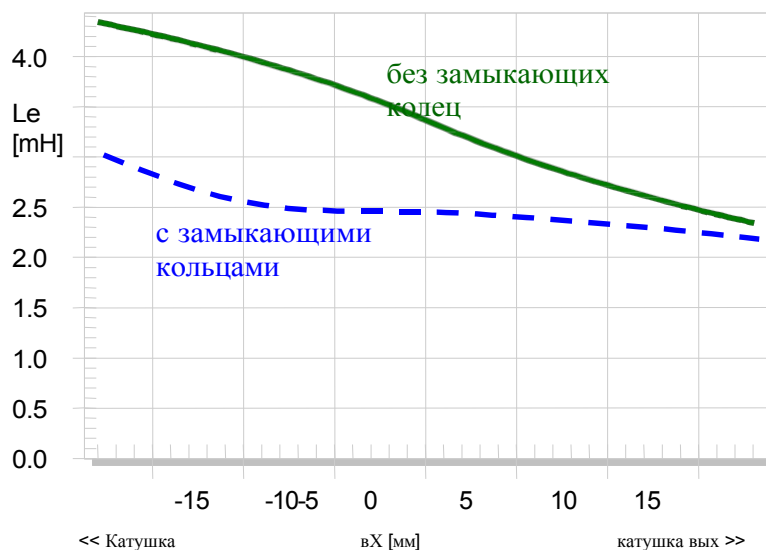


Рисунок 9: Индуктивность звуковой катушки $L_e(x, i=0)$ в зависимости от перемещения x для двигателя с замыкающими кольцами и без них.

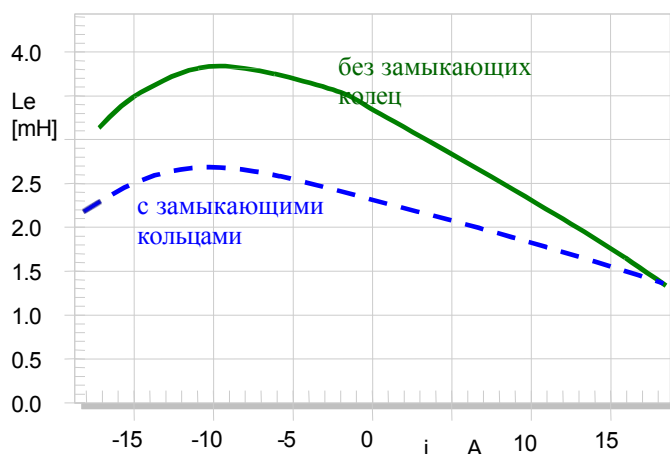


Рисунок 10: Индуктивность звуковой катушки $L_e(i, x=0)$ в зависимости от тока звуковой катушки i с и без замыкающих колец

Индуктивность катушки можно значительно уменьшить, поместив проводящий материал (обычно кольца или колпачки из алюминия или меди) на полюсный наконечник или рядом с катушкой, как показано на рисунке 7. Поле переменного тока индуцирует ток в замыкающем материале, который генерирует встречный поток. Это уменьшает общий поток и индуктивность катушки. Такая схема ведет себя аналогично трансформатору, у которого закорочена вторичная обмотка.

Если закорачивающий материал поместить в точки, где индуктивность максимальна, кривая $L_e(x)$ может быть значительно линеаризована, как показано пунктирной линией на рис. 9. Замыкающие материалы также оказывают положительное влияние на характеристику $L_e(i)$, поскольку поле переменного тока меньше и производит меньшую модуляцию потока.

В таблице 1 приведены нелинейные эффекты и показано, какие временные сигналы перемножаются друг с другом:

- Первым эффектом изменяющейся в зависимости от смещения индуктивности $L_e(x)$ является обратное индуцированное напряжение во входной электрической цепи, обусловленное производной магнитного потока по времени и приводящее к изменению входного импеданса с изменением смещения катушки, как показано на рисунке 6. Этот эффект выражается перемножением смещения и тока. Те же сигналы участвуют в параметрическом возбуждении $Bl(x)$, но после умножения происходит дополнительное дифференцирование, которое увеличивает амплитуду компонентов на 6 дБ/октаву на высоких частотах.
- Второй эффект - это дополнительная сила сопротивления $F_m(x, i, i_2)$, которая приводит в движение механическую систему напрямую, как показано в эквивалентной схеме на рисунке 3. Она может быть аппроксимирована следующим образом

$$F_m(x, i, i_2) \approx \frac{i(t)^2}{2} \frac{\partial L_e(x)}{\partial x} - \frac{i(t)^2}{2} \frac{\partial L(x)}{\partial x}.$$

Сила сопротивления перемножает локальную производную $L_e(x)$ с квадратичным током. Скважность является доминирующей нелинейной операцией и генерирует искажения во всем звуковом диапазоне. Сила сопротивления была основной движущей силой в электромагнитных громкоговорителях, использовавшихся 50 лет назад. В современных электродинамических преобразователях сила сопротивления является нежелательным рудиментом, который должен быть как можно меньше.

- Зависимость $L_e(i)$ от тока вызывает поток переменного тока, который зависит от силы i . Поскольку ток является широкополосным сигналом, компоненты искажений генерируются во всем звуковом диапазоне.

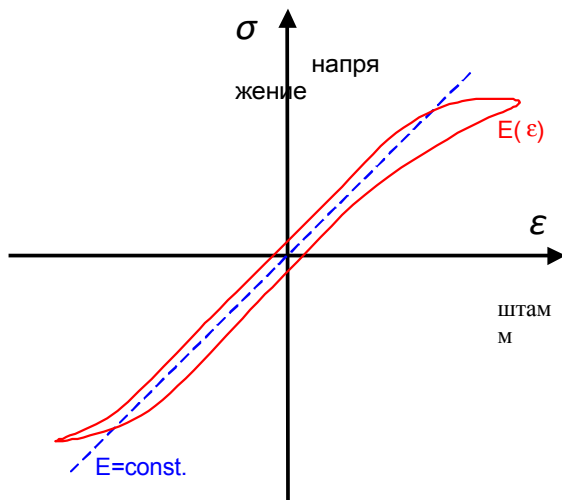


Рисунок 11: Нелинейные свойства материала как причина нелинейности механической системы

3.1.4. Нелинейные свойства материалов

На низких частотах, когда диффузор колеблется как поршень, подвес является единственной нелинейной частью механической системы и может быть описан одним единичным параметром $K_{ms}(x)$. На более высоких частотах возникают режимы разрушения диффузора и других деталей (корпус звуковой катушки, пылезащитный колпачок). Эти колебания становятся нелинейными, если деформация и напряжение в материале очень велики, а модуль Юнга $E(\epsilon)$ меняется в зависимости от деформации ϵ .

Нелинейные искажения возникают в напряжении σ в результате умножения $E(\epsilon)$ на деформацию ϵ и становятся максимальными на отдельных частотах (собственных частотах), где моды создают большие деформации в материале [6].

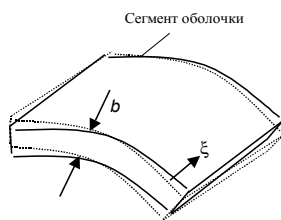


Рисунок 12: Изменение геометрии конуса под воздействием механической вибрации

3.1.5. Вариации геометрии

Более важным, чем изменение модуля E , является изменение геометрии механической системы. Вибрация становится нелинейной, если смещение ζ не мало по сравнению с геометрическими размерами (например, толщиной b или кривизной сегмента конуса [7]), как показано на рис. 12.

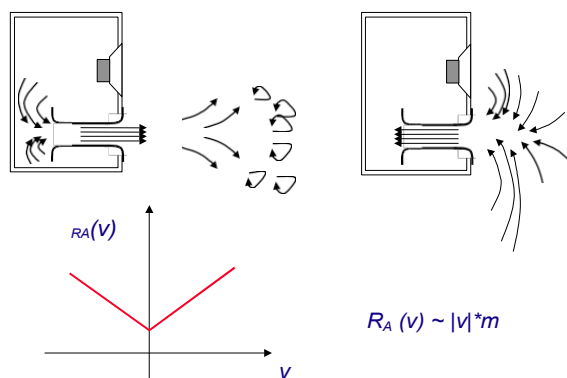


Рисунок 13: Нелинейная зависимость сопротивления потоку от скорости воздуха

3.1.6. Нелинейность порта

Сопротивление потока в портах вентилируемых систем не постоянно, а сильно зависит от скорости v воздуха внутри порта [8]. При очень низких амплитудах коэффициент потерь нормального порта очень высок ($Q > 50$), но при скоростях частиц более 20 м/с это значение снижается до 10 и менее. Причина в том, что воздух в порту не вибрирует как воздушная пробка, где все частицы воздуха связаны вместе. Во время фазы выдоха воздух выталкивается по оси в дальнее поле. В следующей фазе вдоха другие частицы воздуха, покоящиеся вокруг отверстия, ускоряются и всасываются в порт. Кинетическая энергия, перемещаемая в дальнее поле, соответствует увеличению сопротивления потока для положительных и отрицательных скоростей воздуха, как показано на рис. 13.

Нелинейное сопротивление потоку $R_p(v)$ создает низкочастотные составляющие, поскольку скорости умножаются друг на друга. Асимметрия $R_p(v)$, вызванная геометрией отверстий, создает постоянное давление в корпусе, которое может нарушить положение звуковой катушки и вызвать искажения в работе двигателя.

Вторым нелинейным механизмом является создание турбулентностей в воздушном потоке, которые ведут себя как источники звука, вызывая широкополосный шум в выходном сигнале [9], [10].

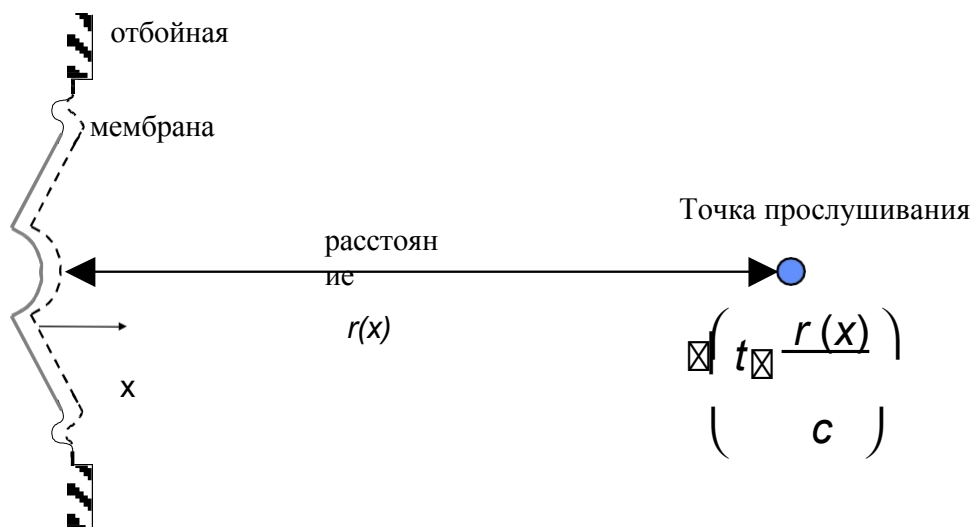


Рисунок 14: Фазовая модуляция, вызванная изменением расстояния между диффузором и точкой прослушивания (эффект Доплера)

3.1.7. Эффект Доплера

Изменение положения и геометрии диффузора и подвеса влияет не только на механические колебания, но и на условия акустического излучения [11]. Эффект Доплера является наиболее доминирующей нелинейностью в этой группе. Этот эффект можно объяснить как изменение длины волны в результате движения (скорости) между источником и приемником. Этот эффект также можно описать изменением расстояния между излучающей поверхностью (диффузором) и точкой прослушивания по оси, вызванным смещением мембраны, создаваемым низкочастотной составляющей [12]. Это приводит к изменению временной задержки в передаваемом сигнале звукового давления, что может быть интерпретировано как фазовая или частотная модуляция. Это не очень критично для самой низкочастотной составляющей, но вызывает сильную интермодуляцию высокочастотных сигналов с короткой длиной волны. Этот механизм может быть описан произведением смещения и дифференцированного звукового давления и требует одновременного наличия низкочастотных и высокочастотных компонентов. Самый простой способ избежать этого искажения - использовать многополосную систему с достаточно низкой частотой кроссовера между НЧ- и ВЧ-динамиками.

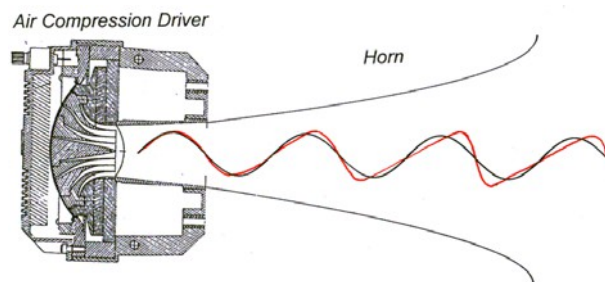


Рисунок 15: Звуковая волна, распространяющаяся с большой амплитудой, вызывает характерное кручение фронта волны

3.1.8. Крутизна волны

При высоких амплитудах звуковая волна распространяется в максимумах быстрее, чем в минимумах, что приводит к постепенному увеличению крутизны волнового фронта [13]. Такой механизм встречается в рупорных компрессионных динамиках. Нелинейный механизм, по сути, представляет собой умножение звукового давления на дифференцированное звуковое давление в каждой секции рупора [14] - [16].

3.2. Неравномерные дефекты

Существуют и другие источники искажения сигнала в громкоговорителях, которые вызваны такими дефектами, как неплотный клеевой шов, трущаяся звуковая катушка, провод, задевающий диффузор, или свободные частицы в зазоре.

Обычно это также нелинейный механизм, поскольку выходной сигнал содержит спектральные компоненты, которых нет во входном сигнале $u(t)$, а начало искажения сильно зависит от амплитуды стимула.

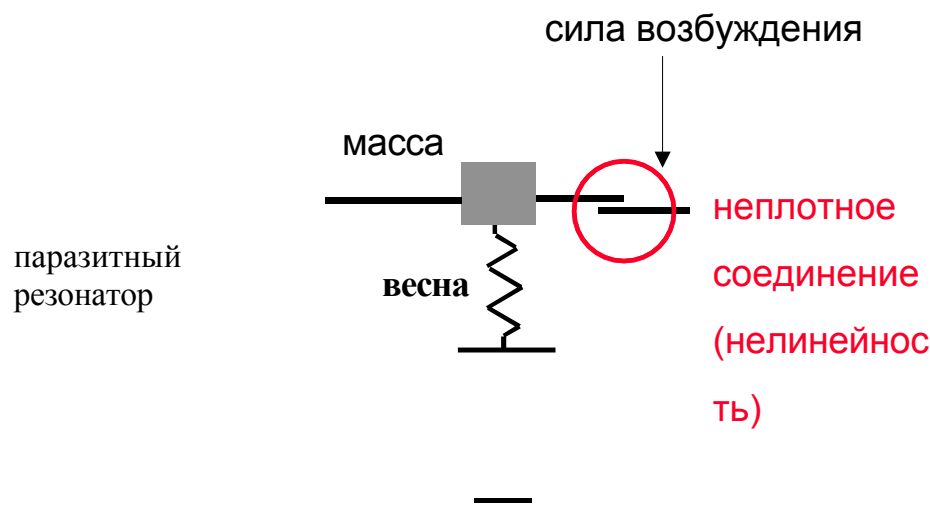


Рисунок 16: Механическая модель дефекта громкоговорителя (проблема с клеем)

Пример на рис. 16 иллюстрирует эффект дефектного клеевого шва, который приводит к ослаблению соединения между внешним краем подвеса и рамой громкоговорителя. Свободная часть подвеса моделируется единичными элементами (подвижная масса, пружина, потери), образующими резонатор

с высоким коэффициентом Q . Свободный шарнир обеспечивает нелинейное возбуждение, которое включает и выключает движущую силу в зависимости от направления смещения. Если шарнир открыт, пружинно-массовый резонатор колеблется на резонансной частоте f_0 , которая намного выше частоты возбуждения f . Внешний стимул инициирует и синхронизирует колебания и обеспечивает необходимую энергию. Применяя синусоидальный возбуждающий сигнал, эта система генерирует короткие всплески в определенные моменты времени, периодически разнесенные друг от друга.

Более подробный анализ ослабленного клеевого шва и других дефектов громкоговорителя не является предметом данной статьи, но рассматривается в других работах [17], [18].

3.3. Измерение параметров модели

Моделирование становится практичным, если свободные параметры модели могут быть определены на конкретном устройстве. Параметры модели с единичными параметрами на рисунке 3 могут быть измерены с помощью статических, инкрементных динамических или полных динамических методов, как определено в стандарте IEC [19]. Статические и инкрементные динамические методы [21], [20] используют dc-частицу в стимуле для работы громкоговорителя в определенной рабочей точке. Однако только метод полного динамического измерения [22], [23] использует громкоговоритель в нормальных рабочих условиях и может использовать аудиосигнал в качестве стимула. Это важно для учета вязкоупругих эффектов подвеса [24] и для измерения индуктивности $L_e(i)$ при больших токах (> 30 ампер), когда нагрев катушки может повредить громкоговоритель. В данной работе все параметры большого сигнала измеряются динамически с помощью метода идентификации системы (LSI анализатора искажений [25]).

3.4. Моделирование характеристик сигнала

Если модель громкоговорителя адекватна и свободные параметры тщательно измерены, поведение громкоговорителя может быть предсказано для любого входного сигнала (синтетического тестового сигнала или музыки в качестве стимула). Этот вид анализа с использованием единичных параметров [1] имеет следующие преимущества:

Моделирование не требует никаких датчиков, но дает доступ ко всем переменным состояния системы (звуковое давление, ток, смещение...). Также можно отделить нелинейные искажения каждой нелинейности от линейного выхода и измерить величину искажений в аудиосигнале в любой момент времени [26]. Моделирование также является основой для новой техники аурализации [27], которая сочетает объективную и субъективную оценку характеристик большого сигнала.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СИМПТОМОВ

Традиционным методом оценки характеристик при больших сигналах является измерение особых симптомов, генерируемых нелинейной системой при больших амплитудах [28]. К таким симптомам относятся:

- генерация новых спектральных составляющих в выходном сигнале (которые могут быть идентифицированы как гармонические, субгармонические и интермодуляционные составляющие)

- Нелинейная зависимость между амплитудой входной и выходной амплитуд фундаментальных и искажающих компонентов ("нелинейная амплитудная компрессия")
- Генерация dc-части в переменных состояниях (например, dc-перемещение) [30]
- Неустойчивости, приводящие к бифуркационным и

прыжковым эффектам [29]. Эти симптомы дают ценную

информацию о:

- отклонение от линейного поведения (почти линейное, слабое нелинейное или сильное нелинейное поведение)
- физическая природа нелинейности (например, фактор силы)
- форма нелинейной характеристики
- количественная идентификация нелинейных параметров.

4.1. Критический стимул

Симптомы возникают только в том случае, если нелинейности активируются соответствующим стимулом. Поскольку нелинейности двигателя и подвеса представляют собой относительно плавные кривые, громкоговоритель ведет себя почти линейно при достаточно малых амплитудах. Для того чтобы вызвать значительное изменение силового фактора $Bl(x)$, индуктивности $L_e(x)$ и жесткости $K_{ms}(x)$, требуется большое смещение. Поэтому стимул должен обеспечивать достаточную энергию на частотах ниже $2f_s$, поскольку смещение уменьшается на 12 дБ/октаву выше резонансной частоты f_s . Для обнаружения изменяющейся по току индуктивности $L_e(i)$ требуется сигнал, создающий большой ток звуковой катушки. Из-за изменения входного электрического сопротивления с частотой ток высок на низких частотах, становится минимальным на резонансе, снова возрастает до высоких значений на частоте $2f_s$, и постепенно затухает на более высоких частотах.

Нелинейные члены в таблице 1, которые перемножают два различных временных сигнала, требуют стимула, который производит высокие амплитуды обоих переменных состояний в одно и то же время. В некоторых случаях это невозможно сделать с помощью одного тона. Например, нелинейность $L(x)$ требует, по крайней мере, низкочастотного тона для генерации смещения и высокочастотного тона для генерации достаточного тока. Двухтональный стимул имеет преимущество перед многотональным сигналом в том, что генерируемые компоненты могут быть разделены в частотной области, что упрощает идентификацию и интерпретацию.

4.2. Мониторинг государственных переменных

Выходное звуковое давление, измеряемое микрофоном, конечно, является наиболее естественным кандидатом для мониторинга состояния громкоговорителя. Однако на акустический сигнал оказывают влияние вибрационное излучение диффузора, шум в помещении и окружающий шум. Контроль смещения звуковой катушки

с помощью триангуляционного лазерного датчика - это более прямой способ наблюдения за состоянием подвески и двигателя. Из-за несимметричных нелинейностей (процесс выпрямления) в смещении может возникнуть значительная постоянная составляющая. Входной ток также является очень информативным сигналом состояния и может быть легко измерен. Динамическое измерение параметров больших сигналов в модуле LSI [25] основано на мониторинге электрических сигналов только на клеммах громкоговорителя. Мониторинг напряжения на клеммах полезен, если громкоговоритель работает через высокоомный усилитель (источник тока). Мониторинг скорости и ускорения диффузора может быть осуществлен с помощью дорогостоящей лазерной доплеровской системы или недорогого акселерометра, установленного на диффузоре.

4.3. Анализ сигналов и измерение искажений

Нелинейная система, возбуждаемая двухтоновым стимулом $u(t) = 1.4U_0 \sin(2\pi f_1 t) + 1.4U_0 \sin(2\pi f_2 t)$ с первым тоном возбуждения на частоте f_1 и вторым тоном на f_2 , генерирует переменную состояния (например, звуковое давление $p(t)$), которая подвергается спектральному анализу (преобразованию Фурье FT), дающему спектр (например, $P(j\omega) = FT\{p(t)\}$).

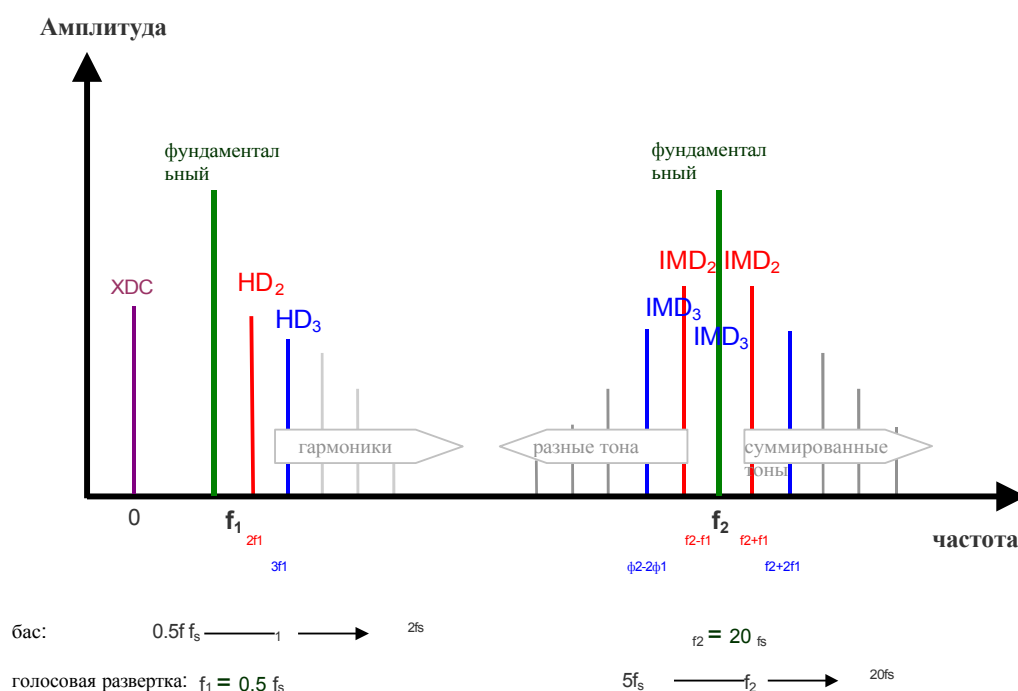


Рис. 17 Спектр переменной состояния (например, звуковое давление, смещение, ток), генерируемой двухтоновым стимулом

Если расстояние между двумя тонами достаточно велико ($f_2 \gg f_1$), то фундаментальные компоненты, гармонические и интермодуляционные компоненты хорошо разделены и могут быть легко идентифицированы, как показано на рис. 17.

4.3.1. Фундаментальные компоненты

Комплексный спектр $P(j\omega) = FT\{p(t)\}$ состоит из 3 фундаментальных компонент $P(j\omega_1)$ и $P(j\omega_2)$. При проведении серии измерений с изменяющейся частотой f_1 можно измерить амплитудно-фазовую характеристику фундаментальной составляющей в интересующем диапазоне частот. В отличие от линейного отклика, измеряемого при достаточно малых амплитудах, отклик большого сигнала зависит от амплитуды и спектрального содержания стимула. Так, второй тон при f_2 может влиять на амплитуду выходного компонента $P(j\omega_1)$. В данной работе все измерения фундаментальных компонентов проводятся с одним тоном f_1 .

Хотя фазовая характеристика значительно меняется при увеличении амплитуды, она пока играет незначительную роль в диагностике громкоговорителей.

Более важным является соотношение между входной и выходной величиной, которое выявляет нелинейное сжатие амплитуды. На практике серия измерений $i = 1, \dots, N$ при изменении амплитуды входного сигнала $U_o = i \cdot \Delta U$ и вычислении относительной амплитуды

$$P_r(f_1, U_i) = \frac{|P(j2\pi f_1)|}{U_i} \quad (1)$$

Мера $P_r(f_1, U_i)$ является удобной основой для сравнения всех измерений на одной диаграмме и вычисления амплитудного сжатия

$$C(f_1, U) = 20 \lg \left| \frac{P_r(f_1, U_1)}{P_r(f_1, U)} \right| \quad (2)$$

4.3.2. Гармонические искажения

Гармонические составляющие 2nd-го, 3rd-го и более высоких порядков $P_n(j\omega_1) = 0,7P(nj\omega_1)$ с $n > 1$ появляются на частотах $2f_1$, $3f_1$ и кратных $nj\omega_1$ от основной частоты f_1 . Гармоники второго тона f_2 находятся на более высоких частотах, которые не показаны на рисунке 17. В соответствии со стандартом IEC 60268-5 [31] гармонические искажения n -го порядка могут быть выражены в процентах

$$HD = \frac{|P_n|}{P_1} 100 \quad (3)$$

или в децибелах

$$L_{HD,n} = 20 \lg \left(\frac{HD_n}{1} \right) \quad (4)$$

суммарное гармоническое искажение в процентах

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N |P_i|^2}}{P_t} 100 \quad (5)$$

или в децибелах

$$L_{THD} = 20 \lg \left(\frac{THD}{100} \right) \quad (6)$$

используя среднеквадратичное значение суммарного сигнала

$$P_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (7)$$

Распространенные методы представления результатов измерения гармонических искажений имеют ряд недостатков:

Показатели HD_n , THD в уравнениях (3) и (5), соответственно, относятся к амплитуде измеренных компонентов искажений и среднеквадратичному значению P_t полного сигнала $p(t)$. Таким образом, измеренные искажения зависят от фундаментального сигнала, который в основном определяется линейной передаточной функцией $H(j\omega)$. Это приводит к высоким значениям гармонических искажений на низких частотах, где излучение гармоник намного лучше, чем излучение фундаментального сигнала. Кроме того, разрывные моды, излучение, отклонения звуковой волны на краях корпуса и отражения в помещении увеличивают сложность кривых искажений [32].

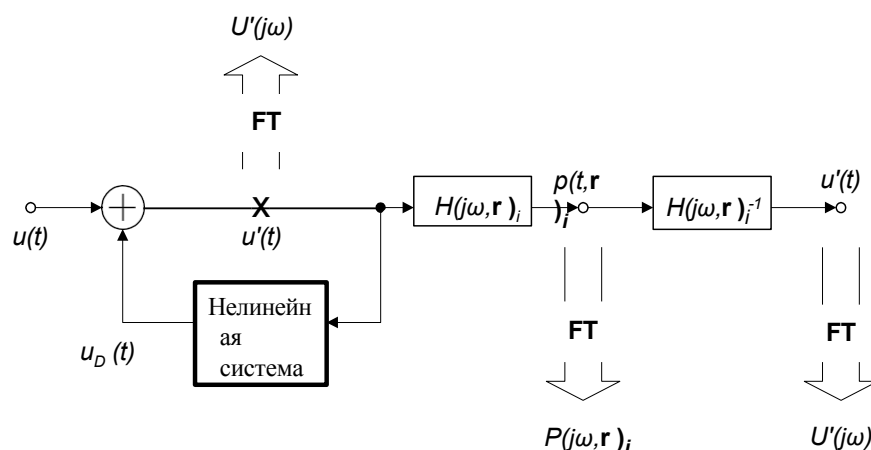


Рисунок 18: Измерение эквивалентных искажений на входе с помощью инверсной фильтрации перед спектральным анализом.

Результаты измерения искажений гораздо легче интерпретировать, если они измерены

ближе к источнику. Поскольку большинство доминирующих искажений генерируется в одномерном сигнальном тракте (двигатель, подвеска), их можно объединить в источник сигнала, добавив

искажений $u_D(t)$ для входного сигнала $u(t)$, как показано на рис. 18. К сожалению, эта точка недоступна для прямых измерений в реальных громкоговорителях. Однако искажения, измеренные в звуковом давлении, смещении или любой другой переменной состояния, могут быть легко преобразованы во входной сигнал путем фильтрации с помощью обратной передаточной функции $H(j\omega)^{-1}$. Эта концепция [33] позволяет получить меньше, но более значимые данные и является удобным способом отделения моторных искажений от искажений, генерируемых в многомерной области (моды пробоя, излучение).

Эквивалентное гармоническое искажение входного сигнала n -го *порядка* в процентах определяется в процентах

$$EHD = \frac{|U_n|}{U_t} 100, \quad \text{для } n > 1 \quad (8)$$

или в
децибелах

$$L_{EHDn} = 20 \lg \left(\frac{EHD_n}{100} \right), \quad \text{для } n > 1, \quad (9)$$

Эквивалентное полное гармоническое искажение
входного сигнала в процентах

$$ETHD = \frac{\sqrt{|U_2|^2 + |U_3|^2 + \dots + |U_n|^2}}{U_t} 100 \quad (10)$$

или в
децибелах

$$L_{ETHD} = 20 \lg \left(\frac{ETHD}{100} \right) \quad (11)$$

используя эквивалентные входные компоненты

$$U_n(j\omega) = \frac{P_n(j\omega)}{H(j\omega)} \quad (12)$$

и среднеквадратичное значение суммарного сигнала
входного напряжения U_t

$$U_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (13)$$



Рисунок 19: Мгновенные искажения IHD и суммарные гармонические искажения THD в выходном звуковом давлении, измеренные с помощью синусоидальной развертки на неисправном громкоговорителе.

Традиционные измерения гармонических искажений используют только амплитуду гармонических составляющих. Фазой гармоник высших порядков обычно пренебрегают, поскольку их интерпретация затруднена. Однако как фазовый, так и амплитудный спектр определяют форму сигнала искажения во временной области [34]. Форма сигнала гармонических искажений может быть рассчитана для синусоидального стимула с частотой ω путем применения обратного преобразования Фурье к гармоникам в комплексном спектре, что дает мгновенное гармоническое искажение в процентах

$$IHD(t) = \frac{\left| \sum_{i=2}^N P_i e^{j\omega_i t} + P_i e^{-j\omega_i t} \right|}{p(t)} 100 \quad (14)$$

или в децибелах

$$L_{IHD} = 20 \lg \left(\frac{\left| \sum_{i=2}^N P_i e^{j\omega_i t} + P_i e^{-j\omega_i t} \right|}{p(t)} \right) \quad (15)$$

Для синусоидальной развертки время t соответствует мгновенной частоте $\omega(t)$, что дает частотную характеристику $L_{IHD}(f)$. Например, на рис. 19 показаны мгновенные гармонические искажения $L_{IHD}(f)$ в виде тонкой линии и полные гармонические искажения THD в виде толстой линии в зависимости от частоты в диапазоне от 20 Гц до 1 кГц. Соотношение между мгновенным искажением (IHD) и среднеквадратичным значением искажения (THD) дает коэффициент мгновенного гребня гармонических искажений

$$ICHD = 20 \lg \left(\frac{IHD}{THD} \right) \quad (16)$$

в децибелах. Этот показатель описывает переходные и импульсные свойства гармонических искажений и играет важную роль в разделении мягких или жестких предельных нелинейностей и выявлении дефектов громкоговорителей. Например, искажения, вызванные регулярными нелинейностями двигателя и подвеса, дают

относительно гладкие кривые искажений, а *ICHD* остается ниже

10 дБ. Дефект громкоговорителя, такой как биение провода, создает гораздо более высокий коэффициент гребня ($ICHD > 10$ дБ), как показано на 50 Гц на рис. 19.

4.3.3. Интермодуляционные искажения

Стандарт IEC [31] суммирует компоненты суммированного и разностного тонов одного порядка и определяет интермодуляционные искажения n -го порядка ($n > 1$) в процентах

$$IMD = \frac{\left| \frac{P(j\omega_2 \pm (n-1)\omega_1)}{P(j\omega_1)} + \frac{P(j\omega_2 \mp (n-1)\omega_1)}{P(j\omega_1)} \right|}{\left| \frac{P(j\omega_1)}{P(j\omega_1)} \right|} 100 \quad (17)$$

или в
децибелах

$$L_{IMD,n} = 20 \lg \left(\frac{IMD_n}{100} \right) \quad (18)$$

Суммирование всех искажений n -й интермодуляции дает общее интермодуляционное искажение в процентах.

$$IM_{DTotal} = 100 \sqrt{\sum_{i=2}^N \left(\frac{IMD_i}{100} \right)^2} \quad (19)$$

или в
децибелах

$$L_{IMD,total} = 20 \lg \left(\frac{IMD_{Total}}{100} \right) \quad (20)$$

В данной работе используются два вида измерений интермодуляционных искажений:

1. Сглаживание басового тона

Первый тон f_1 изменяется от $f_s/2$ до $2f_s$, а второй тон устанавливается на постоянной частоте. $f = 10f_{2s}$.

2. Уменьшение высоты голосового тона

Первый тон установлен на постоянной частоте $f = f_{1s}/5$, а второй тон f_2 изменяется от $7f_s$ до $20f_s$.

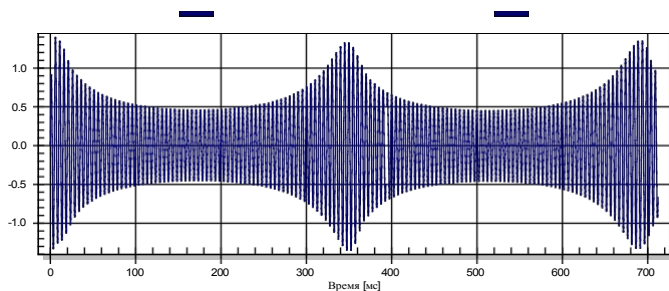


Рисунок 20: Амплитудная модуляция высокочастотного тона низкочастотным тоном, вызванная нелинейным силовым фактором $Bl(x)$

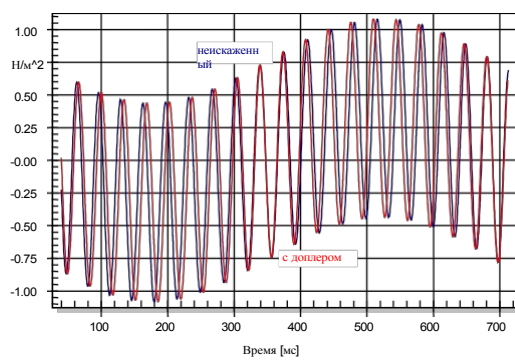


Рисунок 21: Фазовая модуляция высокочастотного тона низкочастотным тоном, вызванная эффектом Доплера

4.3.4. Разделение *FM*- и *AM*-искажений

Стандарт IEC 60268-5 [31] и другие традиционные интермодуляционные измерения используют только амплитуду тонов в боковых полосах. Фаза составляющих дает дополнительную информацию для определения механизма модуляции:

Амплитудная модуляция (АМ) вызывает изменение огибающей первого тона (несущей) в зависимости от модулирующего второго тона, но не влияет на фазу несущей [35]. Параметрическое возбуждение, вызванное $Bl(x)$, является типичным примером амплитудной модуляции. На рис. 20 показан один период низкочастотного тона, модулирующего огибающую излучаемого высокочастотного тона.

Частотная модуляция (ЧМ) не изменяет огибающую сигналов, но изменяет фазу высокочастотного тона. Например, на рис. 21 показаны осциллограммы излучаемого двухтонального сигнала с эффектом Доплера и без него за один период низкочастотного тона. Фаза высокочастотного тона изменяется вместе с амплитудой низкочастотного тона.

Интермодуляция, генерируемая *АМ-процессом*, может быть описана амплитудно-модуляционным искажением, выраженным в процентах

$$AMD = \frac{\sqrt{\frac{2}{K} \sum_{k=1}^K (E[k] - \bar{E})^2}}{\bar{E}} * 100 \quad (21)$$

или в
децибелах

$$L_{AMD} = 20 \lg \left(\frac{AMD}{100} \right) \quad (22)$$

используя мгновенную огибающую $E[k]$ и усредненную огибающую

$$\bar{E} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E[k] \quad (23)$$

модулированного высокочастотного тона, который может быть вычислен из комплексного спектра с помощью аналитического сигнала [36].

Показатели AMD и L_{AMD} показывают вклад амплитудной модуляции и могут быть сравнены с показателями полной интермодуляции IMD_{Total} и $LIMD_{total}$, которые учитывают как FM , так и AM искажения.

4.4. Dc-Displacement

Если некоторые нелинейности имеют несимметричную форму, происходит процесс выпрямления, и в смещении звуковой катушки возникает постоянная составляющая X_{dc} [37]. В скорости, ускорении или соответствующем выходе звукового давления постоянная составляющая не может возникнуть, поскольку эти сигналы по времени являются производными от смещения. Ток звуковой катушки также не имеет постоянной составляющей, поскольку магнитный поток дифференцирован, а обратная ЭДС является произведением двух ортогональных сигналов времени (смещения и скорости).

5. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КРИВОЙ

Существуют некоторые общие зависимости между формой нелинейности и величиной компонент искажений низкого и высокого порядка, не зависящие от физического контекста и места расположения нелинейности в дифференциальном уравнении.

В качестве примера ниже рассматриваются нелинейности $K_{ms}(x)$ и $Bl(x)$.

5.1. Симметрия и асимметрия

Наиболее очевидной характеристикой нелинейного параметра является симметрия кривой. Хорошо сделанный громкоговоритель должен иметь симметричные кривые $K_{ms}(x)$ и $Bl(x)$.

При больших положительных и отрицательных

При этом подвес будет ограничен развернутым и растянутым материалом подвеса, а звуковая катушка выйдет из зазора. Симметричная кривая обычно создает 3rd - и другие компоненты искажений нечетного порядка, как показано в таблице 2. Пока нелинейная система стабильна, постоянное смещение и другие компоненты искажений четного порядка не возникают. Громкоговоритель может стать нестабильным, если двигатель с катушкой равной длины и мягким подвесом [30].

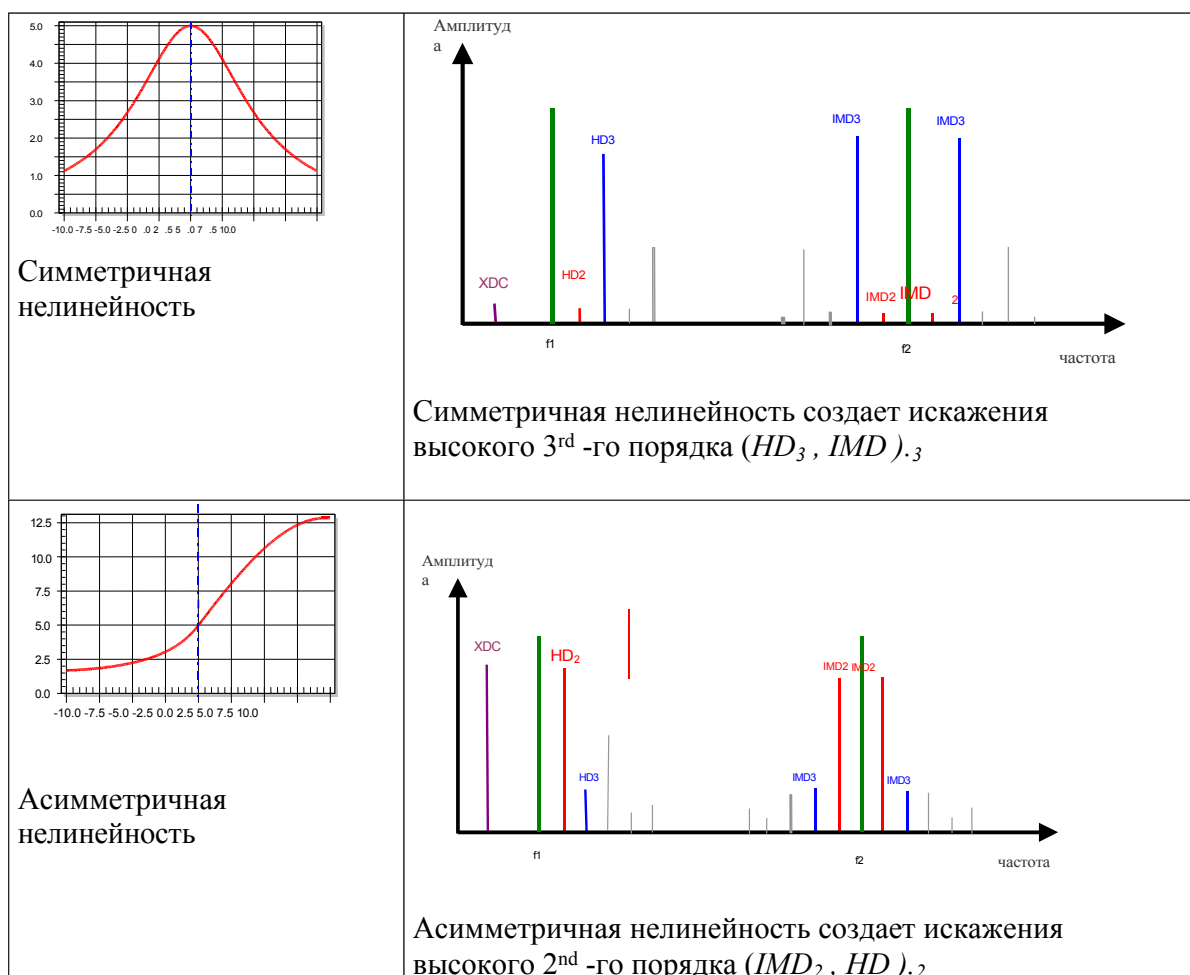


Таблица 2 Связь между формой нелинейностей и генерируемыми компонентами искажений четного и нечетного порядка

Другие нелинейности, такие как индуктивность драйвера без замыкающего кольца, эффект Доплера и крутизна волны, имеют ярко выраженную асимметрию, которую трудно (индуктивность) или невозможно (крутизна волны) устранить. Асимметричные нелинейности генерируют в основном искажения четного порядка. Однако, поскольку эти нелинейности обычно являются частью контура обратной связи (что характерно для систем, которые можно описать с помощью нелинейного дифференциального уравнения), нечетный порядок

Компоненты искажений также генерируются путем умножения искажений четного порядка на фундаментальную составляющую.

5.2. Нелинейности с мягким и жестким ограничением

Другой очевидной особенностью нелинейной формы кривой является ее крутизна. Двигатели, у которых длина катушки и зазора одинакова, становятся нелинейными при относительно небольшом смещении, как показано пунктирной линией на рис. 5. И наоборот, при большом выступе звуковой катушки возникает плато, где коэффициент силы почти постоянен в определенном диапазоне, как показано сплошной линией на рис. 5. Однако, когда катушка выходит из зазора, силовой фактор уменьшается с гораздо большей скоростью, чем в конфигурации с равной длиной. Для большого смещения в половину высоты катушки ($x = \pm 5$ мм) обе конфигурации дают одинаковое значение силового фактора ($Bl = 2,5$ Н/А), пренебрегая влиянием поля бахромы. Если обе кривые разложить в ряд мощности, то коэффициент квадратичного члена будет доминирующим для конфигурации с равной длиной, но катушка с нависанием приведет к доминирующему коэффициенту более высокого порядка.

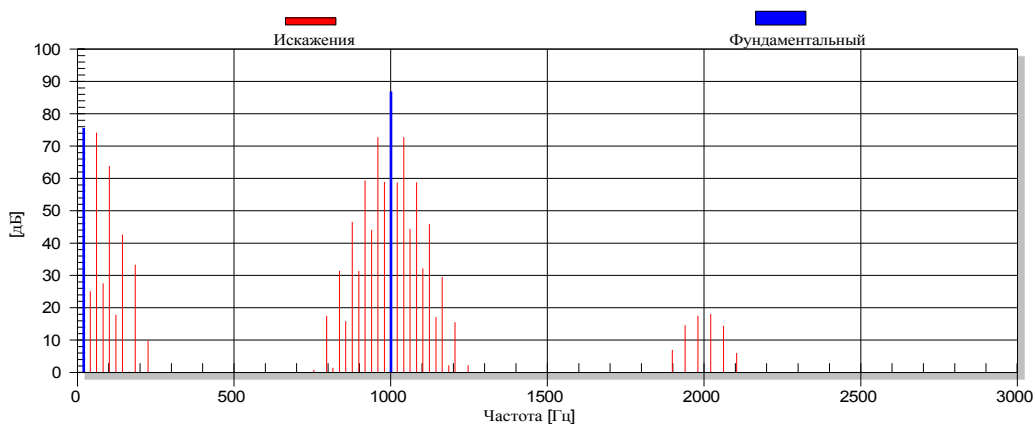


Рисунок 22: Спектр искаженного двухтонального стимула в выходном звуковом давлении, создаваемом силовым фактором $Bl(x)$ конфигурации катушки равной длины

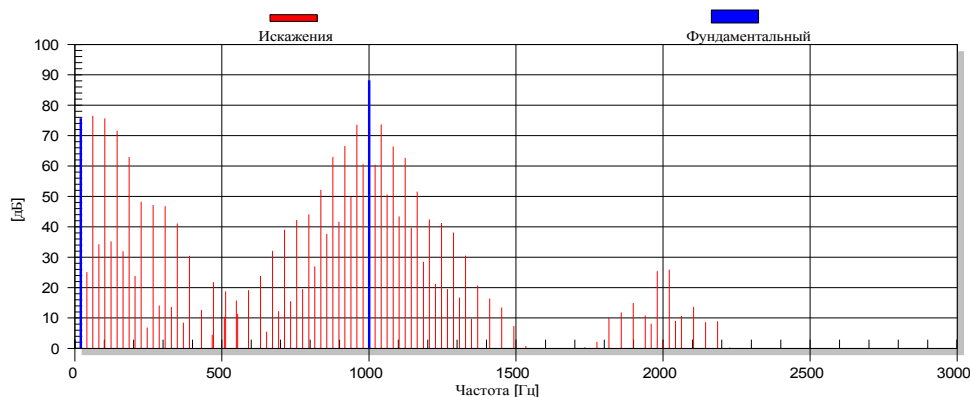


Рисунок 23: Спектр искаженного двухтонального стимула звукового давления, создаваемого силовым фактором $Bl(x)$ конфигурации катушка-зазор нависания

Крутизна нелинейной кривой напрямую зависит от энергии компонентов высшего порядка.

На рис. 22 показан спектр искаженного двухтонального сигнала, вызванного нелинейностью силового фактора конфигурации равной длины. Очевидно, что искажения третьего порядка максимальны, а компоненты пятого и более высоких порядков быстро затухают. Нелинейность с более отчетливым началом, например $Bl(x)$ нависающей катушки, приводит к появлению более высоких гармоник, как показано на рис. 23.

Хотя эти спектры измерены при определенном смещении звуковой катушки ($x_{peak} = 5$ мм), интересно также исследовать зависимость характеристик спектра от смещения (которое обозначает амплитуду возбуждения).

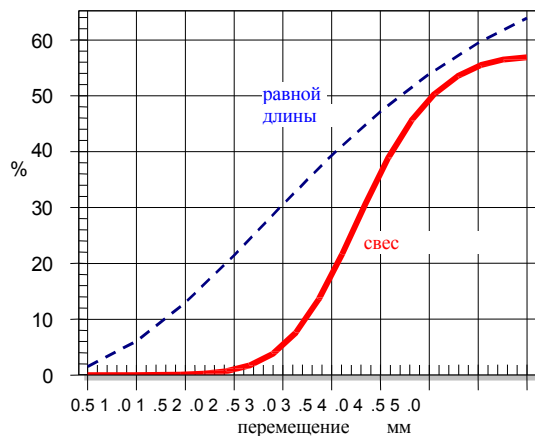


Рисунок 24: Суммарные гармонические искажения (THD) в процентах в зависимости от смещения звуковой катушки для двигателя с нависающей катушкой (толстая линия) и с катушкой равной длины (пунктирная линия).

На рис. 24 показаны суммарные гармонические искажения (*THD*) для обеих конфигураций, смоделированные на резонансной частоте в зависимости от смещения звуковой катушки x . Поскольку конфигурация с равной длиной вызывает раннее затухание $Bl(x)$, искажения растут почти линейно с увеличением смещения. Конфигурация равной длины дает 30 % THD при $x_{peak} = 2,5$ мм, но искажения нависающей катушки составляют около 5 %. При более высоких смещениях искажения катушки с выступом растут гораздо быстрее и достигают почти того же значения, что и у конфигурации равной длины.

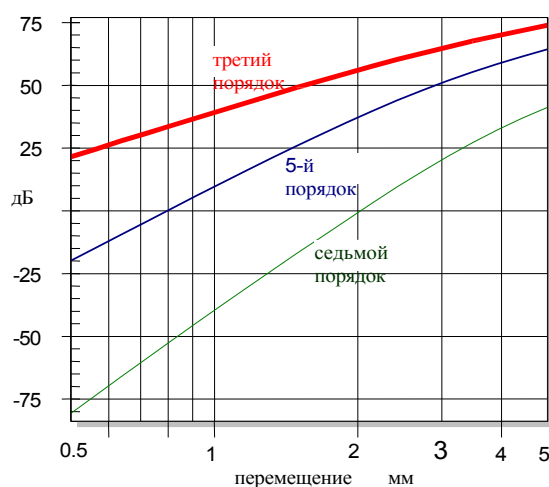


Рисунок 25: Амплитуда компонентов гармонических искажений 3rd, 5th и 7th-го порядка в звуковом давлении в зависимости от смещения для конфигурации равной длины.

Интересно также исследовать зависимость каждого компонента искажений от смещения. На рис. 25 показаны искажения 3rd-, 5th- и 7th-порядка, генерируемые конфигурацией равной длины, в зависимости от смещения в двойном логарифмическом масштабе. Ниже 2 мм все кривые представляют собой почти идеально прямые линии, градиент которых возрастает с увеличением порядка искажения. Это типично для слабонелинейной системы с плавной формой кривой (мягкая нелинейность). Искажения третьего порядка составляют менее 5 %, а компоненты искажений высшего порядка практически незначительны. Область больших сигналов начинается с 3 мм, где начинается сжатие амплитуды и все кривые искажений растут с меньшей скоростью. Из-за петли обратной связи в нелинейном дифференциальном уравнении компоненты искажений уменьшают фундаментальные и нарушают собственный процесс генерации. Даже при смещении 5 мм искажения 7th-го порядка на 25 дБ ниже составляющей 3rd-го порядка.

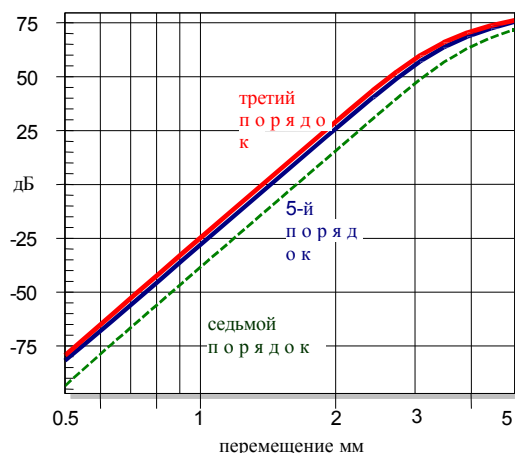


Рисунок 26: Амплитуда компонентов искажений 3rd , 5th и 7th -го порядка в звуковом давлении в зависимости от смещения для катушки с нависанием

На рисунке 26 показано совершенно иное поведение катушки с выступом. Это поведение характерно для жестко ограничивающей нелинейности. В области малых сигналов все кривые также представляют собой прямые линии, но теперь они растут с одинаковой скоростью. Более того, компоненты низкого и высшего порядка вносят практически одинаковый уровень искажений. При $x_{peak} = 3$ мм начинается сжатие амплитуды, что указывает на область больших сигналов. Здесь компоненты искажений также имеют примерно одинаковый порядок величины.

Это моделирование показывает плюсы и минусы двух конфигураций: Катушка с выступом дает гораздо меньше искажений при низких и средних амплитудах (ниже точки начала жесткой ограничивающей нелинейности), в то время как конфигурация равной длины (представляющая мягкую ограничивающую нелинейность) дает искажения низкого порядка при низких амплитудах. При работе громкоговорителя в полном диапазоне больших сигналов, когда катушка наполовину выходит из зазора, нависающая катушка создает гармоники высшего порядка с большей амплитудой, чем катушка равной длины. Поскольку компоненты высшего порядка расположены на большем расстоянии от основных компонентов, они меньше маскируются нашей слуховой системой и, скорее всего, ухудшат субъективно воспринимаемое качество звука.

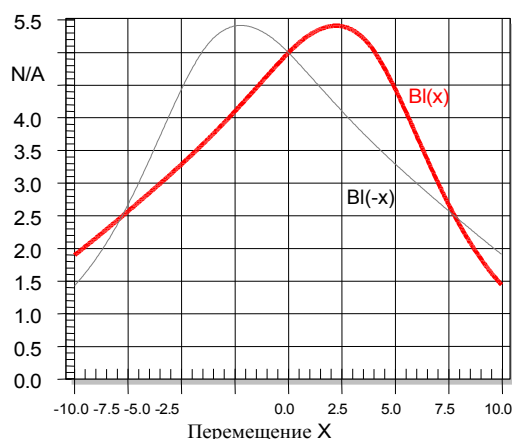


Рисунок 27: Характеристика коэффициента скрученной силы

5.3. Крученые изгибы

Третьей графической особенностью формы кривой является постепенное изменение асимметрии, приводящее к появлению извилистой формы кривой. Например, на рис. 27 показана *B_I-кривая*, имеющая отчетливый максимум при $x=2,5$ мм. Однако коэффициент силы уменьшается с гораздо большей скоростью при положительном смещении, чем при левом наклоне в сторону отрицательного смещения. Так, коэффициент силы ниже при положительном смещении +10 мм, чем при -10 мм. Такая извилистая форма кривой оказывает характерное влияние на искажение, как показано на рисунке

Рисунок 28.

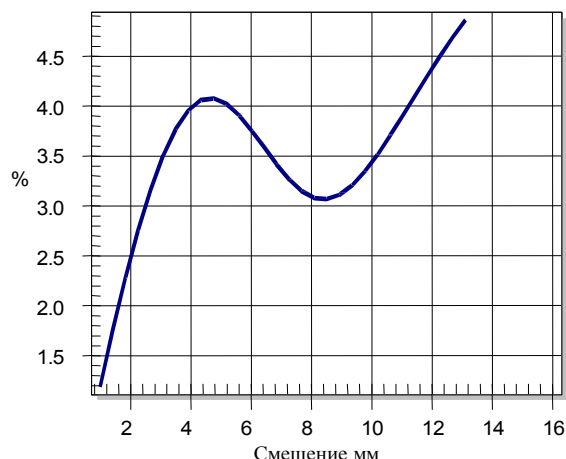


Рис. 28: Гармонические искажения 2nd-го порядка в зависимости от перемещения двигателя с несимметричной характеристикой коэффициента силы, как показано на рис. 27.

При малых смещениях ($x < 4$ мм пик) искажения 2nd-го порядка растут с увеличением смещения, как и ожидалось. Искажения падают при средних амплитудах ($4 \text{ мм} < x < 8$ мм пик) и снова растут при больших амплитудах. Таким образом, если направление асимметрии меняется с изменением смещения, некоторые эффекты могут быть компенсированы. Этот пример также показывает, что измерения искажений на одном уровне амплитуды не могут дать полного описания поведения большого сигнала.

6. СИМПТОМЫ НЕЛИНЕЙНОСТИ ГРОМКОГОВОРТЕЛЕЙ

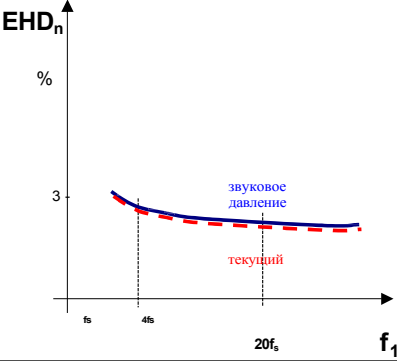
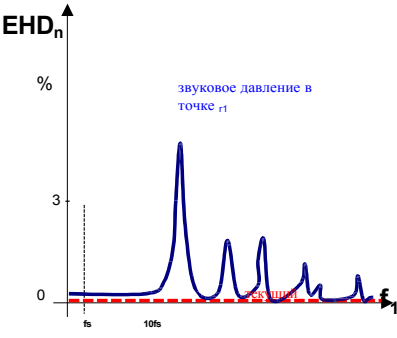
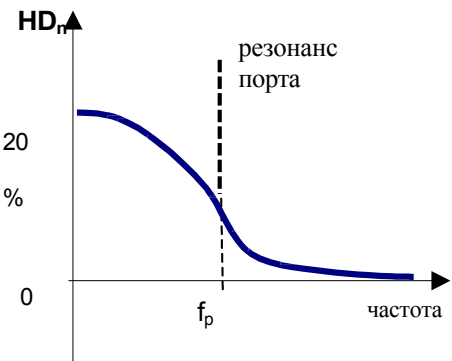
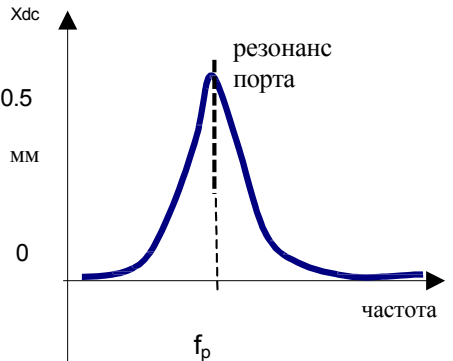
После обсуждения влияния формы нелинейной кривой в целом, физические особенности доминирующих нелинейностей громкоговорителей будут исследованы более подробно. В этом разделе будут приведены характерные симптомы для каждой нелинейности. Таблица 3 предвосхищает результаты последующего обсуждения. Символ креста (X) показывает измерения, которые дают значимые симптомы для конкретной нелинейности. Звездочкой (*) отмечены уникальные симптомы, достаточные для определения причины искажения.

Нелинейности	СИМПТОМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТОЯНИЯ							
	Звуковое давление				Текущий			Перемещение
	<i>HD</i>	<i>IMD</i> (бас)	<i>IMD</i> (голос)	<i>AMD</i> (голос)	<i>HD</i>	<i>IMD</i> (бас)	<i>IMD</i> (голос)	X_{dc}
$K_{ms}(x)$ подвеска (паук +surround)	X							X^*
$Bl(x)$ электродинамический двигатель	X	X	X	X				X^*
$L_e(x)$ положение катушки в зазоре		X	X	X		X^*	X	
$L_e(i)$ "модуляция потока"	X	X	X	X	X^*	X^*	X	
Геометрия конуса и подвеска	X	X	X	X				
Модуль Юнга $E(\varepsilon)$ конус и подвеска	X	X	X	X				
Сопротивление потоку $R_A(v)$ в отверстиях вентилируемых шкафов	X							
Эффект Доплера излучение звуковых волн		X	X					
Распространение звука с крутизной волны при высоком уровне SPL	X		X					

* дает уникальные признаки, достаточные для идентификации нелинейности.

Таблица 3 Характерные признаки, такие как гармонические искажения (*HD*), интермодуляционные искажения (*IMD*), амплитудно-модуляционные искажения (*AMD*), смещение постоянного тока (X_{dc}) доминирующих нелинейностей громкоговорителя (уникальные признаки обозначены ☼)

Нелинейность	Гармонические искажения	Смещение постоянного тока
\mathbf{B} $K_{ms}(x)$		
$Bl(x)$		
$L_e(x)$		

$L_e(i)$		не создано
Разновидность Геометрия или модуль Юнга $E(\varepsilon)$		не создано
Поток сопротивления $R_A(\nu)$ в портах		
Эффект Доплера	Незначительный	не создано

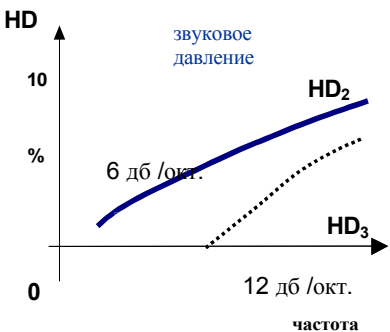
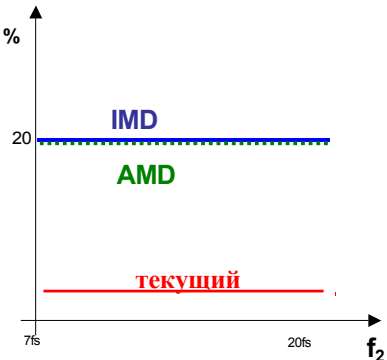
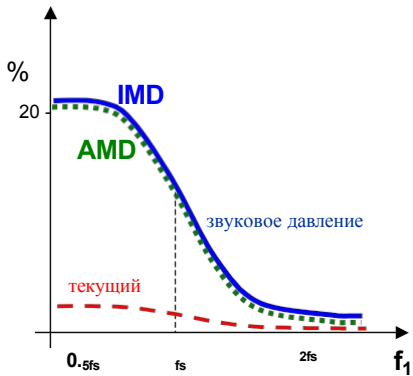
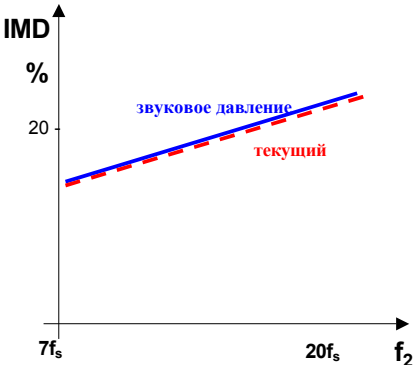
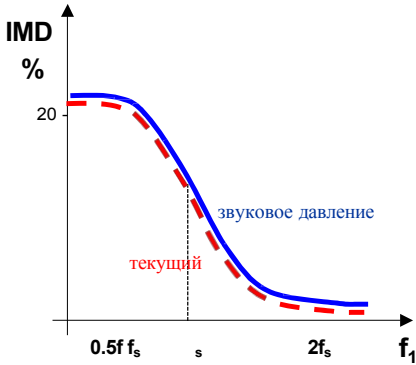
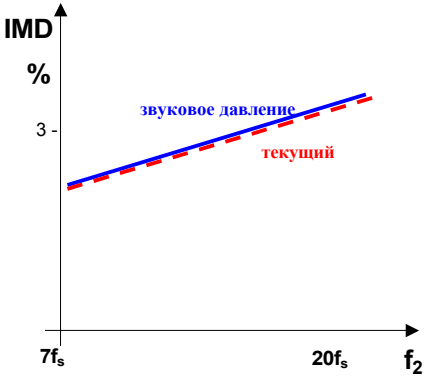
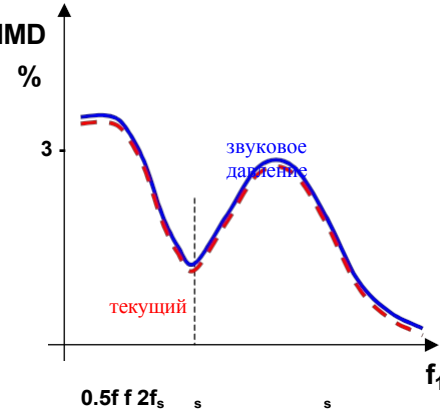
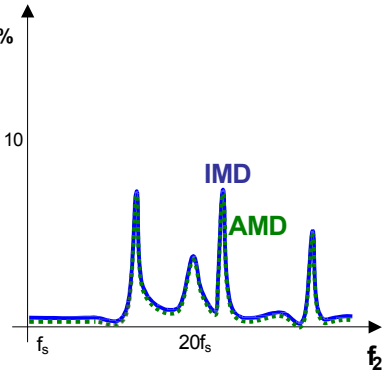
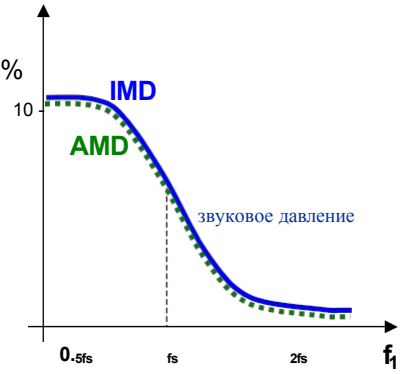
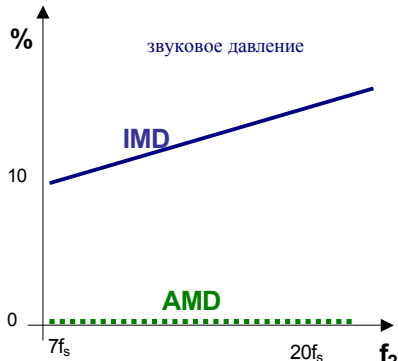
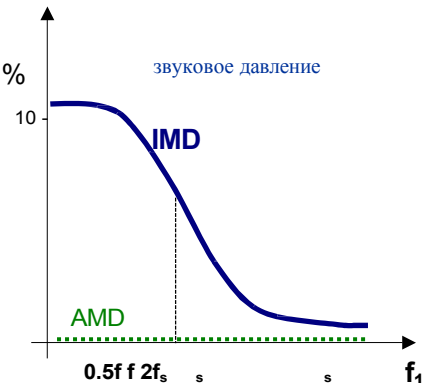
<p>Волна Замедляющийся звук распространение при высоком уровне SPL</p>		<p>не создано</p>
---	---	-------------------

Таблица 4: Характерные частотные характеристики гармонических искажений и постоянного смещения.

Нелинейность	Интермодуляция (развертка голосового тона)	Интермодуляция (развертка басового тона)
$K_{ms}(x)$	Незначительный	Незначительный
$Bl(x)$		
$L_e(x)$		

$L_e(i)$		
Изменение геометрии и коэффициента Юнга модуль $E(\varepsilon)$		
Сопротивление потоку $R_A(v)$ в портах	Незначительный	Незначительный
Допплер Эффект		

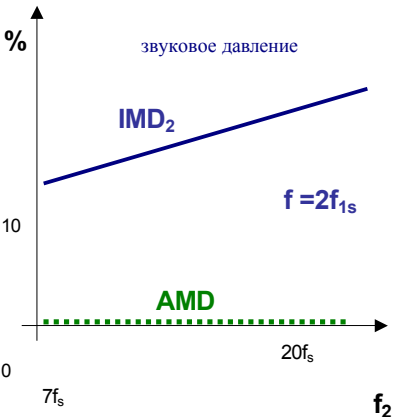
Волна Крутизна звук распростра- ние при высоком уровне SPL		не применимо
---	---	--------------

Таблица 5: Характерная частотная характеристика интермодуляционных искажений.

6.1. Симптомы $K_{ms}(x)$

Из таблицы 1 видно, что восстанавливающая сила $F=K_{ms}(x)x$ подвески является функцией только смещения x . Поскольку смещение представляет собой сигнал с низкочастотной фильтрацией, умножение x на x приведет к появлению компонентов искажений (гармонических и интермодуляционных), которые ограничены низкими частотами (для мягкой ограничивающей подвески ниже $5f_s$). Стимул, состоящий из низкочастотного и высокочастотного тона, не будет создавать значительных интермодуляционных составляющих, поскольку смещение высокочастотного тона слишком мало. Измерения гармонических искажений дают чувствительный, но не единственный признак нелинейности $K_{ms}(x)$, как показано в таблице 3.

Если кривая $K_{ms}(x)$ -кривая несимметрична, то характерным признаком является генерируемое постоянное смещение X_{dc} . Низкие частоты, которые вносят вклад в переменное смещение, вносят вклад в постоянную составляющую, как показано в таблице 4. Смещение постоянного тока $X_{dc}(f_s)$ на резонансной частоте f_s является уникальным признаком K_{ms} -нелинейности. Как будет более подробно рассмотрено ниже, ни одна из других доминирующих нелинейностей не может вызвать значительную dc-компоненту при f_s .

Знак dc-части также является ценной информацией. dc-часть всегда смещает катушку в сторону, где подвеска мягче. Если кривая $K_{ms}(x)$ не закручена, то dc-часть всегда имеет одну и ту же полярность и не зависит от амплитуды и частоты стимула.

6.2. Симптомы $Bl(x)$

Нелинейность $Bl(x)$ - вызывает два эффекта, как показано в таблице 1, а именно нелинейное демпфирование и параметрическое возбуждение. Оба эффекта вызывают высокие гармонические искажения на низких частотах, где смещение, ток и скорость велики. Отклик почти аналогичен отклику, вызванному нелинейностью K_{ms} . Таким образом, измерения гармонических искажений не дают уникальных признаков, позволяющих отличить нелинейность $Bl(x)$ от нелинейности $K_{ms}(x)$.

Однако параметрическое возбуждение приводит к высоким интермодуляционным искажениям в верхнем звуковом диапазоне, если первый тон обеспечивает большое смещение, а второй - достаточный ток. В таблице 5 показана типичная зависимость IMD от частоты f_1 , изменяемой на низких частотах ($0,5f_s < f_1 < 2f_s$) при сохранении тона голоса на $f = 10f_s$. Компоненты IMD , измеренные в выходном звуковом давлении, значительно выше, чем в токовом сигнале. Обе кривые уменьшаются с ростом частоты, поскольку смещение исчезает выше резонанса.

В таблице 5 приведены типичные отклики IMD и AMD , измеренные с помощью альтернативного метода развертки, когда басовый тон находится на частоте $f_1 = 10$ Гц, а голосовой тон изменяется в звуковом диапазоне. Поскольку $Bl(x)$ производит амплитудную модуляцию, оба показателя дают одинаковые значения. Оба значения также не зависят от частоты, поскольку фиксированный басовый тон обеспечивает постоянное смещение пика.

Параметрическое возбуждение также генерирует постоянное смещение, если кривая $Bl(x)$ - несимметрична. Однако знак dc-части зависит от фазы тока и смещения, умноженных друг на друга, и дает типичный отклик, показанный в табл. 4.

Один тон ниже резонанса также генерирует относительно небольшую dc-частицу, которая перемещает катушку в направлении Bl -максимума. Такое поведение может частично компенсировать смещение в положении покоя катушки. dc-частица исчезает в резонансе, где ток и смещение становятся на 90 градусов нефазными. На более высоких частотах поведение самоцентрирования изменяется на противоположное, и катушка имеет тенденцию скользить вниз на обоих склонах кривой $Bl(x)$ -. Даже в идеально симметричной кривой $Bl(x)$ небольшое возмущение может инициировать этот процесс соскакивания катушки. Это говорит о том, что электродинамический преобразователь потенциально нестабилен. Сила постоянного тока, создаваемая двигателем, взаимодействует с жесткостью подвеса при постоянном токе. К сожалению, некоторые материалы подвеса имеют значительно меньшую жесткость при постоянном токе, чем на резонансной частоте f_s [24]. Следовательно, вязкоупругие свойства материала подвеса важны для стабильности конструкции двигателя. Нулевая точка dc-части ($X_{dc} = 0$) при f_s обычно является уникальным признаком $Bl(x)$ -нелинейности. Нулевая точка может быть получена другими нелинейностями ($L_e(x)$ и $K_{ms}(x)$) только в том случае, если кривая закручена или если dc-компоненты двух разных несимметричных нелинейностей гасят друг друга.

6.3. Симптомы $L_e(x)$

Нелинейность $L_e(x)$ - вносит искажения непосредственно в электрическую цепь, которые можно легко обнаружить во входном токе. В соответствии с таблицей 1 эта нелинейность

умножает ток и смещение, которые затем дифференцируются.

Нелинейность $L_e(x)$ - дает относительно низкие гармонические искажения. На низких частотах и ток, и смещение велики, но дифференциатор ослабляет гармоники. На резонансе ток мал, а на высоких частотах смещение исчезает.

Однако двухтональный сигнал может вызывать высокие интермодуляционные искажения, поскольку низкочастотный тон f_1 обеспечивает большое смещение, а высокочастотный f_2 - достаточный ток. Уникальная особенность *$L_e(x)$ -нелинейности* заключается в том, что *IMD*, обнаруженные в токе, равны *IMD*, обнаруженным в выходном звуковом давлении. Это показано в таблице 5, где изменяется низкий тон, а искажения затухают выше резонансной частоты.

В таблице 5 показаны значения *IMD*, измеренные с помощью альтернативного метода развертки, при котором тон голоса изменяется, а тон низких частот остается постоянным. Эта кривая показывает влияние дифференциатора, который вызывает увеличение *IMD* и отклика *AMD* примерно на 6 дБ/октаву.

Сила сопротивления создает уникальный симптом в постоянном смещении, как показано в Таблице 4. Поскольку сила сопротивления пропорциональна квадрату входного тока, она становится минимальной на резонансной частоте f_s . Более того, сила и результирующее смещение постоянного тока не меняют знака, пока форма кривой $L_e(x)$ не искажается.

6.4. Симптомы $L_e(i)$

Изменение проницаемости, выражаемое изменяющейся по току индуктивностью $L_e(i)$, приводит к умножению токовых сигналов перед дифференцированием, как показано в таблице 1. Измерение интермодуляционных искажений при изменении частоты низких тонов выявило уникальный симптом. Характеристика *IMD* имеет характерный минимум на резонансной частоте f_s , как показано в таблице 5. Искажения *IMD* и гармонические искажения на более высоких частотах, измеренные в звуковом давлении и токе, также идентичны. В отличие от нелинейностей, изменяющих смещение ($Bl(x)$, $K_{ms}(x)$ и $L_e(x)$), эта нелинейность также может создавать значительные гармонические искажения (*HD*, *THD*) как во входном токе, так и в выходном звуковом давлении, как показано в таблице 4. Однотональные гармонические искажения в токе и звуковом давлении сопоставимы после преобразования обоих результатов в эквивалентные входные искажения (*EHD*).

6.5. Симптомы изменения геометрии конуса

Этот механизм напрямую связан с возникновением режимов разрушения. Таким образом, компоненты искажений генерируются на относительно высоких частотах ($>10f_s$). Искажения можно легко измерить на акустическом выходе, но они едва различимы на входном токе. Сравнение обоих измерений может быть полезным для разделения нелинейностей двигателя. Максимумы в частотной характеристике эквивалентных гармонических искажений на входе (*EHID*) соответствуют режимам пробоя с высокой амплитудой.

Сканирование поверхности диффузора и подвеса и измерение искажений непосредственно в механической системе позволило бы глубже понять нелинейный процесс.

Интермодуляция между низкочастотным и высокочастотным тоном - это в основном амплитудная модуляция. Изменение геометрии подвеса изменяет механический импеданс на конце диффузора и оказывает значительное влияние на амплитуду определенных мод.

6.6. Симптомы нелинейного Е-модуля

Изменение модуля Юнга E вызывает такие же симптомы, как и изменение геометрии диффузора и подвеса. Измерение гармонических искажений в выходном звуковом давлении дает значительные симптомы.

При измерениях интермодуляции следует избегать низкочастотной составляющей, поскольку низкие частоты вызывают значительную деформацию геометрии корпуса, которая доминирует над нелинейностью материала.

6.7. Симптомы нелинейности порта

Для оценки эффективности порта вентилируемая акустическая система возбуждается на резонансной частоте порта (резонанс Гельмгольца), когда объемная скорость q максимальна, а смещение громкоговорителя минимально. Гармонические искажения измеряются в выходном звуковом давлении на расстоянии 1 м, чтобы получить хорошее соотношение сигнал/шум. На измерения, проводимые ближе к порту, может повлиять конвекция воздуха. Чтобы отделить влияние порта от других нелинейностей громкоговорителя, смещение диффузора также измеряется с помощью лазерной системы. Эквивалентные гармонические искажения на входе, рассчитанные по сигналу звукового давления, и смещение становятся сопоставимыми, а разница показывает вклад порта. Гармоники третьего порядка обычно доминируют, если геометрия порта симметрична. Измерения интермодуляционных искажений не дают уникальных симптомов.

6.8. Симптомы эффекта Доплера

Измерение гармонических искажений не подходит для обнаружения эффекта Доплера. Один тон сигнала не может обеспечить достаточное смещение и малую длину волны для создания значительного фазового сдвига. Эффект Доплера можно легко обнаружить, выполнив измерение интермодуляции с изменяющимся тоном голоса, как показано в таблице 5. Как и в случае с нелинейностью $L_e(x)$ - интермодуляция возрастает на 6 дБ на октаву к более высоким частотам. Однако эффект Доплера вызывает только фазовую модуляцию, а значение амплитудной модуляции (AMD) невелико. Очевидно, что эффект Доплера не может вызвать искажений в смещении и во входном токе.

6.9. Симптомы крутизны волны

Нелинейное распространение звука связано с умножением компонентов звукового давления. Таким образом, эта нелинейность порождает не только интермодуляцию, но и значительные гармоники. Это уникальный признак, который отличает эффект Доплера от крутизны волны. Искажения 2-го порядкаnd

возрастает на 6 дБ на октаву, в то время как искажения 3rd-го порядка обычно растут с большей скоростью, поскольку они формируются из компонентов 2nd-го порядка путем дополнительного умножения и дифференцирования в следующих рупорных секциях [14] .

7. ПРАКТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Взаимодействие и наложение различных эффектов рассматривается на примере трех реальных акустических систем:

7.1. Динамик 1 со смещением катушки

Первый громкоговоритель представляет собой 6-дюймовый НЧ-динамик, предназначенный для высококачественного потребительского применения. Характеристика силового фактора $Bl(x)$, показанная на рис. 29, обнаруживает отчетливую область плато, соответствующую свесу звуковой катушки около 6 мм. .

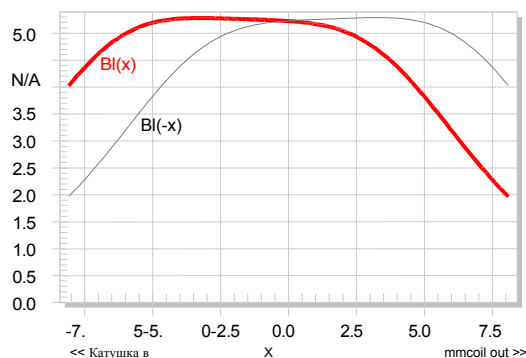


Рисунок 29: Измеренный коэффициент силы $Bl(x)$ в зависимости от смещения динамика 1 (пунктирная кривая показывает зеркальное отражение $Bl(-x)$ -характеристик)

Оптимальное положение покоя звуковой катушки можно определить, изучив симметрию Bl -характеристики на рисунке 30. Предполагая синусоидальное смещение заданной амплитуды, катушка не будет иметь одинаковых значений Bl -характеристик при положительном и отрицательном пике смещения, если кривая несимметрична. Сместив катушку (смещение) к точке симметрии (красная пунктирная линия на рис. 30), можно добиться одинаковых значений Bl -значений при положительном и отрицательном пике для определенной амплитуды. Если точка симметрии не зависит от амплитуды, то асимметрия может быть полностью компенсирована постоянным смещением звуковой катушки. Однако может потребоваться компромисс, как в примере, показанном на рис. 30, где точка симметрии изменяется от -3 мм при низких амплитудах до -2 мм при более высоких амплитудах. Область симметрии (серая область) показывает, где потенциальное смещение для данной амплитуды создает небольшие асимметричные отклонения ($< 5\%$), которые являются приемлемыми. При малых амплитудах, когда кривая $Bl(x)$ имеет плато, область симметрии широкая, что указывает на то, что положение катушки навесания здесь не критично. При больших амплитудах

звуковая катушка должна быть смещена на отрицательную величину (около -2 мм), чтобы катушка выходила из зазора симметрично.

Положение покоя звуковой катушки в зазоре оптимально, если пунктирная линия, обозначающая положение покоя (смещение=0), находится в области симметрии (серая область). Если это не так, то точка симметрии дает некоторое указание на смещение звуковой катушки.

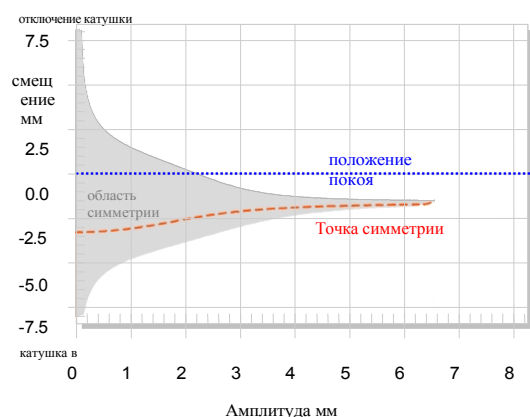


Рисунок 30: Точка симметрии (красная пунктирная линия) и область симметрии (серая область) показывают смещение в положении покоя катушки динамика 1.

Кривая жесткости, показанная на рис. 31, также имеет небольшую асимметрию, а $K_{ms}(x)$ увеличивается при отрицательных отклонениях в два раза по сравнению с положительными значениями. После удаления 80 % материала окружения измеренная жесткость оставшегося паука была почти симметричной.

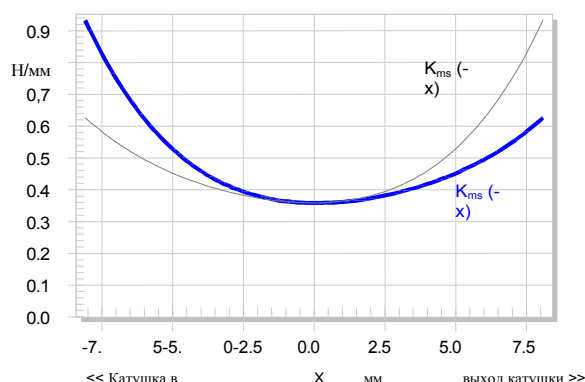


Рисунок 31: Зависимость жесткости $K_{ms}(x)$ от перемещения x динамика 1 (пунктирная кривая показывает зеркальное отображение). $K_{ms}(-x)$ -характеристика)

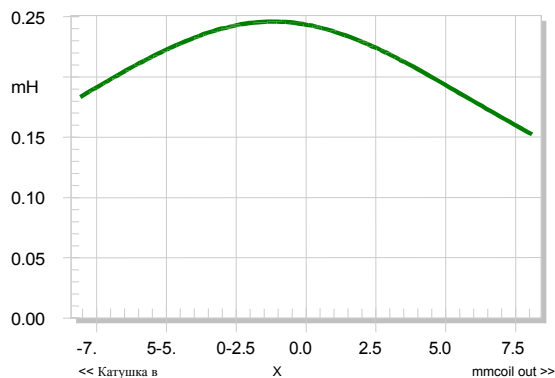


Рисунок 32: Индуктивность $L_e(x)$ в зависимости от смещения x динамика 1

На рис. 32 показана почти симметричная форма $L_e(x)$, что не характерно для данного типа драйверов. Отсутствующее увеличение при отрицательном смещении указывает на то, что под зазором используется замыкающее кольцо. Оставшийся максимум индуктивности при $x=0$ может быть уменьшен путем установки дополнительного колпачка на полюсный наконечник. Однако общее значение индуктивности невелико (по сравнению с $R_e = 3,5 \text{ Ом}$) и не приведет к существенному изменению входного импеданса.

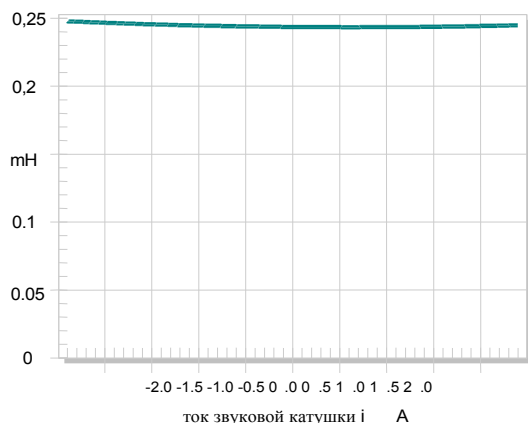


Рисунок 33: Индуктивность $L_e(i)$ в зависимости от тока i динамика 1

Изменение индуктивности звуковой катушки $L_e(i)$, как показано на рис. 33, показывает, что проницаемость магнитного пути почти постоянна. Здесь постоянное поле, создаваемое магнитом, намного выше, чем поле переменного тока, создаваемое катушкой.

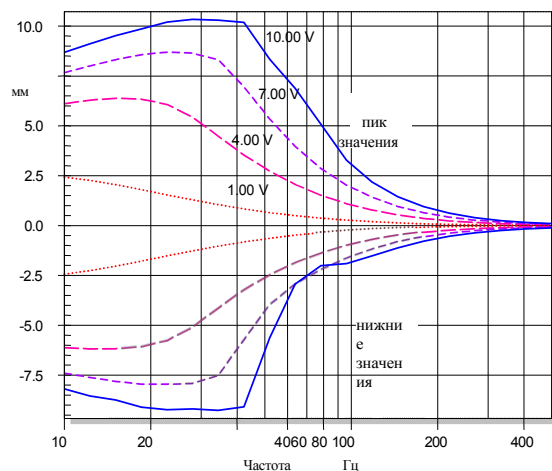


Рисунок 34: Измеренное пиковое и нижнее значение смещения звуковой катушки динамика 1 в зависимости от частоты, измеренное при четырех напряжениях

На рисунке 34 показаны пиковые и нижние значения смещения звуковой катушки, измеренные при четырех различных напряжениях лазерным измерителем смещения. Форма кривых меняется в зависимости от входного напряжения. При $U=1\text{ В}$ максимум смещения находится далеко за пределами резонанса из-за высокого электрического демпфирования и низкого коэффициента общих потерь Q_{ts} драйвера. Однако при высоких напряжениях электрическое демпфирование уменьшается (с $1/Bl(x)^2$), а Q_{ts} становится больше 1. На частотах, расположенных немного выше резонанса, нижнее значение застывает на уровне -2,5 мм, в то время как пиковые значения быстро растут с увеличением входного напряжения. Это соответствует постоянному току, генерируемому в смещении. Более подробно это исследовано на рисунке 35.

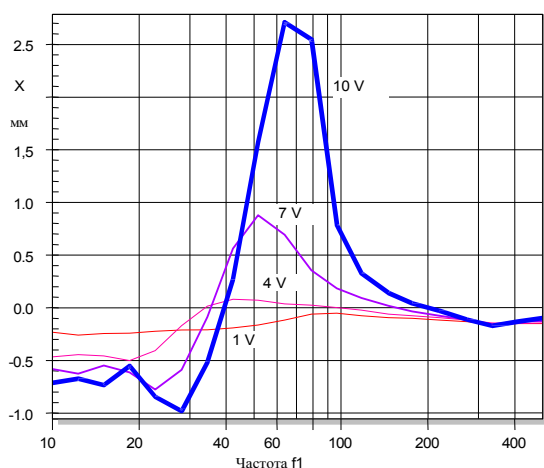


Рисунок 35: Измеренное постоянное смещение динамика 1, измеренное в зависимости от частоты и при четырех напряжениях

Знак постоянной составляющей меняется на резонансной частоте $f_s = 35 \text{ Гц}$. Для частот ниже f_s постоянная часть составляет около $-0,5 \text{ мм}$ и остается почти постоянной для высоких амплитуд переменного сигнала. Здесь асимметрия $Bl(x)$ создает силу постоянного тока, которая перемещает катушку в направлении *максимума* Bl . На частотах выше f_s последствия смещения звуковой катушки становятся очевидными. Постоянная составляющая становится положительной и быстро растет с увеличением амплитуды (*эффект выпрыгивания катушки*). Асимметрия жесткости $K_{ms}(x)$, как показано на рис. 31, создает положительный вклад в dc-часть, а индуктивность $L_e(x)$ - отрицательный dc. Однако обе части пренебрежимо малы по сравнению с dc-частью, генерируемой $Bl(x)$.

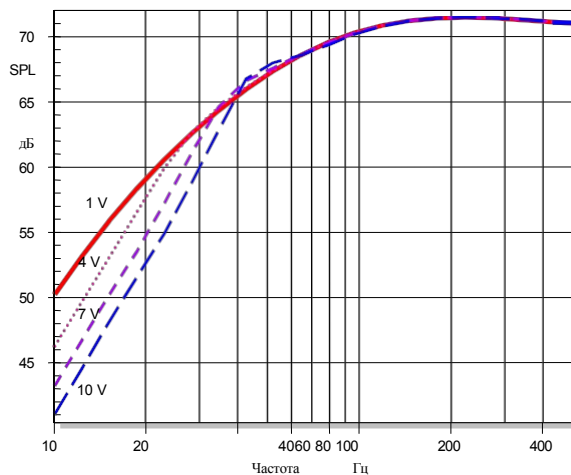


Рисунок 36: Отклик звукового давления $P_r(f, U_i)$, измеренный при четырех напряжениях (с шагом 3 В), которые относятся к $U_i = 1 \text{ В}$, чтобы выявить амплитудное сжатие фундаментального сигнала в динамике 1.

На рисунке 36 показана частотная характеристика фундаментального сигнала звукового давления, измеренная при четырех напряжениях, но отнесенная к измерению в области малых сигналов ($U_i = 1 \text{ В}$) в соответствии с уравнением (1). Поскольку увеличение напряжения компенсируется, это представление показывает непосредственно сжатие мощности. На более высоких частотах, где смещение становится малым, сжатия не происходит, и чувствительность остается постоянной. Если время измерения увеличится, нагрев катушки вызовет дополнительное сжатие амплитуды (тепловой эффект). На низких частотах SPL снижается на 8 дБ из-за нелинейных эффектов. В резонансе исчезающее электрическое демпфирование вызывает отрицательную компрессию, и громкоговоритель выдает большую мощность.

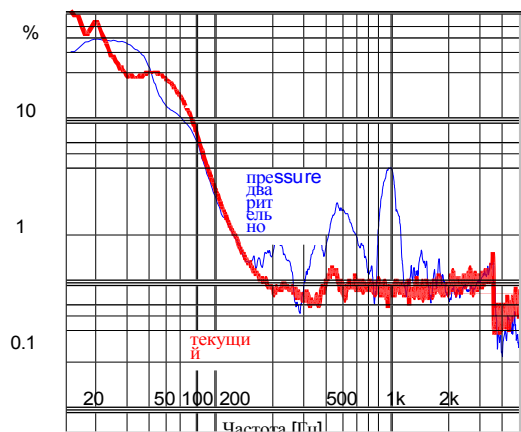


Рисунок 37: Эквивалентные суммарные гармонические искажения на входе (*ETHD*), измеренные в выходном звуковом давлении (тонкая кривая) и в токе звуковой катушки (толстая кривая) динамика 1

Коэффициент силы $Bl(x)$ и жесткость $K_{ms}(x)$, изменяющиеся в зависимости от смещения, создают высокие суммарные гармонические искажения в выходном звуковом давлении и в токе звуковой катушки. Для сравнения обоих сигналов используется понятие эквивалентного искажения входного сигнала в соответствии с уравнением (8). Компоненты искажений, измеренные в выходном звуковом давлении и токе, преобразуются во входной сигнал (который является напряжением для обычного усилителя с низким выходным сопротивлением) и представлены на рис. 37 в виде тонкой и толстой кривых, соответственно. На высоких частотах ($f > 200$ Гц) составляющие искажений в токе очень малы (менее 0,5 %) и обусловлены *нелинейностью* $L_e(i)$. Другие нелинейности ($Bl(x)$, $L_e(x)$ и $K_{ms}(x)$) зависят от смещения и не могут генерировать значительные гармонические искажения. На определенных частотах, например, 400 и 800 Гц, нелинейности в механической области (разрушение конуса) создают дополнительные искажения, которые мешают искажениям, обнаруженным в токе. Аннулирование двух составляющих искажений происходит только на частоте 250 Гц, но обе составляющие обычно увеличивают суммарные искажения на других частотах.

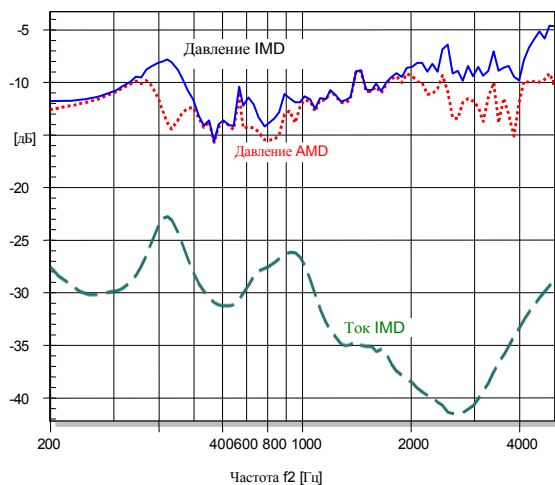


Рисунок 38: Общие интермодуляционные искажения (IMD_{Total}) динамика 1, измеренные в звуковом давлении и в токе звуковой катушки, и амплитудно-модуляционные искажения (AMD) в звуковом давлении в зависимости от частоты f_2 голосового тона (постоянный низкий тон $при f_1 = 10$ Гц).

На рисунке 38 показаны интермодуляционные искажения, измеренные с помощью двухтонального стимула, состоящего из голосового тона с переменной частотой f_2 и басового тона с фиксированной частотой $f_1 = 10$ Гц. Общий интермодуляционный IMD_{total} , измеренный в выходном звуковом давлении и показанный тонкой линией, на 20 дБ выше, чем интермодуляция, обнаруженная во входном токе, который показан пунктирной линией. Таким образом, интермодуляционные составляющие, вызванные $L_e(x)$ и $L_e(i)$, практически пренебрежимо малы по сравнению с вкладом других нелинейностей.

На рисунке 38 также видно, что компоненты интермодуляционных искажений ниже 2 кГц вызваны амплитудной модуляцией (AM). На частотах ниже 400 Гц значения AMD и ИМД почти постоянны, что типично для $Bl(x)$ -нелинейности, как показано в таблице 5. На частоте 400 Гц диффузор совершает первые частичные колебания, которые модулируются изменяющейся геометрией окружения. Выше 2 кГц искажения нарастают за счет частотной модуляции.

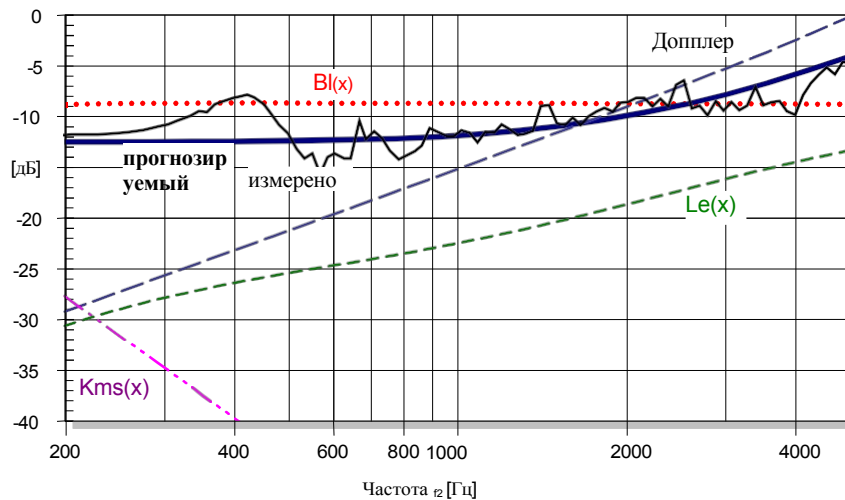


Рисунок 39: Измеренные и прогнозируемые интермодуляционные искажения (IMD_{total}) динамика 1 в сравнении с вкладом каждой нелинейности (подметание *голосового тона*).

Дополнительное представление о генерации интермодуляционных искажений можно получить с помощью инструмента моделирования (SIM2) Distortion Analyzer [26], где можно предсказать общую интермодуляцию и систематически исследовать вклад каждой нелинейности.

Предсказанные и измеренные кривые, как показано на рисунке 39, очень хорошо согласуются. Нелинейная вибрация диффузора не учитывается в модели, но ее можно легко отделить от нелинейности двигателя и подвески. Учитывая вклад только $Bl(x)$ и отключив все остальные нелинейности ($K_{ms}(x)=const.$, $L_e(x,i)=const.$, ...), рассчитанные искажения IMD представлены в виде пунктирной кривой. Эта кривая постоянна в соответствии с теоретической формой, представленной в таблице 5, и имеет тот же порядок величины, что и предсказанная кривая с учетом всех нелинейностей. Искажения ниже 2 кГц могут быть значительно уменьшены путем смещения положения покоя катушки

1,5 мм по направлению к задней пластине. Выше 2 кГц эффект Доплера становится доминирующим и вызывает значительную фазовую модуляцию, показанную пунктирной линией в таблице 5. Однако фазовая модуляция оказывает меньшее влияние на воспринимаемое качество звука, чем амплитудная модуляция, которая воспринимается как неприятная шероховатость воспроизводимого сигнала.

Прогнозируемая интермодуляция, генерируемая $L_e(x)$, соответствует малым значениям входного тока на рисунке 38.

Низкие значения IMD жесткости $K_{ms}(x)$ согласуются с данными таблицы 3, показывая, что интермодуляционные искажения не являются существенным признаком нелинейности подвески.

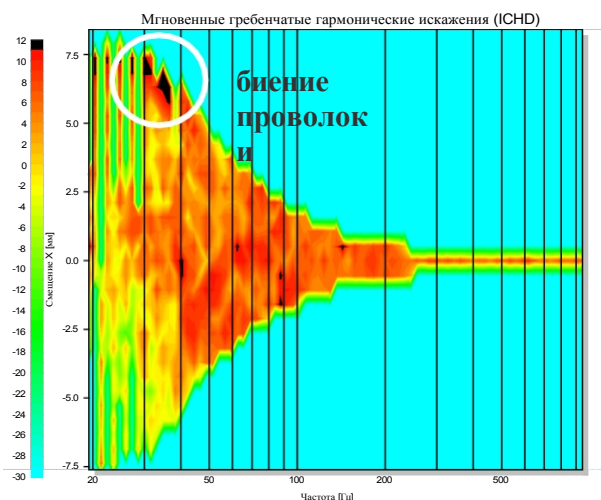


Рисунок 40: Измеренный мгновенный коэффициент гребня гармонических искажений (с цветовой маркировкой), построенный в зависимости от частоты и смещения звуковой катушки

Наконец, громкоговоритель проверяется на наличие переходных и импульсных искажений, которые имеют высокое пиковое значение, но относительно низкое *среднеквадратичное значение*. На рисунке 40 показан мгновенный коэффициент гребня *ICHG*, который кодируется цветом и отображается в зависимости от частоты (ось x) и смещения (ось y). Ниже 7 мм коэффициент гармонических искажений составляет менее 10 дБ (от синего к красному), что характерно для обычных нелинейностей в двигателе, подвеске или диффузоре. Однако при большом положительном смещении, возникающем на низких частотах ($f < 40$ Гц), коэффициент гребня превышает 10 дБ (становится черным), что указывает на нелинейный механизм, вызывающий короткие щелчки при определенном положении катушки. Дальнейшее изучение динамика показало, что в этой точке гибкие провода задевают диффузор.

7.2. Динамик с проблемой подвески

Динамик 2 - это 5-дюймовый НЧ-динамик, который также предназначен для потребительского применения.

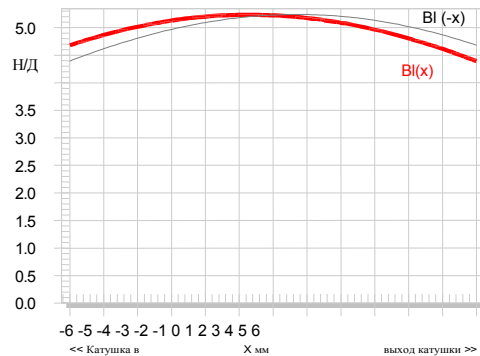


Рисунок 41: Силовой фактор $Bl(x)$ в зависимости от смещения динамика 2 (тонкая кривая показывает зеркальное отображение $Bl(-x)$ -характеристика)

Силовой фактор $Bl(x)$, показанный на рис. 41, имеет относительно линейную форму благодаря высокому выступу катушки. Кривая не имеет плато, а постепенно затухает, поскольку поле бахромы вне зазора намного выше, чем в колонке 1.

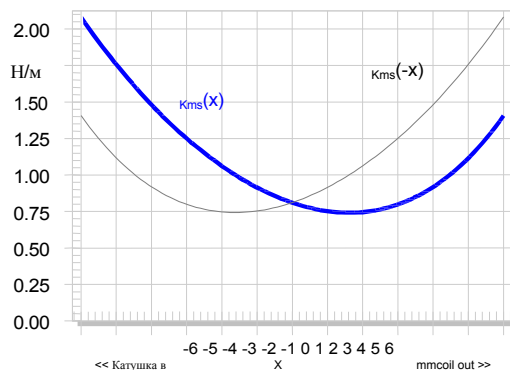


Рисунок 42: Зависимость жесткости $K_{ms}(x)$ от перемещения x колонки 2 (тонкая кривая показывает зеркальное отражение $K_{ms}(-x)$ -характеристик).

Кривая жесткости на рисунке 42 имеет сильную асимметрию. Это доказывает паук, поскольку аналогичная кривая наблюдается при втором измерении после удаления 80 % материала окружения.

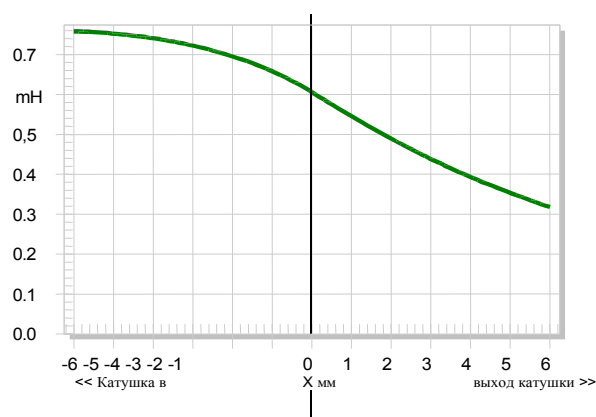


Рисунок 43: Индуктивность $L_e(x)$ в зависимости от смещения x динамика 2

Индуктивность $L_e(x)$ также несимметрична и возрастает при отрицательном отклонении катушки к задней пластине. Это характерно для двигателя без замыкающего материала. В то время как индуктивность $L_e(x)$ в зависимости от смещения изменяется на 100 %, индуктивность $L_e(i)$ в зависимости от входного тока i на рисунке 44 изменяется только на 10 %.

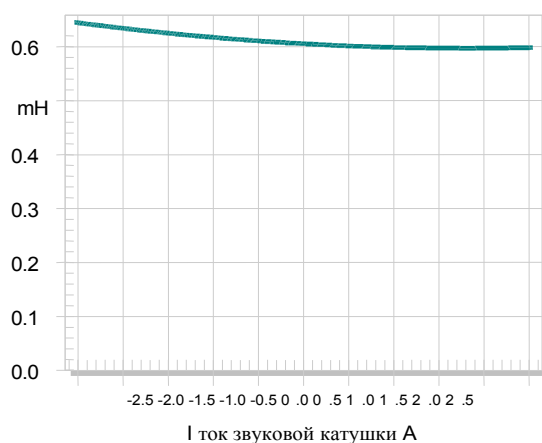


Рисунок 44: Индуктивность $L_e(i)$ в зависимости от тока i громкоговорителя 2

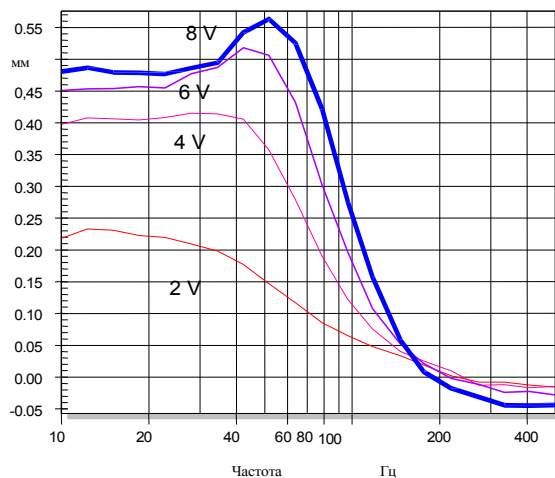


Рисунок 45: Измеренное постоянное смещение в зависимости от частоты, измеренное при четырех различных напряжениях громкоговорителя 2

Измеренное постоянное смещение, как показано на рисунке 45, согласуется с асимметрией, обнаруженной в нелинейных параметрах. Асимметричная жесткость создает положительное смещение, поскольку подвеска гораздо мягче при положительном смещении, чем при отрицательном. Смещение постоянного тока становится максимальным на резонансной частоте, где амплитуда тока минимальна и другие нелинейности дают меньший вклад в dc-часть. На более высоких частотах асимметрия жесткости не может создать значительную dc-часть, поскольку смещение мало. Только сила сопротивления генерирует небольшое отрицательное dc-смещение в этом диапазоне частот и перемещает катушку в отрицательном направлении, где индуктивность $L_e(x)$ становится больше.

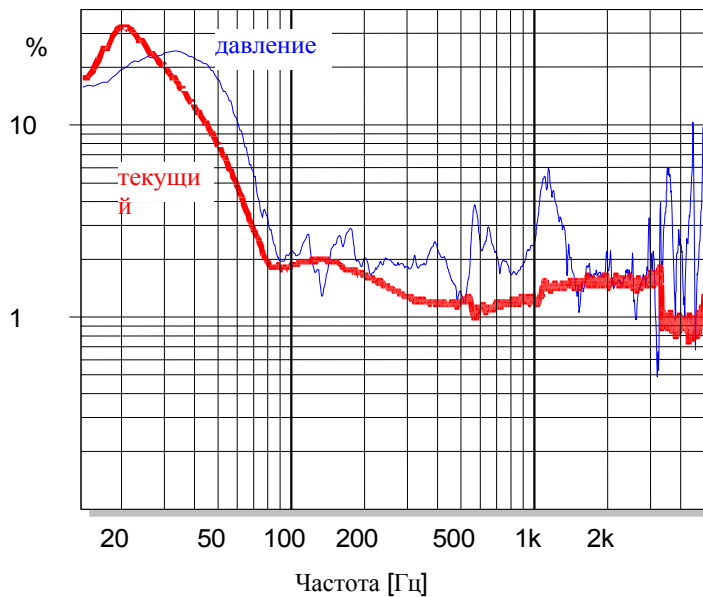


Рисунок 46: Эквивалентное полное гармоническое искажение входного сигнала (*ETHD*), измеренное в выходном звуковом давлении (тонкая кривая) и в токе звуковой катушки (толстая кривая) громкоговорителя 2

На рисунке 46 сравниваются гармонические искажения, обнаруженные во входном токе и в выходном звуковом давлении. На резонансной частоте и ниже большая часть гармонических искажений, обнаруженных в токе и звуковом давлении, вызвана нелинейной подвеской. Для частот выше 80 Гц нелинейная индуктивность $L_e(i)$ на рисунке 44 создает 1 ... 2 % во входном токе. Искажения, измеренные в отклике звукового давления, показывают вклад других нелинейностей, изменяющих смещение ($Bl(x)$, $L_e(x)$ и $K_{ms}(x)$) ниже 1000 Гц и помехи от нелинейной вибрации диффузора на более высоких частотах.

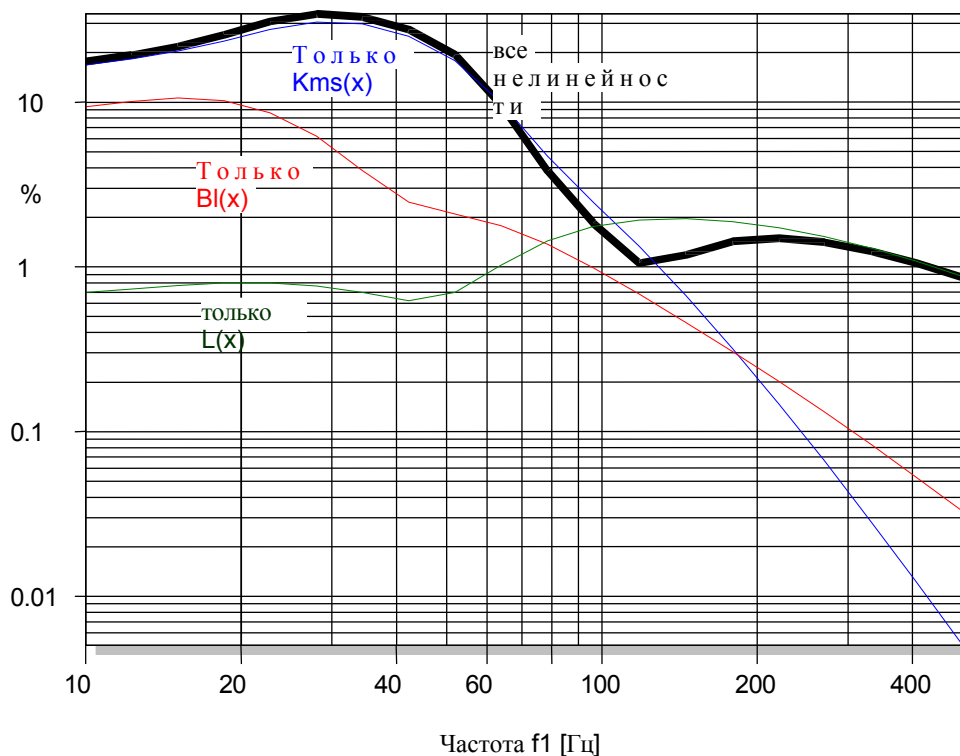


Рисунок 47: Эквивалентные суммарные гармонические искажения на входе, предсказанные с использованием всех нелинейностей (сплошная кривая), в выходном звуковом давлении (тонкая кривая) и в токе звуковой катушки (толстая кривая) громкоговорителя 2.

Выявленные нелинейные параметры позволяют более детально исследовать вклад каждой нелинейности. На рисунке 47 показано, что жесткость $K_{ms}(x)$ является доминирующей причиной *ETHD*. Силовой фактор $Bl(x)$ дает лишь 10 % искажений, а индуктивность $L_e(x)$ - 1 -2 %.

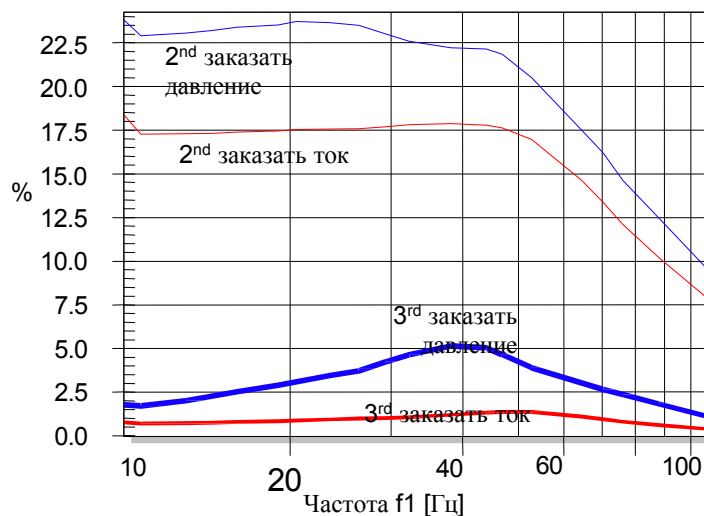


Рисунок 48: Интермодуляционные искажения 2nd - порядка и 3rd - порядка, измеренные в токе звуковой катушки и выходном звуковом давлении громкоговорителя 2 (изменяющийся низкий тон, $f_2 = 500$ Гц).

На рисунке 48 показан высокий уровень интермодуляционных искажений 2nd порядка $IMD_2 \approx 20$ %. Это обусловлено нелинейностью $L_e(x)$ -сигнала, поскольку в сигналах тока и давления наблюдаются практически одинаковые значения и отсутствует провал на резонансной частоте f_s . Из-за несимметричной формы $L_e(x)$ составляющая 2nd-порядка IMD_2 значительно выше составляющей 3rd-порядка IMD_3 .

7.3. Громкоговоритель 3 с модуляцией потока

Громкоговоритель 3 - это 12-дюймовый динамик, предназначенный для автомобильного применения. На рисунке 49 показана очень симметричная характеристика $Bl(x)$, которая практически постоянна вплоть до пикового значения 15 мм.

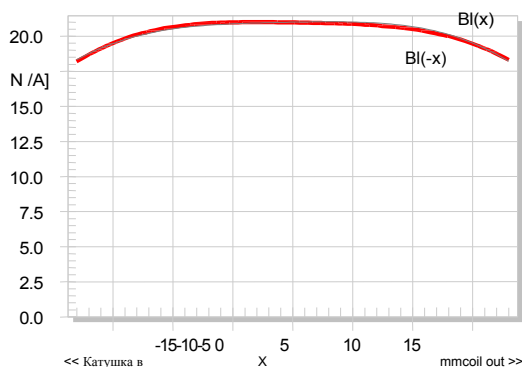


Рисунок 49: Силовой фактор $Bl(x)$ в зависимости от смещения громкоговорителя 3 (тонкая кривая показывает зеркальное отражение $Bl(-x)$ -характеристика)

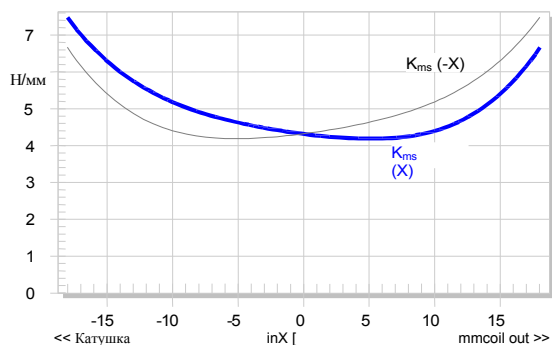


Рисунок 50: Зависимость жесткости $K_{ms}(x)$ от смещения x громкоговорителя 3 (тонкая кривая показывает зеркальное отражение). $K_{ms}(-x)$ -характеристика)

Жесткость $K_{ms}(x)$ подвески, как показано на рисунке 50, также почти симметрична. Окружение из толстого резинового материала вызывает небольшую асимметрию. Однако индуктивность звуковой катушки значительно изменяется в зависимости от смещения и тока, как показано на рис. 51 и рис. 52, соответственно.

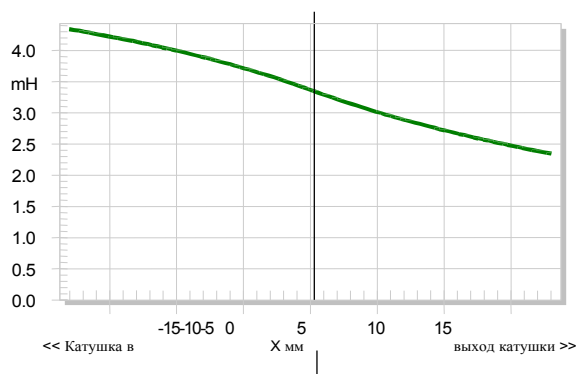


Рисунок 51: Индуктивность $L_e(x)$ в зависимости от смещения x громкоговорителя 3

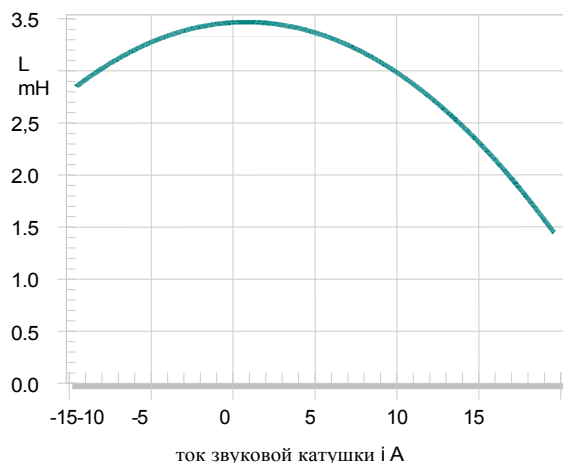


Рисунок 52: Индуктивность $L_e(i)$ в зависимости от тока i громкоговорителя 3

Асимметричная форма характерна для двигателя без замыкающего материала. Индуктивность 3,5 мГ доминирует над входным электрическим сопротивлением на высоких частотах. Во время измерения параметров большого сигнала (LSI) пиковое значение тока и смещения превышало 15 ампер и 18 мм соответственно, что вызвало значительные изменения входного электрического импеданса на высоких частотах. Характеристика $L_e(x)$ более асимметрична, чем $L_e(i)$.

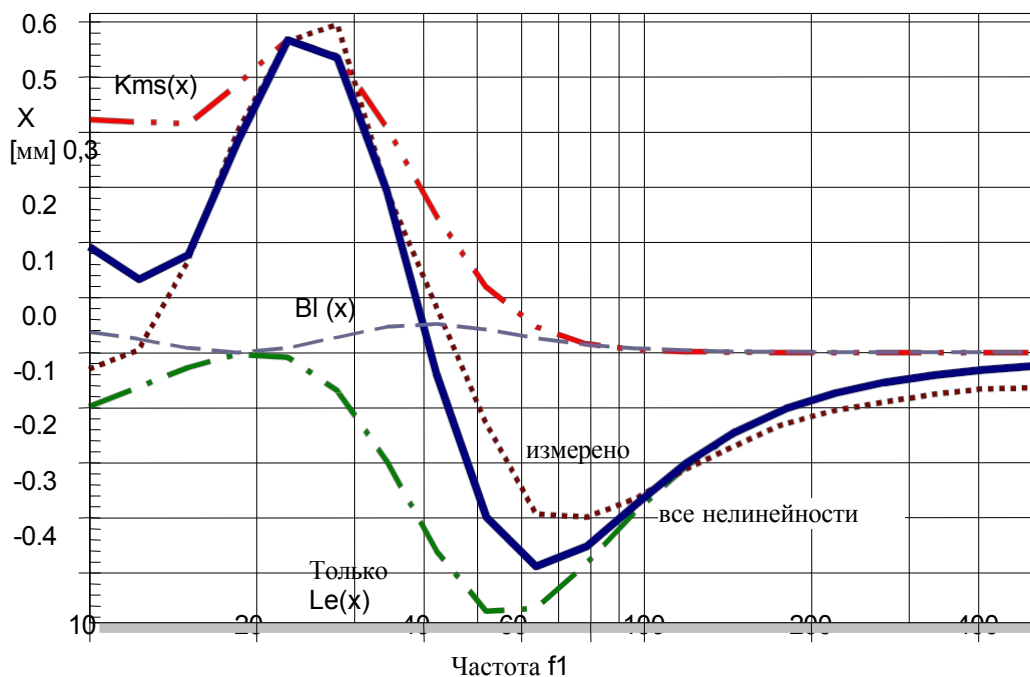


Рисунок 53: зависимость постоянного смещения от частоты, измеренная (пунктирная линия) и предсказанная с учетом всех нелинейностей (толстая линия) и вклада каждой нелинейности $Bl(x)$, $K_{ms}(x)$ и $L_e(x)$ громкоговорителя 3.

На рисунке 53 показана частотная характеристика постоянного смещения, измеренного датчиком и предсказанного с помощью параметров большого сигнала в программе моделирования (SIM) [25]). На резонансной частоте 25 Гц положительная dc-часть 0,6 мм вызвана подвеской, которая мягче для положительного, чем для отрицательного смещения, как показано на рисунке 50. Симметричная характеристика $Bl(x)$ практически не генерирует dc-частицы. Однако асимметричная индуктивность $L_e(x)$ на рисунке 51 генерирует отрицательную постоянную составляющую ниже и выше f_s . На очень низких частотах (10 Гц) отрицательная постоянная составляющая индуктивности уменьшает положительную постоянную составляющую, генерируемую подвесом. На более высоких частотах (80 Гц), где ток снова становится большим, но смещение мало, сила сопротивления доминирует над общим постоянным смещением. Нулевая точка ($X_{dc}=0$) на частоте 50 Гц не порождается асимметричной $Bl(x)$, а вызвана взаимодействием двух несимметричных нелинейностей.

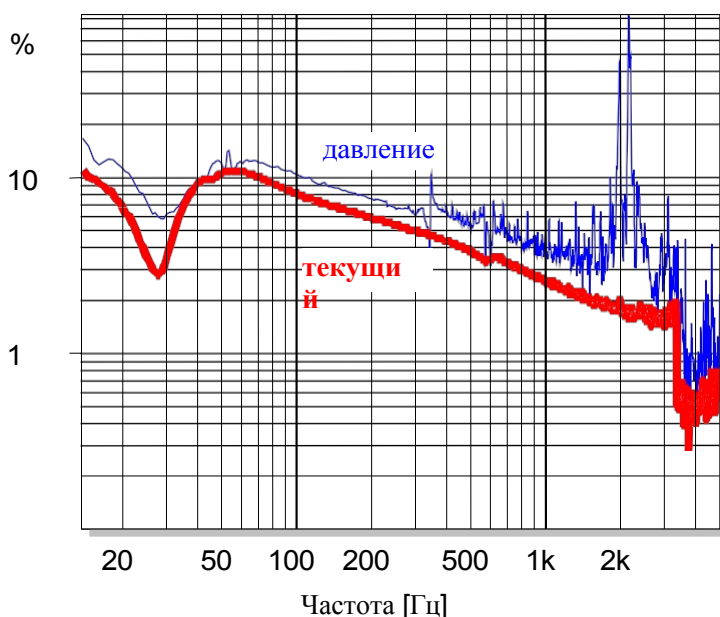


Рисунок 54: Эквивалентное полное гармоническое искажение входного сигнала ($ETHD$), измеренное в выходном звуковом давлении (тонкая кривая) и в токе звуковой катушки (толстая кривая) громкоговорителя 3

Суммарные гармонические искажения, измеренные в выходном звуковом давлении и входном токе, представлены как эквивалентные входные искажения $ETHD$ на рисунке 54. Высокая нелинейность индуктивности $L_e(i)$ создает высокие искажения во входном токе (10% на частоте 50 Гц), которые доминируют в звуке.

выходное давление. На частоте 2 кГц диффузор демонстрирует нелинейные колебания, но эта частота находится далеко за пределами предполагаемого рабочего диапазона автомобильного сабвуфера.

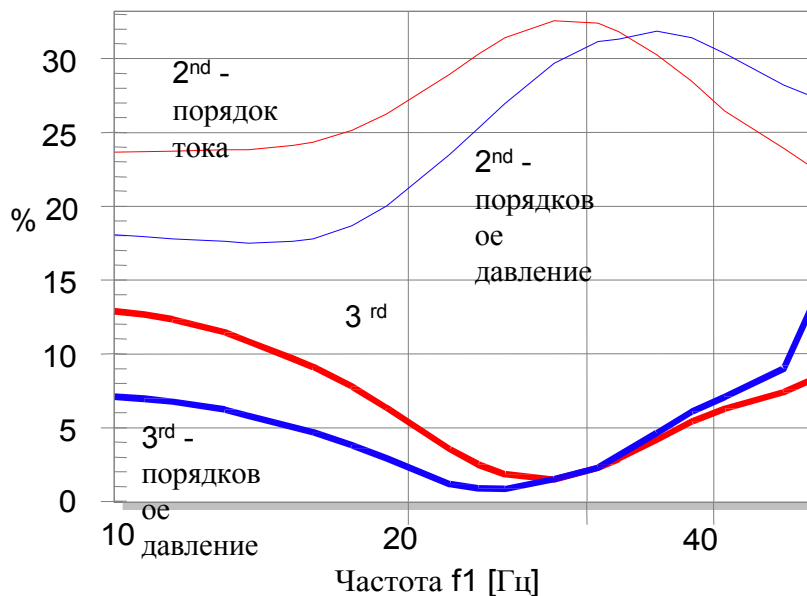


Рисунок 55: Интермодуляционные IMD 2nd - порядка и 3rd - порядка, измеренные в токе звуковой катушки и выходном звуковом давлении громкоговорителя 3 (изменяемый низкий тон, $f_2 = 300$ Гц).

Интермодуляция между низкочастотным тоном с переменной частотой f_1 и фиксированным голосовым тоном с частотой $f_2 = 300$ Гц показана на рис. 55. Как и в случае гармонических искажений, интермодуляция в токе и звуковом давлении имеет одинаковый порядок величины. Согласно таблице 3, это характерный признак нелинейности индуктивности $L_e(x)$ и $L_e(i)$. Интермодуляционный IMD 2-го порядкаnd имеет максимум на резонансной частоте, что характерно для $L_e(x)$ -нелинейности, изменяющейся со смещением. Искажения 3rd-го порядка IMD_3 имеют провал на резонансной частоте f_s , что является характерным признаком для $L_e(i)$ -нелинейности, поскольку ток в этом месте становится минимальным.

Громкоговоритель 3 является примером динамика, оптимизированного для линейных характеристик $Bl(x)$ и $K_{ms}(x)$ за счет использования длинной звуковой катушки, тщательно продуманного магнитного тракта и двухпаутинного подвеса. Несмотря на усилия по разработке, конечную стоимость и вес изделия, динамик выдает сильно искаженный выходной сигнал из-за игнорируемых $L_e(x)$ и $L_e(i)$ -нелинейностей. Применение некоторых средств для замыкания поля переменного тока может значительно улучшить характеристики громкоговорителя 3.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние 20 лет был достигнут значительный прогресс в понимании поведения громкоговорителей при больших сигналах.

Были разработаны надежные модели для нелинейных характеристик, изменяющихся в зависимости от смещения и тока в двигателе и системе подвеса. Нелинейные параметры $Bl(x)$, $L_e(x)$, $K_{ms}(x)$ и $L_e(i)$ могут быть измерены динамически на громкоговорителях, наушниках, микродинамиках и других преобразователях с корпусом и без него. Анализ методом конечных элементов (FEA) также может быть использован для моделирования этих параметров на основе геометрии и параметров материала. Модель большого сигнала и определенные параметры позволяют численно предсказать нелинейные симптомы с высокой точностью.

Это открывает путь к новому виду диагностики громкоговорителей:

- Нелинейные параметры легко интерпретируются и практически напрямую раскрывают физические причины.
- Влияние каждой нелинейности можно исследовать отдельно и найти причины искажения сигнала, нестабильности, сжатия и других симптомов нелинейности.
- Выбор конструкции можно легко оценить и оптимизировать громкоговоритель с учетом его размеров, веса, стоимости и производительности

Теоретические и практические знания дают новое представление об общих измерениях искажений и показывают, как сделать такие измерения более полными, экономичными по времени, критичными и легко интерпретируемыми. Наиболее важными моментами являются:

- Измерения нелинейных искажений следует проводить при различных уровнях амплитуды.
- Измерения гармонических искажений оценивают конкретные симптомы (HD_n , THD , EID , $ICHD$, ...) громкоговорителя. Однако использование одного тона в качестве стимула недостаточно для всестороннего описания характеристик большого сигнала и выявления всех нелинейностей громкоговорителя.
- Стимул должен содержать не менее двух тонов одновременно для измерения продуктов интермодуляционных искажений, возникающих при перемножении двух различных сигналов состояния (например, смещения и тока). Частота тональных сигналов и техника развертки имеют решающее значение для получения результатов, которые легко объяснить. В статье предложены две техники (развертка басового или голосового тона при сохранении постоянной частоты другого тона).
- Перемещение постоянного тока - очень информативный симптом. Он дает уникальные подсказки для выявления конкретных причин и оценки асимметрии нелинейности двигателя и подвески.

- Сжатие амплитуды основной составляющей и составляющих искажений также является симптомом нелинейности громкоговорителя. Однако он не дает подробной информации о физической причине.
- Расчет эквивалентного входного искажения (EID) - очень полезный способ постобработки измеренных искажений. Он подавляет влияние линейного пути передачи (механическая вибрация, излучение, распространение, помещение, датчик) и упрощает интерпретацию откликов искажений. Таким образом, можно легко сравнивать искажения, измеренные в смещении, токе и звуковом давлении. Это дает ценные подсказки для разделения нелинейности двигателя и диффузора.
- Измерения искажений выходного звукового давления следует проводить в ближнем поле громкоговорителя, где отношение сигнал/шум велико. После расчета эквивалентных искажений на входе искажения в любой точке звукового поля можно легко предсказать с помощью линейной передаточной функции, измеренной при более низких амплитудах.
- Искажение входного тока дает ценную информацию о нелинейности двигателя.
- Коэффициент гребня гармонических искажений (*ICHD*) описывает плавность нелинейности. Он использует фазовую информацию гармоник высшего порядка и указывает на переходные, импульсные искажения, вызванные дефектами громкоговорителей (например, трением и гулом) или чрезвычайно жесткими ограничивающими нелинейностями.

Эти выводы приводят к набору объективных измерений, которые можно выполнить за несколько минут. Эти измерения дают гораздо более полную картину характеристик большого сигнала, чем традиционные измерения гармонических искажений. Результаты можно свести к небольшому набору данных, которые легко интерпретировать, что продемонстрировано на примере трех громкоговорителей в данной статье. В таблицах 1 - 5 приведены краткие сведения о доминирующих нелинейностях и характерных симптомах, которые могут быть полезны для применения этих знаний в повседневной работе.

9. ССЫЛКИ

- [1] A. J. M. Kaizer, "Моделирование нелинейного отклика электродинамического громкоговорителя с помощью расширения ряда Вольтерра", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 35, pp. 421-433 (1987, июнь).
- [2] J. Вандеркой, "Модель импеданса динамика громкоговорителя с учетом вихревых токов в структуре полюса", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 37, No. 3, pp. 119-128, March 1989.
- [3] W. М. Лич, "Потери в индуктивности звуковой катушки громкоговорителя: Модели цепей, оценка параметров и влияние на частотную характеристику", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 50, No. 6, pp. 442- 450, June 2002.
- [4] Дж. Р. Райт, "Эмпирическая модель импеданса двигателя громкоговорителя".

J. Audio Eng. Soc. Vol. 38, No. 10, pp. 749-754, October 1990.

[5] М. Додд и др., "Импеданс звуковой катушки как функция частоты и смещения", представленный на 117-й конвенции Audio Eng. Soc. 2004, 28-31 октября, Сан-Франциско, Калифорния, США.

[6] А. Chaigne, "Влияние материала и формы на воспроизведение звука электродинамическим громкоговорителем", представлено на 118-й конвенции Audio Eng. Soc., 2005 28-31 мая, Барселона, Испания, препринт 6420.

[7] О. Томас, "Анализ и моделирование нелинейных вибраций в упругих горных породах", Труды UPMC (Париж 6), (2001 октябрь).

[8] J. Вандеркой, "Нелинейности в портах громкоговорителей", представлено на 104th конвенции Audio Eng. Soc., 1998 16 - 19 мая, Амстердам, Нидерланды, препринт 4748.

[9] Н.Б. Рузен, "Уменьшение нелинейности порта бас-рефлекса путем оптимизации геометрии порта", представлено на 104th Convention of the Audio Eng. Soc., 1998 16 - 19 мая, Амстердам, Нидерланды, препринт 4661.

[10] P. Merkli, et. al., "Переход к турбулентности в осциллирующем потоке в трубе", J. Fluid Mech. 68 (3), 567 - 575 (1975).

[11] В. Золтогорски, "Скользящее граничное условие и нелинейное распространение как источники нелинейных искажений в громкоговорителе", представлено на 94th Convention of the Audio Eng. Soc., 1993 16-19 марта, Берлин Германия, препринт 3510.

[12] Н. J. Butterweck, "Об эффекте Доплера в акустическом излучении из громкоговорителей", Acustica Vol. 63, pp. 77 -79, (1987).

[13] L. Дж. Блэк, "Физический анализ искажений, вызванных нелинейностью среды", J. Acoust. Soc. Am. 1, 266 - 267 (1940).

[14] W. Клиппель, "Распространение нелинейных волн в рупорах и каналах", J. Acoust. Soc. Am. vol. 98, No. 1, 431 - 438 (июль 1995 г.).

[15] E. Czerwinski, "Air-Related Harmonic and Intermodulation Distortion in Large Sound Systems," J. Audio Eng. Soc., vol. 47, No. 6, pp. 427-446, June 1999.

[16] W. Клиппель, "Моделирование нелинейностей в рупорных громкоговорителях", J. Audio Eng. Society, vol. 44, pp. 470-480 (1996).

[17] S. Темме и др., "Обнаружение свободных частиц в громкоговорителях", представлено на 115th конвенции Audio Eng. Soc., сентябрь 2003 г., препринт 5883.

[18] W. Klippel, et. al., "Тестирование громкоговорителей на производственной линии", представлено на 120-й конвенции Audio Eng. Soc., Париж (Франция), сентябрь 2006 г., 20-23 мая, препринт 6845.

- [19] "Оборудование звуковых систем - Электроакустические преобразователи - Измерение параметров больших сигналов", публикация IEC PAS 62458 © IEC:2006(E).
- [20] D. Кларк, "Точное измерение параметров громкоговорителя", *J. Audio Eng. Soc.* vol. 45, pp. 129 - 140, (1997 март).
- [21] R. H. Small, "Оценка нелинейности в моторах громкоговорителей", в *IREECON Int. Convention Digest* (1979 Aug.), pp. 78-80.
- [22] W. Клиппель, "Измерение параметров больших сигналов электродинамического преобразователя", представлено на 107th Конвенции Общества аудиоинженеров, Нью-Йорк, 24-27 сентября 1999 г., препринт 5008.
- [23] M. Knudsen, et. al., "Определение параметров драйвера громкоговорителя с помощью метода системной идентификации", , *"J. Audio Eng. Soc.* vol. 37, No. 9.
- [24] M.H. Knudsen et. al., "Модели низкочастотных громкоговорителей, включающие ползучесть подвеса", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, pp. 3-18, (Jan./Feb. 1993).
- [25] Спецификация системы анализаторов KLIPPEL, Klippel GmbH, www.klippel.de, 2005.
- [26] W. Клиппель, "Прогнозирование характеристик динамиков при высоких амплитудах", представлен на 111-й конвенции Общества аудиоинженеров, 2001, 21-24 сентября, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США.
- [27] W. Клиппель, "Аурализация динамиков - субъективная оценка нелинейных искажений", представленная на 110-йth конвенции Общества аудиоинженеров, Амстердам, 12-15 мая 2001 г., препринт 5310, *J. Audio Eng. Society*, Vol. 49, No. 6, 2001 June, P. 526.
- [28] A. Войшвилло, "Построение графиков, интерпретация и сравнение результатов измерений нелинейных искажений громкоговорителей", *J. Audio Eng. Society*, Volume 52, Number 4, pp. 332- 357, April 2004.
- [29] A. Dobrucki, "Нетипичные эффекты в электродинамическом громкоговорителе с неоднородным магнитным полем в воздушном зазоре и нелинейным подвесом", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, pp. 565 - 576, (July./Aug. 1994).
- [30] J.W. Noris, "Нелинейное динамическое поведение подвижной звуковой катушки", представлено на 105th Конвенции Общества аудиоинженеров, Сан-Франциско, 26-29 сентября 1998 г., препринт 4785.
- [31] "Оборудование звуковых систем. Часть 5: Громкоговорители", публикация IEC 60268-5.
- [32] S. Ф. Темме, "Как построить график измерений искажений", представленный на 94-йth конвенции *Audio Eng. Soc.* , 1993 16-19 марта, Берлин, препринт 3602.

[33] W. Клиппель, "Эквивалентные входные искажения", *J. Audio Eng. Society* **52**, No. 9 pp. 931-947 (2004 Sept.).

[34] W. Клиппель, "Измерение импульсных искажений, шума и других помех", представлено на 114-й конвенции Общества аудиоинженеров, 2003 г. 22-25 марта, Амстердам, Нидерланды, препринт № 5734.

[35] D. Кларк, "Метод амплитудной модуляции для измерения линейной excursии громкоговорителей", представленный на 89-йth конвенции Audio Eng. Soc., *J. Audio Eng. Soc. (Abstracts)*, vol. 38, p. 874 (1990 Nov.), preprint 2986.

[36] R. H. Small, "Измерение амплитудно-модуляционных искажений громкоговорителя", представлено на 114th конвенции Audio Eng. Soc. в Амстердаме, 22 - 25 марта 2003 г., препринт 5731.

[37] W. Клиппель, "Нелинейное поведение электродинамических громкоговорителей на низких частотах при больших сигналах", *J. Audio Eng. Soc.* , vol. 40, pp. 483-496 (1992).

[38] E. Czerwinski, et. al., "Многотональное тестирование компонентов звуковой системы - некоторые результаты и выводы", *J. Audio Eng. Soc.* vol. 49, pp. 1011 - 1048 (2001 Nov.).

[39] W. Klippel, "Оценка пикового смещения звуковой катушки X_{\max} ", *J. Audio Eng. Society* **51**, vol. 5, pp. 307 - 323 (2003 May).