

# Мотор динамика глазами схемотехника

В простейшем случае "мотор" электродинамического громкоговорителя состоит из магнитной системы (магнит+магнитопровод) звуковой катушки (каркас+намотанный на него провод). При протекании тока через звуковую катушку на нее действует сила Ампера ( $F=B \cdot I \cdot L$ ), приводящая ее в движение. Здесь  $B$  — индукция магнитного поля в зазоре,  $L$  — часть длины провода катушки, находящаяся в зазоре магнитопровода,  $I$  — ток через катушку. Вроде все просто и прозрачно. Если бы не одно но, появляющаяся при более пристальном взгляде на физические свойства магнитопровода...



Рис.1.

С точки зрения схемотехника звуковая катушка (ЗК) фактически представляет собой обычную индуктивность с ферромагнитным сердечником/магнитопроводом, имеющим некоторое постоянное подмагничивание. Поэтому, как и положено индуктивности, с ростом частоты импеданс ЗК возрастает, из-за возрастания вклада ее реактивного сопротивления в общий импеданс ЗК. На низких частотах импеданс динамика также возрастает из-за влияния основного механического резонанса его подвижной системы и ее противо-ЭДС, наводящаяся в ЗК. Но в рамках данной статьи поведение импеданса динамика на низких частотах нас не интересует. Гораздо интереснее рассмотреть влияние нелинейных магнитных свойств ферромагнитного сердечника на индуктивность ЗК на средних и высоких частотах, там, где вклад индуктивности в общий импеданс становится значительным. Еще более упрощенно себе задачу тем, что не будем рассматривать нелинейность, возникающую из-за механического изменения положения ЗК относительно магнитной системы динамика при его работе.

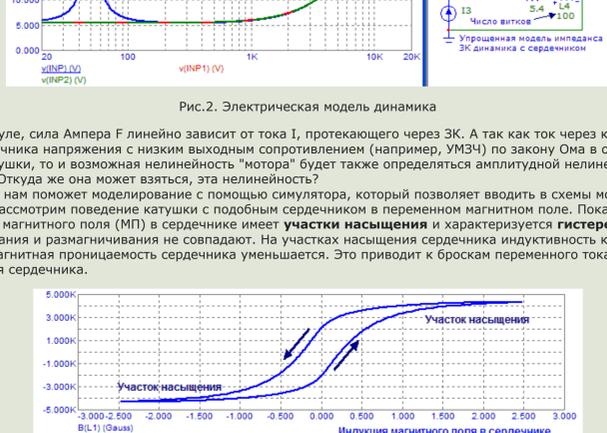


Рис.2. Электрическая модель динамика

2. Согласно формуле, сила Ампера  $F$  линейно зависит от тока  $I$ , протекающего через ЗК. А так как ток через катушку при использовании источника напряжения с низким выходным сопротивлением (например, УМЗЧ) по закону Ома в основном зависит от импеданса этой катушки, то и возможная нелинейность "мотора" будет также определяться амплитудой нелинейностью импеданса звуковой катушки. Откуда же она может взяться, эта нелинейность?

Прояснить задачу нам поможет моделирование с помощью симулятора, который позволяет вводить в схемы модели реальных магнитных цепей. Рассмотрим поведение катушки с подобным сердечником в переменном магнитном поле. Как известно, индукция магнитного поля (МП) в сердечнике имеет **участки насыщения** и характеризуется **гистерезисом**, при котором кривые намагничивания и размагничивания не совпадают. На участках насыщения сердечника индуктивность катушки падает, так как эффективная магнитная проницаемость сердечника уменьшается. Это приводит к броскам переменного тока в цепи катушки в моменты насыщения сердечника.

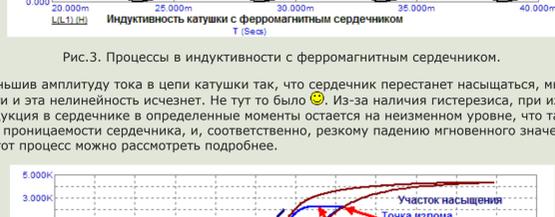


Рис.3. Процессы в индуктивности с ферромагнитным сердечником.

Казалось бы, что уменьшив амплитуду тока в цепи катушки так, что сердечник перестанет насыщаться, мы устраним модуляцию величины индуктивности и эта нелинейность исчезнет. Не тут то было! Из-за наличия гистерезиса, при изменении напряженности МП, индукция в сердечнике в определенные моменты остается на неизменном уровне, что также равносильно уменьшению магнитной проницаемости сердечника, и, соответственно, резкому падению мгновенного значения индуктивности. На следующих графиках этот процесс можно рассмотреть подробнее.

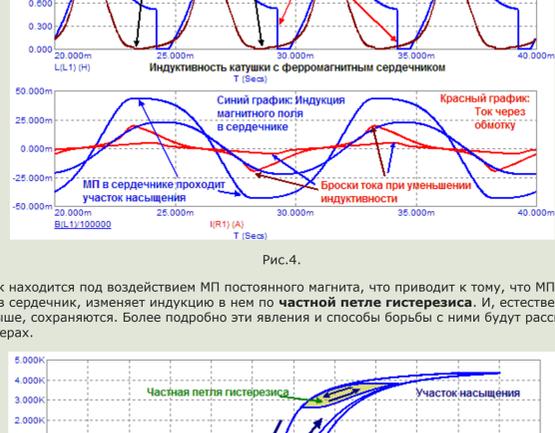


Рис.4.

В динамике сердечник находится под воздействием МП постоянного магнита, что приводит к тому, что МП от тока, протекающего по ЗК и проникающего в сердечник, изменяет индукцию в нем по **частной петле гистерезиса**. И, естественно, все нелинейные эффекты, описанные выше, сохраняются. Более подробно эти явления и способы борьбы с ними будут рассмотрены дальше на более конкретных примерах.



Рис.5. Частная петля гистерезиса.

3. Для определенности, в качестве материала магнитопровода возьмем электротехническую сталь с максимальной индукцией насыщения 2.2 Тесла, введем в магнитную систему воздушный зазор и дадим постоянное подмагничивание в 1 Тесла через дополнительную катушку. В качестве источника сигнала возьмем источник тока, который позволит оценить нелинейность импеданса, измерив искажения по напряжению на входных клеммах V(OUT). Вот результаты моделирования взаимодействия ЗК и такой магнитной цепи при частоте малого сигнала 2КHz:



Рис.6.

А вот что показывают натурные замеры искажений (значение THD относится к желтому графику, остальные графики демонстрируют спектры искажений при снижении уровня сигнала на 10dB (THD=0.517%) и 20dB (THD=0.221%) соответственно):



Рис.7.

Видно, что эти искажения не настолько малы, что ими можно пренебречь. А по сравнению с искажениями современных УМЗЧ - они просто катастрофичны! Один из способов уменьшить этот вид искажений - применить токовое управление динамиком. Но здесь мы не должны упустить из рассмотрения тот факт, что сила, возникающая в "моторе" динамика, зависит не только от величины тока, но и от мгновенного значения магнитной индукции в зазоре. Поэтому интересно с помощью симулятора (а иначе - никак) взглянуть на искажения параметра  $B^*I$  (смотрим на формулу силы Ампера).

Для начала можно посмотреть, как влияет на искажения  $B^*I$  уровень постоянного подмагничивания в сердечнике (положение частной петли гистерезиса на кривой намагничивания):

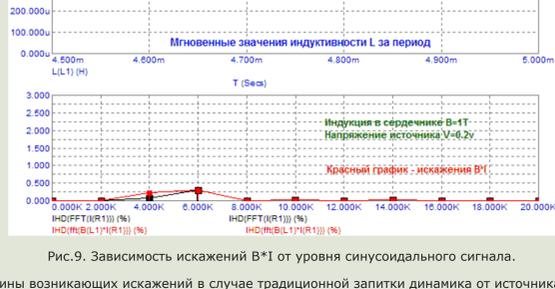


Рис.8. Зависимость искажений  $B^*I$  от постоянного подмагничивания.

На последнем фрейме видно как падают индуктивности ЗК и уровень искажений при нахождении сердечника в полном насыщении. Естественно предположить, что от амплитуды сигнала также зависит уровень искажений  $B^*I$ . Симулирование показывает, что уровень третьей гармоники мало изменяется, нарастает только вторая гармоника, хотя ток в цепи ЗК (черный график) имеет преимущественно доминирующую третью гармонику:

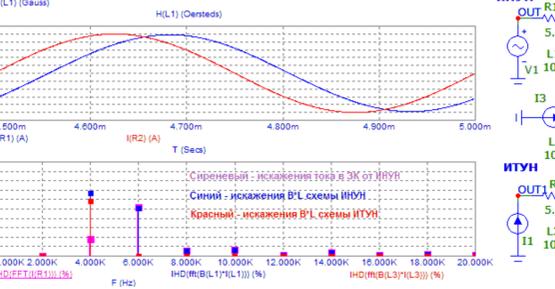


Рис.9. Зависимость искажений  $B^*I$  от уровня синусоидального сигнала.

Сравним теперь величины возникающих искажений в случае традиционной запитки динамика от источника напряжения (ИНУН) и источника тока (ИТУН) при одинаковой силе тока в ЗК.

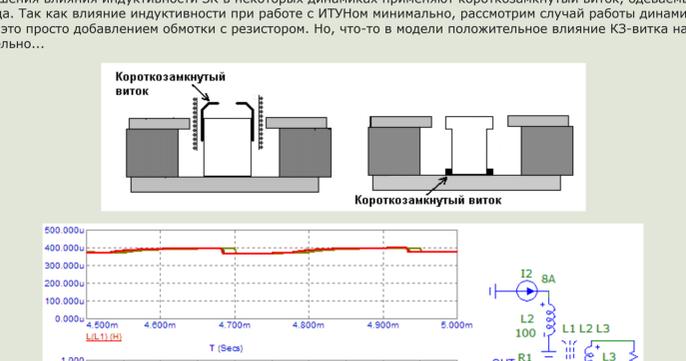


Рис.8. Сравнение искажений при питании ЗК от ИНУН и ИТУН.

Видно, что в случае ИТУН, вторая гармоника уменьшилась незначительно, а третья практически исчезла. Это во многом объясняется использованием в звуке при использовании ИТУНа. Подобный характер поведения гармоник наблюдается в широком диапазоне уровней постоянного подмагничивания в сердечнике и амплитуд индукционного тока в отличие от случая с ИНУНом.

4. Для уменьшения влияния индуктивности ЗК в некоторых динамических приложениях используют короткозамкнутый виток, одеваемый на керна магнитопровода. Так как влияние индуктивности при работе с ИТУНом минимально, рассмотрим случай работы динамика от ИНУНа. Моделируется это просто добавлением обмотки с резистором. Но, что в модели расположить виток частично решает эту задачу. Не так значительно...

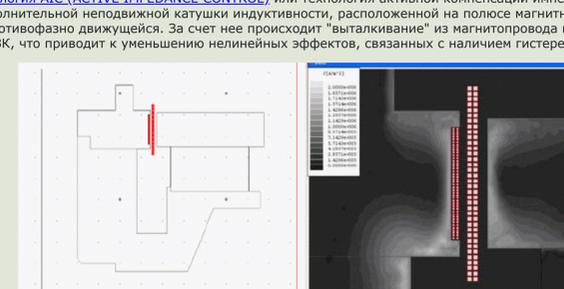
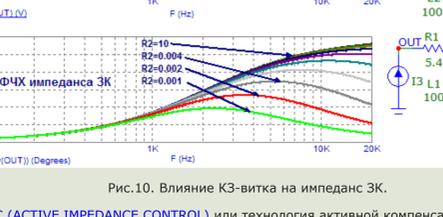


Рис.9. Влияние КЗ-витка на искажения.

Хотя общий импеданс ЗК при применении КЗ-витка, изготовленного из материала с высокой электропроводностью, например, меди, на высоких частотах достаточно хорошо выравнивается:



Рис.10. Влияние КЗ-витка на импеданс ЗК.

5. Известна **технология AIC (ACTIVE IMPEDANCE CONTROL)** или технология активной компенсации импеданса. Заключается она в использовании дополнительной неподвижной катушки индуктивности, расположенной на полюсе магнитной системы и включенной параллельно, но противофазно движущейся. За счет нелинейности происходит "выталкивание" из магнитопровода переменной составляющей МП, генерируемой ЗК, что приводит к уменьшению нелинейных эффектов, связанных с наличием гистерезиса в магнитопроводе.

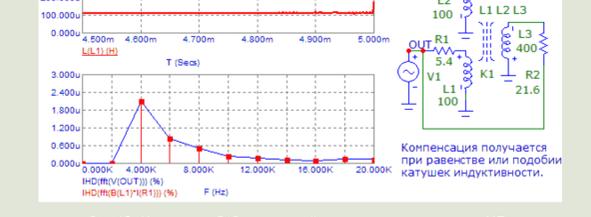


Рис.11. Конструкция магнитной системы и распределение МП.

В статье об AIC приведены результаты измерений, подтверждающие снижение искажений при использовании этой технологии. Ее применение со слов разработчиков дает следующие эффекты:

1. Линеаризация импеданса в рабочем диапазоне частот;
2. Линеаризация акустической и электрической фазы;
3. Значительное увеличение чувствительности и общего звукового давления;
4. Уменьшение общего уровня гармонических искажений;
5. Стабильность передаваемой мощности.

Насчет 3 и 5 пунктов - не уверен, а вот 1, 2 и 4 пункты можно проверить симулятором. К примеру - смотрим поведение ЗК в частотной области:

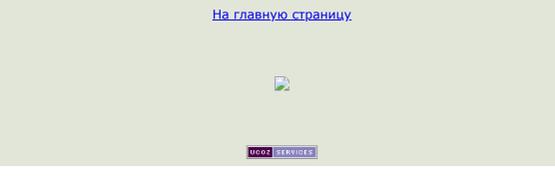


Рис.12. Суммарный импеданс ЗК.

В общем-то, в случае идеальной компенсации, имеет чисто активный импеданс звуковой катушки динамика. Кроме того, теоретически, можно добиться практически полного отсутствия искажений, возникающих за счет нелинейности магнитного сердечника:



Рис.13. Искажения  $B^*I$  при полной компенсации модуляции МП.

Конечно, при этом мы имеем определенные накладные расходы: приходится питать от выхода усилителя и дополнительную катушку. Но преимущества такого подхода должны перевешивать такой небольшой недостаток.

6. Заключение. Хотя схемотехническое моделирование имеет определенные ограничения и по точности моделей, и по тем упрощениям, которые мы ввели в начале статьи, многое из процессов, происходящих в "моторе" динамика сопряжено. Основная причина проблем, как выясняется - это наличие петли гистерезиса магнитной цепи, характеризующая степень сопротивления ферромагнетика к перемagnetиванию, физически связанная с затратой энергии на переориентацию магнитных доменов в веществе. При этом мгновенная эффективная магнитная проницаемость материала падает, что приводит к возникновению искажений в динамике, как через амплитудную нелинейность импеданса, так и через нелинейность модуляции магнитного поля в сердечнике.

Нарушается аналогия со спейсфидомским видом искажений - **"Memory Distortion"** (искажения, связанные с предисторией сигнала/системы), которые практически невозможно компенсировать. Неплохим методом уменьшения этих искажений в месте их возникновения, является использование токового управления ЗК динамика. Свести к нулю этот вид искажений можно только полностью устранив сигнальную модуляцию МП в ферромагнетике. Короткозамкнутый виток частично решает эту задачу. Технология AIC теоретически позволяет это сделать наиболее полно. Хотя, никто не мешает придумать свои методы решения этой проблемы!

Мухамедзянов Н. (aka **Nota Bene**) (c)2010 reanimator-h -> yandex.ru

[На главную страницу](#)

