

Power Amplifiers - A "First Watt" ABX Test

In Benchmark's listening room we recently demonstrated the importance of the first watt using two 100 watt stereo power amplifiers. One amplifier was a traditional class-AB amplifier, the other was Benchmark's **AHB2** power amplifier with feed-forward error correction. Using a double-blind ABX test, we verified that there was a clearly audible difference when the amplifiers drove speakers at an output level of 0.01 watt.

В комнате прослушивания Benchmark мы недавно продемонстрировали важность первого Ватта, используя два 100-Ваттных стереоусилителя мощности. Один усилитель был традиционным усилителем класса АВ, другой — усилителем мощности Benchmark AHB2 с прямой коррекцией ошибок. Используя двойной слепой тест АВХ, мы убедились, что была четко слышимая разница, когда усилители управляли динамиками на уровне выходной мощности 0,01 Вт.

Why is the First Watt Important?

When music is playing at a reasonably loud level on a typical studio monitoring system, or on a home hi-fi system, the average power into the speakers is usually only about 1 watt. With typical recordings, peaks reach 25 to 65 watts while the average music power is just 1 watt. The peaks are important, but most of the musical details are conveyed in the low power regions between the peaks.

Почему важен первый Ватт?

Когда музыка играет на достаточно громком уровне на типичной системе студийного мониторинга или на домашней hi-fi-системе, средняя мощность в динамиках обычно составляет всего около 1 Вт. При типичных записях пики достигают 25–65 Вт, в то время как средняя мощность музыки составляет всего 1 Вт. Пики важны, но большинство музыкальных деталей передается в областях низкой мощности между пиками.

Musical Details are Conveyed by the First Watt

Between the transient peaks, most of the important musical details are reproduced at power levels of much less than 1 watt. In any musical recording, the durations of transient peaks are very short relative to the time between the peaks. The first watt is the most important because the amplifier spends most of its time delivering less than 1 watt, even when the music is cranking.

Музыкальные детали передаются первым Ваттом

Между переходными пиками большинство важных музыкальных деталей воспроизводятся на уровнях мощности намного меньше 1 Вт. В любой музыкальной записи длительность переходных пиков очень коротка по сравнению со временем между пиками. Первый Ватт является самым важным, поскольку усилитель проводит большую часть времени, выдавая менее 1 Вт, даже когда музыка играет на полную катушку.

The Effects of Distortion in the First Watt

In the low power region, it is our opinion that distortion can change the harmonic character of musical voices, clutter the unused frequencies between musical tones, and add a fatiguing harshness. Together these effects can detract from emotion and authenticity of the musical performance. Distortion can detach us from the performance and give us the distinct impression that we are just listening to sound coming out of a box.

Эффекты воздействия в первом Ватте

В области низкой мощности, по нашему мнению, искажение может изменить гармонический характер музыкальных голосов, загромождать неиспользуемые частоты между музыкальными тонами и добавить утомляющую резкость. Вместе эти эффекты могут отвлечь от эмоций и подлинности музыкального исполнения. Искажение может оторвать нас от исполнения и создать у нас отчетливое впечатление, что мы просто слушаем звук, исходящий из коробки.

Audibility is Related to Time

Our ears need time to detect distortion. The thump of a kick drum, a note on the bass, or a loud transient from the percussion may approach the output limits of a power amplifier, but very little time is spent reproducing these transients. The short durations of these transients make it harder to hear the distortion that occurs on these musical peaks. In contrast, our ears have plenty of time to detect the distortion that occurs in the low-power spaces between loud transients. For this reason, our enjoyment of the music is largely dependent upon the quality of the delivery within the first watt. Ironically, amplifier bench measurements tend to focus on the THD+N (total harmonic distortion + noise) at maximum power. Unfortunately these high-power specifications have no direct relationship to the performance within the first watt. For this reason, it is important to separately examine the first-watt performance.

Слышимость связана со временем

Нашим ушам нужно время, чтобы обнаружить искажение. Удар бас-бочки, нота на басу или громкий переходный процесс от перкуссии могут приближаться к выходным пределам усилителя мощности, но на воспроизведение этих переходных процессов тратится очень мало времени. Короткая продолжительность этих переходных процессов затрудняет восприятие искажений, возникающих на этих музыкальных пиках. Напротив, у наших ушей достаточно времени, чтобы обнаружить искажения, возникающие в маломощных промежутках между громкими переходными процессами. По этой причине наше наслаждение музыкой во многом зависит от качества подачи в пределах первого Ватта. По иронии судьбы, измерения на стенде усилителя, как правило, фокусируются на THD+N (полные гармонические искажения + шум) при максимальной мощности. К сожалению, эти высокомошные характеристики не имеют прямого отношения к производительности в пределах первого Ватта. По этой причине важно отдельно изучить производительность первого Ватта.

A Traditional Class-AB Amplifier Operating at 1 Watt

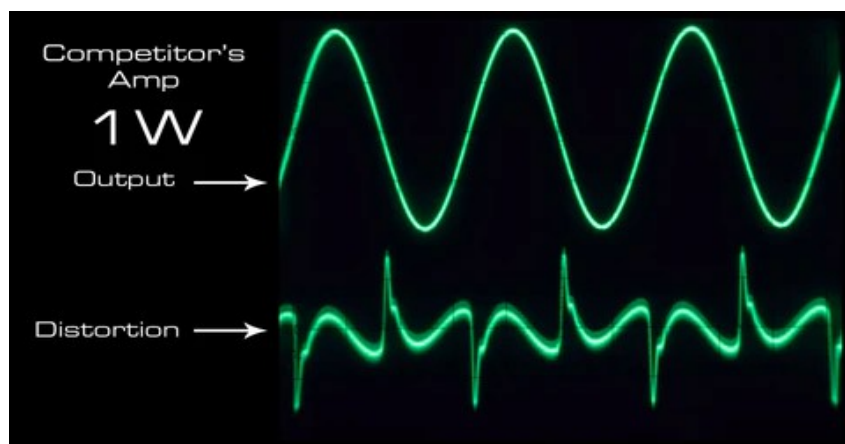
The following photo shows a pure 1 kHz tone being reproduced by a typical class-AB power amplifier at a power level of 1 watt. This amplifier has very good specifications near full power (100 watts), but like many class-AB amplifiers, it performs poorly at low power levels.

The top trace shows the amplifier output waveform at an output power of 1 watt. The lower trace shows the error waveform (distortion + noise).

Традиционный усилитель класса АВ, работающий на мощности 1 Вт

На следующем фото показан чистый тон 1 кГц, воспроизводимый типичным усилителем мощности класса АВ при уровне мощности 1 Вт. Этот усилитель имеет очень хорошие характеристики вблизи полной мощности (100 Вт), но, как и многие усилители класса АВ, он плохо работает на низких уровнях мощности.

Верхний осциллограмма показывает выходную форму волны усилителя при выходной мощности 1 Вт. Нижняя - показывает форму волны ошибки (искажение + шум).



The top trace may look like a perfect sine wave (pure tone) but our ears would easily tell us that it is not a pure tone. With an audio analyzer we can extract the error waveform (lower trace) and amplify it so that we can see what our ears are hearing. In this case, the error signal has been amplified by 1024 (about 60 dB). At a 1 watt output, this class-AB amplifier produces a distortion waveform that measures 70 dB below the output level of the 1 watt test tone (see graph at the bottom of this application note). This means that the power produced by the THD+N is 70 dB below 1 watt. If we drop the level of the test tone by 20 dB, the output power is 0.01 W. At this output level the amplifier was still producing distortion at a level of 73 dB below 1 watt. At 0.01 watt the distortion waveforms look virtually identical to the 1 watt waveforms. This distortion was clearly audible when we used this amplifier to drive a speaker at 0.01 watt. For our tests we used a stereo pair of Benchmark [SMS1](#) speakers with a sensitivity of 87 dB 1 watt, 1 meter. The tone was reproduced at a sound pressure level of about 67 dB (measured 67 to 68 dB SPL) at the listening position while the amplifier distortion was reproduced at a calculated sound pressure level of about 14 dB (87 dB - 73 dB = 14 dB). With a 0.01 watt 1 kHz test tone, the amplifier distortion was clearly audible through the loudspeaker. At this low power level, the speaker distortion is lower and much more musical than the ugly crossover distortion produced by the amplifier.

Верхняя кривая может выглядеть как идеальная синусоида (чистый тон), но наши уши легко скажут нам, что это не чистый тон. С помощью аудиоанализатора мы можем извлечь форму сигнала ошибки (нижняя кривая) и усилить ее, чтобы мы могли видеть то, что слышат наши уши. В этом случае сигнал ошибки был усилен в 1024 раза (около 60 дБ). При выходной мощности 1 Вт этот усилитель класса АВ создает искажение, которое на 70 дБ ниже выходного уровня тестового тона мощностью 1 Вт (см. график в нижней части этой заметки по применению). Это означает, что мощность, создаваемая THD+N, составляет 70 дБ ниже 1 Вт. Если мы снизим уровень тестового тона на 20 дБ, выходная мощность составит 0,01 Вт. При этом выходном уровне усилитель все еще создавал искажение на уровне 73 дБ ниже 1 Вт. При мощности 0,01 Вт формы искажений выглядят практически идентичными формам сигналов мощностью 1 Вт. Это искажение было отчетливо слышно, когда мы использовали этот усилитель для управления динамиком на 0,01 Вт. Для наших тестов мы использовали стереопару динамиков Benchmark SMS1 с

чувствительностью 87 дБ 1 Вт, 1 метр. Тон воспроизводился при уровне звукового давления около 67 дБ (измерено от 67 до 68 дБ SPL) в точке прослушивания, в то время как искажение усилителя воспроизводилось при расчетном уровне звукового давления около 14 дБ ($87 \text{ дБ} - 73 \text{ дБ} = 14 \text{ дБ}$). При тестовом тоне 0,01 Вт 1 кГц искажение усилителя было отчетливо слышно через громкоговоритель. На этом низком уровне мощности искажение динамика ниже и гораздо более музыкально, чем уродливое искажение кроссовера, создаваемое усилителем.

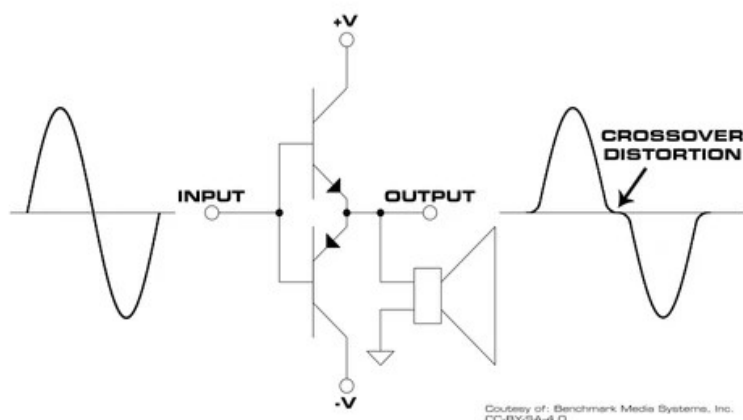
Примечание. Сигнал ошибки в модели усилителя можно измерить с помощью режекторного фильтра по окончании переходных процессов (как правило не ранее 15-го периода).

Crossover Distortion

Note the abrupt positive and negative spikes that occur in the distortion waveform. These occur whenever the top waveform crosses zero current. These spikes are caused by a less-than-perfect transition between the positive and negative output power transistors in the class-AB amplifier (see the simplified amplifier schematic below).

Искажение кроссовера

Обратите внимание на резкие положительные и отрицательные пики, которые возникают в форме искажения. Они возникают всякий раз, когда верхняя форма волны пересекает нулевой ток. Эти пики вызваны неидеальным переходом между положительными и отрицательными выходными силовыми транзисторами в усилителе класса AB (см. упрощенную схему усилителя ниже).



The class-AB amplifier used in our tests includes a traditional negative feedback system which is designed to correct the distortion caused by the output stage. Clearly, this feedback system is not fast enough to fully correct the high-speed transients that occur when the output stage transitions through the crossover region. These crossover distortion transients are a common occurrence in class-AB power amplifiers. The negative feedback networks used in power amplifiers are often too slow to reduce these transients to inaudible levels.

Усилитель класса AB, используемый в наших тестах, включает традиционную систему отрицательной обратной связи, которая предназначена для исправления искажений, вызванных выходным каскадом. Очевидно, что эта система обратной связи недостаточно быстра, чтобы полностью исправить высокоскоростные переходные процессы, возникающие при переходах выходного каскада через область кроссовера. Эти переходные процессы искажения кроссовера являются обычным явлением в усилителях мощности класса AB. Сетевые схемы отрицательной обратной связи, используемые в усилителях мощности, часто слишком медленные, чтобы снизить эти переходные процессы до неслышимых уровней.

More Feedback is Not the Answer!

The bandwidth of any feedback system must be limited in order to achieve high-frequency stability. The large transistors used in power amplifiers are much slower than the small transistors used in line-level stages. The use of these slow devices dictates that the feedback network must also be slow. If the bandwidth of the feedback system is not limited (to properly match the speed of the power transistors) the amplifier will become a giant oscillator. Because of these speed constraints, power amplifiers often contribute more crossover distortion than the total of all the other electronic components in the signal chain.

Больше обратной связи — это не решение проблемы!

Полоса пропускания любой системы обратной связи должна быть ограничена для достижения стабильности на высоких частотах. Большие транзисторы, используемые в усилителях мощности, намного медленнее, чем маленькие транзисторы, используемые в каскадах линейного уровня. Использование этих медленных устройств диктует, что сеть обратной связи также должна быть медленной. Если полоса пропускания системы обратной связи не ограничена (чтобы должным образом соответствовать скорости силовых транзисторов), усилитель станет гигантским генератором. Из-за этих ограничений скорости усилители мощности часто вносят больше искажений кроссовера, чем все остальные электронные компоненты в общей сложности в цепи сигнала.

***Примечание.** В статье не рассматривается такой вид искажений как искажения связанные с вращением фронтов сигнала в периоды атаки и спада (SID - Slew-Indused Distortion). Этот вид искажений в наибольшей степени зависит от времени прохождения сигнала со входа до нагрузки (т. е. от быстродействия которое связано с ГВЗ). Причем при постоянной скорости нарастания амплитуды синусоид в атаке (спаде) скорость вращения фронтов также постоянна, постоянен и уровень вносимых искажений независимо от амплитуды сигнала. А это значит что чем меньше амплитуда сигнала в атаке (спаде) тем выше относительный уровень вносимых искажений. Это во многом объясняет различие в передаче микродинамики разными усилителями. Этому виду искажений в наибольшей степени подвержены глубокоОСные усилители с ГВЗ более 100 нс. БезОСные усилители и усилители с относительно неглубокой ОС имеют малый уровень этого вида искажений при ГВЗ до нескольких сотен.*

Этот вид искажений можно грубо оценить на первом периоде сигнала по его спектру. Если нет существенного роста высших гармоник начиная с 5-й (в десятки а то и сотни раз) по сравнению со спектром 2-го и последующих периодов, то можно быть уверенным что и с микродинамикой усилитель справится хорошо.

Is Amplifier Distortion Audible?

Some people have argued that the differences in power amplifiers are inaudible. They justify this assertion by pointing out that loudspeakers produce more distortion than any reasonably good power amplifier. The fallacy of this argument is that the distortion produced by speakers is much different than the crossover distortion produced by a power amplifier. Speakers are also relatively clean at low power levels while power amplifiers may produce significant distortion at these low levels. In our listening tests, we verified that the distortion waveform shown above is audible while playing a 1 kHz test tone through speakers. If amplifier distortion is audible with a test tone, it may also be audible while playing music.

Слышны ли искажения усилителя?

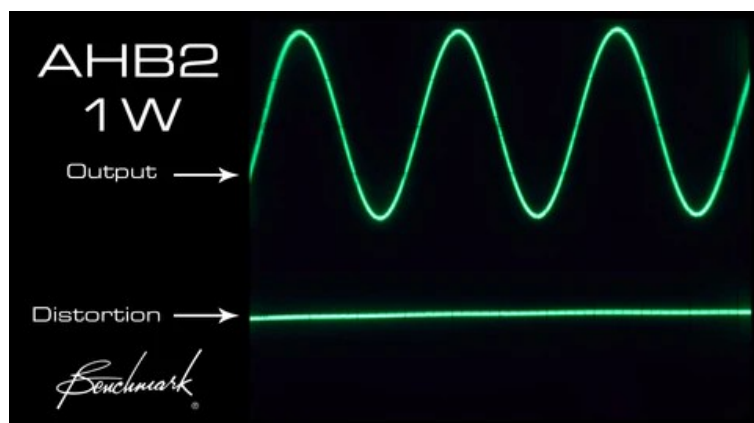
Некоторые люди утверждают, что различия в усилителях мощности неслышны. Они оправдывают это утверждение, указывая на то, что громкоговорители производят больше искажений, чем любой достаточно хороший усилитель мощности. Ошибочность этого аргумента заключается в том, что искажения, создаваемые громкоговорителями, сильно отличаются от искажений кроссовера, создаваемых усилителем мощности. Громкоговорители также относительно чисты на низких уровнях мощности, в то время как усилители мощности могут создавать значительные искажения на этих низких уровнях. В наших тестах на прослушивание мы убедились, что показанная выше форма волны искажения слышна при воспроизведении тестового тона 1 кГц через громкоговорители. Если искажения усилителя слышны при тестовом тоне, они также могут быть слышны при воспроизведении музыки.

High-Bandwidth Feed-Forward Error Correction

The Benchmark [AHB2](#) power amplifier uses a patented distortion-reduction system that includes feed-forward error correction. Unlike feedback systems, the feed-forward system is inherently stable. The bandwidth of the correction signal does not need to be limited. This means that the high-speed crossover distortion transients can be fully corrected. The next photo shows the output of the AHB2 at 1 watt. The test conditions and scale factors are identical to those shown above. Like the prior photo, the distortion waveform is boosted by 60 dB, but this time, no traces of crossover distortion are visible. The feed-forward system delivers the first-watt performance of a class-A amplifier while outperforming class-A amplifiers at high power levels.

Коррекция ошибок прямой связи с высокой пропускной способностью

В усилителе мощности Benchmark AHB2 используется запатентованная система снижения искажений, которая включает коррекцию ошибок прямой связи. **В отличие от систем обратной связи, система прямой связи изначально стабильна. Полоса пропускания сигнала коррекции не должна быть ограничена. Это означает, что высокоскоростные переходные искажения кроссовера могут быть полностью исправлены.** На следующем фото показан выход AHB2 при 1 Вт. Условия испытаний и масштабные коэффициенты идентичны показанным выше. Как и на предыдущем фото, форма волны искажения усилена на 60 дБ, но на этот раз никаких следов искажения кроссовера не видно. Система прямой связи обеспечивает производительность первого Ватта усилителя класса А, превосходя усилители класса А на высоких уровнях мощности.



The Listening Test

To conduct a double-blind listening test, we connected both amplifiers to a relay-controlled ABX switch box. The output of the switch box was connected directly to a Benchmark SMS1 loudspeaker. Both amplifiers were precisely adjusted to deliver a 1 kHz tone at 0.2828 Vrms into the speaker. This drive level of approximately 0.01 watt produced a sound pressure level of about 67 dB at the listening position. The test box ran a random sequence of 25 trials. The subject had a remote control with four buttons; "A", "X", "B", and "Enter". One amplifier was assigned to "A" and the other was assigned to "B". For each of the 25 trials, "X" was a random selection of either "A" or "B". In each trial, the subject was free to switch between "A", "B", and "X" an unlimited number of times before determining that "X" is "A" or "B". At the end of 25 trials, the ABX box showed how many of the 25 trials were correctly identified. It was very easy for me to score a perfect 25 on my first attempt. The distortion created by the conventional class-AB amplifier at 0.01 watt was clearly audible while the AHB2 produced what sounded like a pure 1 kHz tone. The distortion is also audible at a power level of 1 watt, but the test tone is far too loud to conduct a sequence of 25 trials. Even at 0.01 watt, the test tone is annoyingly loud (67 dB SPL). This just goes to show how much of our music is reproduced at very low power levels. A single note on a flute may sound loud when it is delivered to the speakers at a power level of only 0.01 watt! Dick Olsher once said that **"the first Watt is the most important Watt"**. In my opinion, **"the first 10 milliwatts are the most important!"**

Тест на прослушивание

Чтобы провести двойной слепой тест на прослушивание, мы подключили оба усилителя к коммутационной коробке ABX с релейным управлением. Выход коммутационной коробки был подключен напрямую к громкоговорителю Benchmark SMS1. Оба усилителя были точно настроены для подачи тона 1 кГц при 0,2828 В среднеквадратичного значения в динамик. Этот уровень возбуждения примерно 0,01 Вт создавал уровень звукового давления около 67 дБ в точке прослушивания. Тестовая коробка запускала случайную последовательность из 25 испытаний. У испытуемого был пульт дистанционного управления с четырьмя кнопками: «А», «Х», «В» и «Enter». Один усилитель был назначен на «А», а другой — на «В». Для каждого из 25 испытаний «Х» был случайным выбором либо «А», либо «В». В каждом испытании испытуемый мог свободно переключаться между «А», «В» и «Х» неограниченное количество раз, прежде чем определить, что «Х» — это «А» или «В». В конце 25 испытаний ящик ABX показал, сколько из 25 испытаний были правильно идентифицированы. Мне было очень легко набрать идеальные 25 баллов с первой попытки. Искажение, создаваемое обычным усилителем класса АВ при 0,01 Вт, было отчетливо слышно, в то время как АНВ2 воспроизводил то, что звучало как чистый тон частотой 1 кГц. Искажение также слышно при уровне мощности 1 Вт, но тестовый тон слишком громкий, чтобы провести последовательность из 25 испытаний. Даже при 0,01 Вт тестовый тон раздражающе громкий (67 дБ SPL). Это просто показывает, как много нашей музыки воспроизводится на очень низких уровнях мощности. Одна нота на флейте может звучать громко, если она подается на динамики при уровне мощности всего 0,01 Ватта! Дик Олшер однажды сказал, что «первый Ватт — самый важный Ватт». По моему мнению, «первые 10 милливатт — самые важные»!

Conclusion

On musical peaks, speakers may be the largest source of distortion in the entire playback system. But, in between the peaks, traditional class-AB amplifiers may produce more audible distortion than speakers. In our listening tests, it was easy to hear the difference between the two amplifiers, and score perfectly in a sequence of blind random ABX trials. Both amplifiers were playing a 1 kHz tone at 0.2828 Vrms into Benchmark [SMS1](#) speakers (a level of about 0.01 watt). There was a clear audible difference when the amplifiers were performing this very simple task. The AHB2 reproduced a pure tone while the traditional class-AB amplifier added

audible distortion. At a power level of 0.01 watt, the distortion produced by the speaker did not mask the difference between the two amplifiers.

We have proven that amplifier crossover distortion can be very audible through loudspeakers when playing pure tones at 0.01 watt. We have also shown that feed-forward error correction is very effective at eliminating the fast transients that are produced by crossover distortion in an amplifier's output stage. In contrast, traditional feedback systems are usually too slow to fully remove these transients. The remaining crossover distortion artifacts may be audible.

Заклучение

На музыкальных пиках динамики могут быть крупнейшим источником искажений во всей системе воспроизведения. Но между пиками традиционные усилители класса АВ могут создавать более слышимые искажения, чем динамики. В наших тестах на прослушивание было легко услышать разницу между двумя усилителями, и они показали отличные результаты в последовательности слепых случайных испытаний ABX. Оба усилителя воспроизводили тон 1 кГц при 0,2828 Brms в динамики Benchmark SMS1 (уровень около 0,01 Вт). Была четкая слышимая разница, когда усилители выполняли эту очень простую задачу. АНВ2 воспроизводил чистый тон, в то время как традиционный усилитель класса АВ добавлял слышимые искажения. При уровне мощности 0,01 Вт искажения, создаваемые динамиком, не скрывали разницу между двумя усилителями.

Мы доказали, что кроссоверные искажения усилителя могут быть очень слышимы через громкоговорители при воспроизведении чистых тонов при 0,01 Вт. Мы также показали, что коррекция ошибок прямой связи очень эффективна для устранения быстрых переходных процессов, которые производятся искажением кроссовера в выходном каскаде усилителя. Напротив, традиционные системы обратной связи обычно слишком медленны, чтобы полностью удалить эти переходные процессы. Оставшиеся артефакты искажения кроссовера могут быть слышны.

Amplifier THD+N Measurements

The following graph shows THD+N vs Power where THD+N is dB relative to 1 watt. This scale-factor makes it easy to calculate the sound pressure level of the distortion signal when it drives speakers. For example, if the speaker sensitivity is 87 dB, 1 watt, 1 meter, the distortion sound pressure level produced by the conventional amplifier at 1 W is $(87-70) = 17$ dB SPL. At this same 1 W power level, the distortion sound pressure level produced by the AHB2 is $(87-108) = -21$ dB SPL. The negative number indicates that this distortion signal should be 21 dB below the threshold of hearing when played in a quiet room. The conventional class-AB amplifier produces audible distortion, the AHB2 does not.

Измерения THD+N усилителя

На следующем графике показан THD+N в зависимости от мощности, где THD+N равен дБ относительно 1 Вт. Этот масштабный коэффициент позволяет легко рассчитать уровень звукового давления сигнала искажения, когда он управляет динамиками. Например, если чувствительность динамика составляет 87 дБ, 1 Вт, 1 метр, уровень звукового давления искажения, создаваемый обычным усилителем при 1 Вт, составляет $(87-70) = 17$ дБ SPL. При этом же уровне мощности 1 Вт уровень звукового давления искажения, создаваемый АНВ2, составляет $(87-108) = -21$ дБ SPL. Отрицательное число указывает на то, что этот сигнал искажения должен быть на 21 дБ ниже порога слышимости при воспроизведении в тихой комнате. Обычный усилитель класса АВ создает слышимые искажения, АНВ2 — нет.

Примечание.

К сожалению на форумах встречаются «теоретики» которые готовы доказывать что достаточно снизить уровень искажений ниже порога слышимости и они не будут слышны.

Первый Ватт на нагрузке 8 Ом соответствует выходному напряжению 4 В(пик). Реальное сопротивление АС ближе к 6 Ом. Тогда пиковый ток нагрузки составляет:

$$4 \text{ В} / 6 \text{ Ом} = 0,67 \text{ А.}$$

Ток покоя усилителей класса АВ как правило редко превышает 100...150 мА. А это означает что уже на первом Ватте усилитель выходит из класса А и неизбежно возникают кроссоверные искажения если ООС недостаточно быстрая.

