

Nulling Out Amp Distortion by David Hafler (Feb. 1987)

By DAVID HAFLER

Throughout the history of sound reproduction, there has always been uncertainty as to what degree of distortion and what types of distortion are audible. At one time it was thought that 5% total harmonic distortion was the threshold of audibility. Later, 2% was considered to be the goal to be reached to make distortion inaudible.

На протяжении всей истории воспроизведения звука всегда существовала неопределенность относительно того, какая степень искажений и какие типы искажений слышны. Когда-то считалось, что 5% общих гармонических искажений — это порог слышимости. Позже считалось, что целью, которую необходимо достичь, чтобы искажения были неслышимыми, было 2%.

Now, high-quality amplifiers routinely specify distortion of less than 0.1% over the band from 20 Hz to 20 kHz. Despite this low distortion, many critical listeners claim to hear differences in performance which, if correctly identified, show that conventional distortion measurements are inadequate for indicating whether an amplifier's distortion is audible. This has led researchers to seek forms of distortion other than THD and IM, and some emphasis has been placed on transient distortion. However, this has still not given us the possibility of making a measurement and assigning a numerical value above which distortion may be audible and below which it is inaudible.

Теперь высококачественные усилители обычно имеют искажения менее 0,1% в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Несмотря на такой низкий уровень искажений, многие критически настроенные слушатели утверждают, что слышат различия в характеристиках, которые, если их правильно определить, показывают, что обычные измерения искажений недостаточны для определения того, слышны ли искажения усилителя. Это побудило исследователей искать другие формы искажений, помимо THD и IMD, и некоторый акцент был сделан на переходных искажениях. Однако это до сих пор не дало нам возможности провести измерение и назначить числовое значение, выше которого искажения могут быть слышны, а ниже которого они не слышны.

Примечание. Примерно тоже самое звучит и в статьях И.Алдошиной по психоакустике:

«В предыдущие периоды развития аудиотехники существовал огромный разрыв между объективными измерениями и субъективными оценками. Измерялось сравнительно небольшое количество параметров (АЧХ, КНИ, характеристика направленности и др.)

Задача психоакустики на данном этапе – ответить на вопрос: какие именно, и сколько параметров надо измерять в аудиоаппаратуре, с тем, чтобы с их помощью можно было адекватно судить о качестве звучания. Иначе говоря, установить связь между тем, что мы измеряем, и что мы слышим. »

«....Пороги слуховой чувствительности существенно зависят от характера нелинейности: при появлении низших (второй, третьей) гармоник пороги слуха для тональных сигналов составляют 0,1%, для фортепианной музыки 1...2%, для эстрадной музыки до 7%.

... исследования Блаурта показали, что слух наиболее чувствителен к скорости изменения фазы, т.е. к групповому времени задержки (ГВЗ).»

"Звукорежиссер" : 2001 : №4 Тембр, часть 3

... Было установлено, что слух реагирует в первую очередь на скорость изменения фазы (т.е. ее производную по частоте), которая называется "групповое время задерживания ГВЗ":

$$\tau = -d\varphi(\omega)/d\omega$$

Чем меньше ГВЗ, тем выше скоростные характеристики сигналов низкого уровня, тем лучше усилитель передает микродинамику.

What is clearly needed is a method of determining whether distortion is audible in a given piece of equipment. This determination should be made using music as a source, and not limiting the investigation to steady-state signals such as sine or square waves.

Что явно необходимо, так это метод определения того, слышны ли искажения в данном оборудовании. Это определение следует делать, используя музыку в качестве источника, а не ограничивая исследование установившимися сигналами, такими как синусоидальные или прямоугольные волны.

If a listener could compare the reproduced sound with the original, he could judge for himself whether the degree of distortion is detectable. This, however, is a test of the entire audio chain, including microphones and loudspeakers. One could not separately determine whether the amplifier produced audible distortion or not. To listen for an amplifier's distortion, one must have a reference for comparison.

Если бы слушатель мог сравнить воспроизведенный звук с оригиналом, он мог бы сам судить, заметна ли степень искажений. Однако это проверка всей аудиоцепи, включая микрофоны и динамики. Отдельно определить, производит ли усилитель слышимые искажения или нет, не удалось. Чтобы прослушать искажения усилителя, необходимо иметь эталон для сравнения.

The most accurate and convenient reference is the traditional straight wire. A straight wire has infinitesimal distortion and must, by its nature, be more accurate than any active device such as an amplifier. It immediately opens up the possibility of A/B comparison between it and the amplifier being tested. This can be done by putting two amplifiers in series, with the gain of the second one reduced to unity to match the gain of the straight wire; then the amplifier under test can be bypassed by switching the straight wire across it.

Наиболее точным и удобным эталоном является традиционный прямой провод. Прямой провод имеет бесконечно малые искажения и по своей природе должен быть более точным, чем любое активное устройство, например усилитель. Это сразу открывает возможность сравнения A/B между ним и тестируемым усилителем. Это можно сделать, подключив два усилителя последовательно, при этом коэффициент усиления второго будет уменьшен до единицы, чтобы соответствовать коэффициенту усиления прямого провода; тогда тестируемый усилитель можно обойти, подключив к нему прямой провод.

Figure 1 illustrates the simple setup for making this A/B test. One channel of a stereo amplifier can be used as the driving source for either the other channel or for the straight wire. Two subtle points must be observed in this experiment. First, there should be a loudspeaker load on the driving amplifier when the switch is in the "A" position. If that speaker load is not

used, the test is less stringent, as the effect of the speaker on amplifier performance is not taken into consideration.

На рис. 1 показана простая схема проведения этого А/В-теста. Один канал стереоусилителя можно использовать в качестве источника возбуждения либо для другого канала, либо для прямого провода. В этом эксперименте следует обратить внимание на два тонких момента. Во-первых, когда переключатель находится в положении «А», на усилитель мощности должна быть акустическая нагрузка. Если нагрузка динамика не используется, испытание будет менее строгим, поскольку влияние динамика на характеристики усилителя не принимается во внимание.

As we shall see later, a change in loud speaker load can indeed change the performance of an amplifier. Figure 1 shows the driving amplifier with its own speaker load when switched to "A" and with the test amplifier's load when switched to "B." Naturally, both loud speakers should be identical. A second requirement is that the speaker load for the driving amplifier must be isolated by putting it in a separate room. Otherwise, sound from that speaker will mask the sound of the amplifier-versus-wire comparison.

Как мы увидим позже, изменение нагрузки громкоговорителя действительно может изменить характеристики усилителя. На рисунке 1 показан усилитель возбуждения с собственной акустической нагрузкой при переключении на «А» и с нагрузкой тестового усилителя при переключении на «В». Естественно, оба динамика должны быть одинаковыми. Второе требование заключается в том, что акустическая нагрузка усилителя мощности должна быть изолирована, поместив ее в отдельную комнату. В противном случае звук из этого динамика будет маскировать звук сравнения усилителя и провода.

A/B testing is a valid and scientific method of comparison. However, it requires judgment, and it has been criticized as being confusing, fatiguing and artificial. There is no question that what one person hears on an A/B test is not necessarily what another hears. There is considerable dissension about the merits of A/B testing. Since it is not universally accepted, it is fortunate that there is a more sensitive listening test for distortion. The preferred way to listen for distortion is to use what I call the straight-wire differential test (SWDT). Its arrangement is illustrated in Fig. 2. Here again, one channel of the stereo amplifier is used to provide a low-impedance driving source, and the gain of the other channel is set to unity to match the straight wire. In practically all power amplifiers, the input and output are in phase, so a transducer such as a loudspeaker can be connected from input to output in a differential mode. It is obvious that if input and output are identical, there will be no signal in the loudspeaker. Any sound that is audible after careful adjustment of the level will therefore be distortion.

А/В-тестирование — это действенный и научный метод сравнения. Однако оно требует суждения и подвергается критике как сбивающее с толку, утомляющее и искусственное. Нет сомнений в том, что то, что слышит один человек во время А/В-теста, не обязательно совпадает с тем, что слышит другой. Существуют значительные разногласия по поводу достоинств А/В-тестирования. Поскольку это не является общепринятым, к счастью, существует более чувствительный тест на искажения при прослушивании. Предпочтительный способ обнаружения искажений — использовать то, что я называю дифференциальным тестом по прямому проводу (SWDT). Его расположение показано на рис. 2. Здесь снова один канал стереоусилителя

используется для обеспечения источника возбуждения с низким импедансом, а коэффициент усиления другого канала устанавливается равным единице, чтобы соответствовать прямому проводу. Практически во всех усилителях мощности вход и выход синфазны, поэтому преобразователь, например громкоговоритель, можно подключить от входа к выходу в дифференциальном режиме. Очевидно, что если вход и выход идентичны, сигнала в громкоговорителе не будет. Поэтому любой звук, слышимый после тщательной регулировки уровня, будет искажением.

What happens here is that the original signal is removed by subtracting the output from the input; this unmasks the distortion generated in the second (test) amplifier. This remainder includes nonlinearities such as THD and IM, all types of transient distortion, and amplitude and phase aberrations. In fact, it includes not only all known distortions, but also any which may be identified in the future. What it does not do is separate the types of distortion, so no weighting can be given to the more obnoxious ones.

Здесь происходит следующее: исходный сигнал удаляется путем вычитания выходного сигнала из входного; это демаскирует искажения, генерируемые во втором (тестовом) усилителе. Этот остаток включает такие нелинейности, как THD и IMD, **все типы переходных искажений, а также амплитудные и фазовые aberrации.** Фактически, сюда входят не только все известные искажения, но и любые, которые могут быть выявлены в будущем. Чего он не делает, так это разделяет типы искажений, поэтому более неприятным из них нельзя присвоить никакого веса.

Примечание. Можно подумать что цифра THD = 0,001% говорит о каких либо конкретных искажениях. Переходные искажения усилителя возникающие на первых периодах скрыты полностью, так как тест проводится в установившемся режиме. Даже разработчики программы Micro-Cap поддались на провокацию и ограничили минимальное количество подаваемых для просчета циклов 4-мя.

When this test is performed on most amplifiers, one can hear grunge, harshness, edginess, grain, and other irritating sounds. One can also hear some relatively clean sounds which come mainly from amplitude and phase errors. These are not necessarily annoying, but they are inaccuracies, and the best amplifier designs should minimize them as well as the irritating factors.

Когда этот тест проводится на большинстве усилителей, можно услышать гранж, резкость, резкость, зернистость и другие раздражающие звуки. Также можно услышать относительно чистые звуки, которые возникают в основном из-за ошибок по амплитуде и фазе. Это не обязательно раздражает, но это неточности, и лучшие конструкции усилителей должны минимизировать их, как и раздражающие факторы.

The SWDT is elegantly simple, requiring no instruments. Its merits are obvious, but it is extremely difficult to apply because of its great sensitivity: A few minutes (fractions of a degree) of phase shift or a few milli-bels (hundredths of a decibel) of amplitude variation will show up as significant sound.

SWDT элегантно прост и не требует никаких инструментов. Его достоинства очевидны, но его крайне сложно применять из-за большой чувствительности: несколько минут (доли градуса) фазового сдвига или несколько миллибел (сотые доли децибела) изменения амплитуды проявятся как существенный звук.

When a similar approach to amplifier testing was explored in the past (see "Testing Amplifiers with a Bridge" by Andrew R. Collins, Audio, March 1972), experimenters found relatively high levels of sound due to phase and amplitude variations. They did not consider these to be important, and they compensated the straight wire to minimize such variations. They made the assumption that phase variations were inaudible. This is disputable and controversial. I prefer to correct the amplifier to eliminate these aberrations, rather than to eliminate them from the signal source.

Когда подобный подход к тестированию усилителей был исследован в прошлом (см. «Тестирование усилителей с мостом», Эндрю Р. Коллинз, «Аудио», март 1972 г.), экспериментаторы обнаружили относительно высокие уровни звука из-за изменений фазы и амплитуды. Они не считали это важным и компенсировали прямой провод, чтобы минимизировать такие отклонения. Они предположили, что изменения фазы незаметны. Это сомнительно и спорно. Я предпочитаю корректировать усилитель, чтобы устранить эти aberrации, а не устранять их из источника сигнала.

Примечание. В этом и заключается ошибка векторного анализа Сапожкова-Акулиничева-Баксандалла. Подгоняя АЧХ входного сигнала под АЧХ тестируемого усилителя в значительной степени устраняются искажения переходных процессов в усилителях. При использовании компенсационного метода измерения искажений задержка входного сигнала на время прохождения сигнала в усилителе должна быть идеальной! Только в этом случае мы увидим все виды искажений вносимых усилителем.

The SWDT gives the amplifier designer a tool for improving the sonic performance of his designs. My own company's first amplifier to be designed with the aid of this technique was the Hafler XL-280. Our approach was very conservative yet still innovative; we aimed for a wide-band, low-distortion design before the application of overall negative feedback, and before tweaking the final elements for minimum phase shift simultaneous with minimum distortion and adequate stability margin. Components were selected, bias currents were tested, phase compensation was added—all to get minimum sound output with the SWDT.

SWDT дает разработчику усилителя инструмент для улучшения звуковых характеристик его конструкции. Первым усилителем моей компании, разработанным с использованием этой технологии, был Hafler XL-280. Наш подход был очень консервативным, но все же новаторским; мы стремились к созданию широкополосной конструкции с низким уровнем искажений до применения общей отрицательной обратной связи и до настройки конечных элементов для минимального фазового сдвига одновременно с минимальными искажениями и достаточным запасом устойчивости. Были выбраны компоненты, проверены токи смещения, добавлена фазовая компенсация — все для того, чтобы получить минимальный выходной шум при использовании SWDT.

The XL-280 amplifier is completely symmetrical from input to output. It uses multiple power supplies with a common power transformer. There is a supply for each channel, and separate supplies for the Class-A driver stages and for the Class-AB output stages.

Усилитель XL-280 полностью симметричен от входа до выхода. Он использует несколько источников питания с общим силовым трансформатором. Питание имеется для каждого канала, а также отдельные источники питания для каскадов драйвера класса А и выходных каскадов класса АВ.

The input transistors are J-FETs in a cascode configuration. This provides a high degree of linearity with very low noise. The high input impedance of the J-FETs permits a higher impedance input point for the negative feedback loop.

Входные транзисторы представляют собой J-FET в каскодной конфигурации. Это обеспечивает высокую степень линейности при очень низком уровне шума. Высокий входной импеданс J-FET позволяет использовать более высокий импеданс в входной точке контура отрицательной обратной связи.

A driver stage follows, with current mirroring back to the first stage. This drives the emitter-follower stage, which provides a low-impedance source for the relatively high input capacitance of the multiple output section.

Далее следует ступень драйвера с отражением тока обратно на первую ступень. Это приводит в действие каскад эмиттерного повторителя, который обеспечивает источник с низким импедансом при относительно высокой входной емкости многовыходной секции.

The output stage consists of two complementary groups of three MOS FETs in parallel, operating as source followers. These MOS-FETs are used because of their high speed, high degree of linearity, and extreme robustness; we have experienced minimal failures out of the hundreds of thousands we have used in predecessor amplifiers.

Выходной каскад состоит из двух взаимодополняющих групп по три МОП-транзистора, подключенных параллельно и работающих как истоковые повторители. Эти МОП-транзисторы используются из-за их высокой скорости, высокой степени линейности и чрезвычайной надежности; у нас были минимальные сбои из сотен тысяч, которые мы использовали в усилителях-предшественниках.

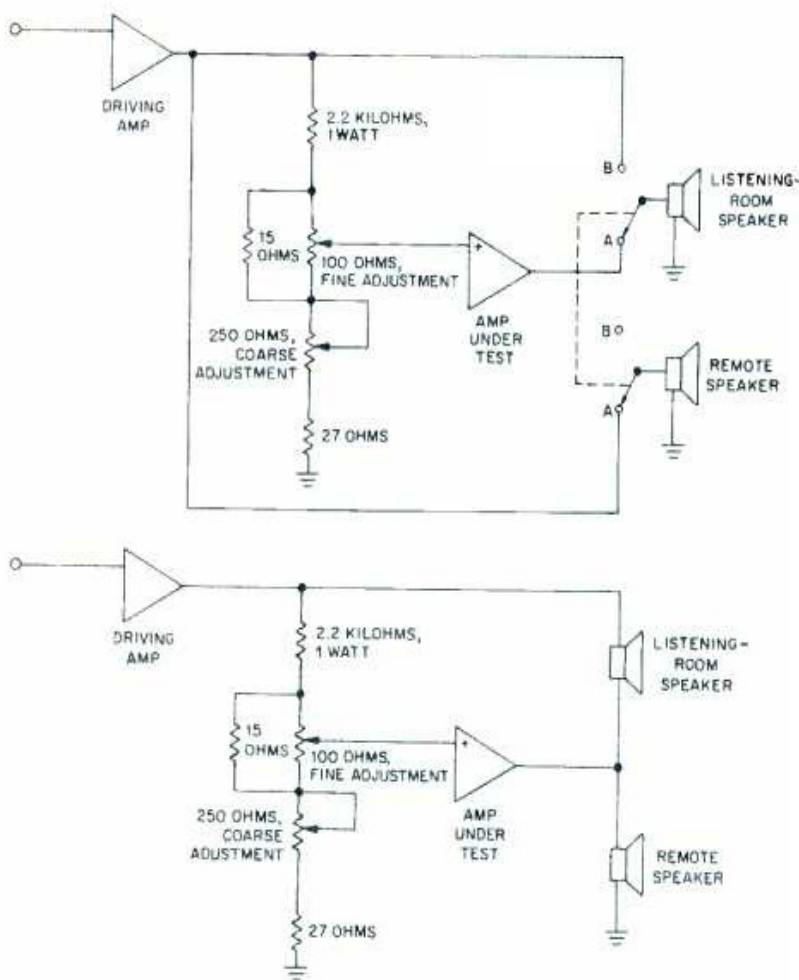


Fig. 1--Setup for comparing the sound of an amplifier to that NG-of a straight wire. In ER switch position "A," listeners hear the driving amp's signal through the straight wire; in position "B," hey hear it through he amplifier under test.

Рис. 1. Установка для сравнения звука усилителя со звуком NG-прямого провода. В положении переключателя ER «А» слушатели слышат сигнал усилителя мощности через прямой провод; в положении «В», эй, услышь это через тестируемый усилитель.

Fig. 2--Setup for straight-wire differential test (SWDT). When the pots are adjusted or minimum sound output the speaker, only the distortion and phase and amplitude errors are heard.

Рис. 2. Установка для дифференциального испытания прямого провода (SWDT). При настройке потенциометров или минимальной громкости звука, выдаваемого динамиком, слышны только искажения и ошибки фазы и амплитуды.

Примечание. Драйверный усилитель желательно иметь высокого качества, в противном случае драйверный усилитель уже убивший микродинамику не позволит правильно оценить тестируемый усилитель.

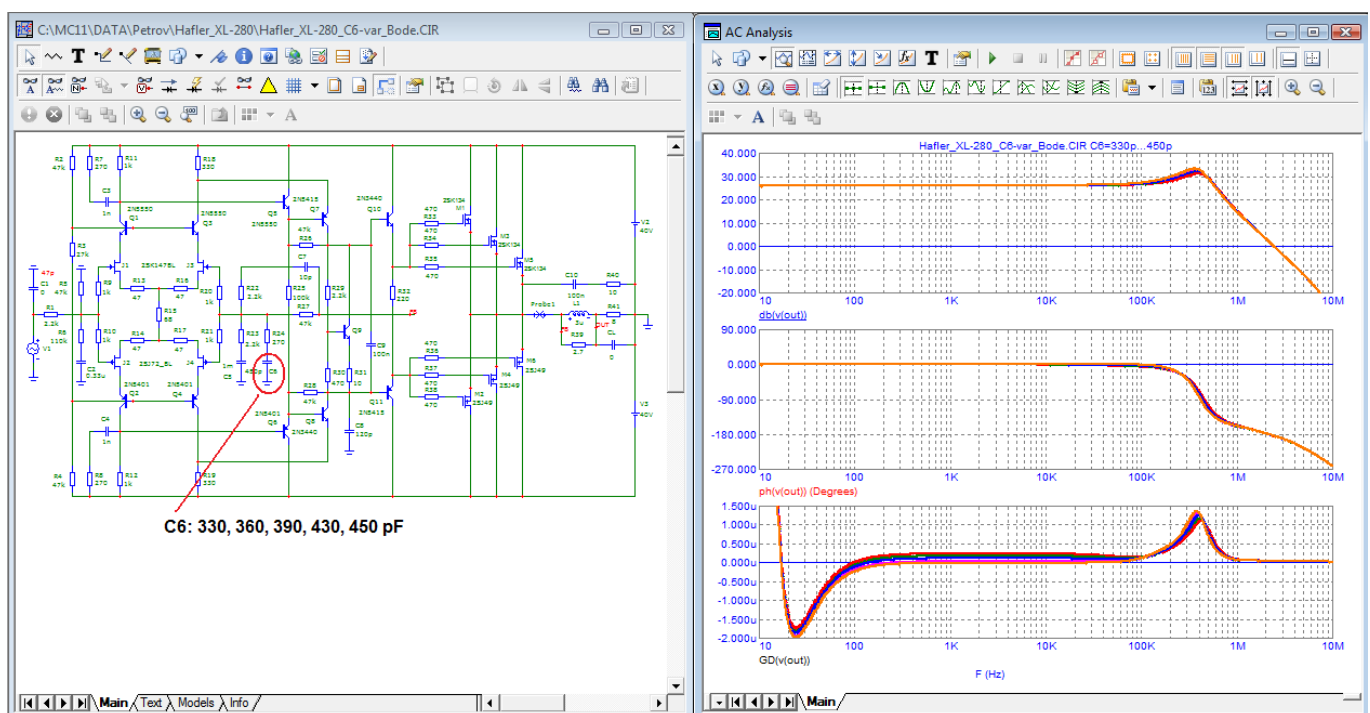
The XL-280 uses a moderate amount of negative feedback in an overall loop, plus local feedback such as in the source-follower output stage. Though there are some who unjustly accuse negative feedback of being detrimental, I think it is safe to say that negative feedback, when properly applied, is always beneficial. Proper application involves using it with a very linear amplifier and assuring an adequate stability margin. Used in that way, negative feedback will reduce distortion and widen band-pass. Most important, it will also stabilize operating

characteristics so that performance will not drift in use and so that there will be negligible variation from one production unit to another.

*XL-280 использует умеренное количество отрицательной обратной связи в общем контуре, а также локальную обратную связь, например, в выходном каскаде исток-повторитель. Хотя есть люди, которые несправедливо обвиняют отрицательную обратную связь во вреде, я думаю, можно с уверенностью сказать, что отрицательная обратная связь, **если ее правильно применять**, всегда полезна. Правильное применение предполагает использование его с очень линейным усилителем и обеспечение достаточного запаса стабильности. При таком использовании отрицательная обратная связь уменьшит искажения и расширит полосу пропускания. Самое главное, это также стабилизирует рабочие характеристики, так что производительность не будет меняться в процессе использования и что от одной производственной единицы к другой будут незначительные различия.*

Phase compensation is used in the XL-280 to achieve minimum phase shift in the audio band, in order to get maximum sensitivity from the SWDT.

Фазовая компенсация используется в XL-280 для достижения минимального фазового сдвига в звуковом диапазоне и получения максимальной чувствительности SWDT.



Нижний график ГВЗ говорит о том что можно получить даже отрицательное значение ГВЗ без опасения получить при этом возбуд. Для выполнения критерия SWDT во всей звуковой полосе ГВЗ на горизонтальном участке должно быть ≤ 8 нс.

Achieving the goal of very low phase shift at high frequencies precludes the use of the customary output coil found in most amplifiers. To carry the control of phase to the ultimate, a phase "tweaker" is positioned so that it is accessible from outside the amplifier.

Достижение очень низкого фазового сдвига на высоких частотах исключает использование обычной выходной катушки, используемой в большинстве усилителей.

Чтобы довести контроль фазы до максимального уровня, фазовый «регулятор» расположен так, чтобы он был доступен снаружи усилителя.

This network consists of a series resistor and capacitor trimmer which adjust a small peak in the range above 200 kHz. We have aimed for a maximally flat amplifier in the audio range, and maximum flatness leads to a slight ringing-at ultrasonic frequencies, fortunately, where it cannot affect the sound quality. Putting a peak of 3 or 4 dB at 200 kHz is a good exchange for obtaining essentially no phase shift in the 5- to 10-kHz range.

Эта цепь состоит из последовательного резистора и подстроечного конденсатора, которые регулируют небольшой пик в диапазоне выше 200 кГц. Мы стремились к максимально ровному усилителю в звуковом диапазоне, а максимальная ровность приводит к небольшому звону — к счастью, на ультразвуковых частотах, где он не может повлиять на качество звука. Установление пика в 3 или 4 дБ на частоте 200 кГц является хорошей альтернативой практически полному отсутствию фазового сдвига в диапазоне от 5 до 10 кГц.

Примечание. Именно выброс ГВЗ на частотах выше 200 кГц и приводит к тому что в начале и конце бурстов частотой 10 кГц возникают SID-искажения (Slew-induced distortion). Это то, на что не обратил внимание Хафлер проводя тесты в установившемся режиме.

In testing the amplifier under many conditions, it was observed that the optimum point of operation, as determined by the SWDT, shifted with a change of loudspeaker. This was due to variations in loudspeaker impedance and the fact that the amplifier's internal impedance increased at high frequencies. A change in loudspeaker impedance made a small change in amplitude response. These small variations may be the cause of some of the sonic differences which are heard by "golden-ear" listeners. Fortunately, these small deviations can be readily compensated with the variable phase shift "tweaker" built into the amplifier.

При тестировании усилителя во многих условиях было замечено, что оптимальная точка работы, определенная SWDT, смещалась при смене громкоговорителя. Это произошло из-за изменений импеданса громкоговорителя и того факта, что внутреннее сопротивление усилителя увеличивалось на высоких частотах. Изменение импеданса громкоговорителя привело к небольшому изменению амплитудной характеристики. Эти небольшие вариации могут быть причиной некоторых звуковых различий, которые слышат слушатели с «золотым ухом». К счастью, эти небольшие отклонения можно легко компенсировать с помощью «твикера» переменного фазового сдвига, встроенного в усилитель.

The result is that, by using the SWDT, it is practical to compensate the individual system for the specific type of loud speaker in use.

В результате, используя SWDT, можно компенсировать индивидуальную систему в зависимости от конкретного типа используемого громкоговорителя.

For most listeners, the minute difference due to the final tweaking is unimportant, and a check using the A/B test of Fig. 1 confirms this. Most people can be satisfied with an adjustment based on any conventional speaker load, rather than the specific speaker they are using. However, for perfectionists and the most critical "golden ears," the XL-280 amplifier can be adjusted to its ultimate capability with specific loudspeakers, using the SWDT as the measuring tool.

Для большинства слушателей минутная разница из-за финальной настройки не имеет значения, и проверка с помощью А/В-теста на рис. 1 подтверждает это. Большинство людей могут быть удовлетворены регулировкой, основанной на любой обычной нагрузке на динамики, а не на конкретном динамике, который они используют. Однако для перфекционистов и самых критичных «золотых ушей» усилитель XL-280 можно настроить на максимальную мощность с помощью специальных громкоговорителей, используя SWDT в качестве измерительного инструмента.

As mentioned earlier, when we applied the straight-wire differential test to many amplifiers, the residual noise we heard included both grungy, irritating sounds, which were products of annoying distortion, and "clean" sounds which were the result of phase and amplitude aberrations. Phase and amplitude distortions, while not unpleasant to the ear, can affect the tonal balance and timbre of the sound and also influence the imaging and sound stage of the stereo performance. Applying the SWDT to the XL-280, we have found that when playing music above normal listening levels or when seated very close to the loudspeakers, there may be slight of al sound which are clearly identifiable by their cleanliness as phase and amplitude distortions. Their amplitudes are less than we have found in any other amplifier, and they are sufficiently minor to be completely masked by normal musical content; this is verified by the A/B test, which affirms that the XL-280 is indistinguishable from a straight wire. After tweaking for the individual loudspeakers being used, measurements show up to 70 dB of nulling in the mid-band and about 60 dB over the rest of the audio spectrum. This means that the total distortions do not exceed 0.1% over the audio band and confirms their inaudibility.

Как упоминалось ранее, когда мы применили дифференциальный тест по прямому проводу ко многим усилителям, остаточный шум, который мы услышали, включал как шероховатые, раздражающие звуки, которые были продуктами раздражающих искажений, так и «чистые» звуки, которые были результатом фазовых и амплитудных aberrаций. . Фазовые и амплитудные искажения, хотя и не неприятны для уха, могут повлиять на тональный баланс и тембр звука, а также повлиять на образ и звуковую сцену стереоисполнения. Применяя SWDT к XL-280, мы обнаружили, что при воспроизведении музыки на уровне громкости выше нормального или при расположении очень близко к громкоговорителям могут присутствовать небольшие звуки, которые четко идентифицируются по их чистоте как фазовые и амплитудные искажения. Их амплитуды меньше, чем мы обнаружили в любом другом усилителе, и они достаточно малы, чтобы быть полностью замаскированными обычным музыкальным содержанием; это подтверждается тестом А/В, который подтверждает, что XL-280 неотличим от прямого провода. После настройки отдельных используемых громкоговорителей измерения показывают обнуление до 70 дБ в средней полосе и около 60 дБ в остальном звуковом спектре. Это означает, что суммарные искажения не превышают 0,1% по звуковому диапазону и подтверждает их неслышимость.

When the SWDT gives a substantial null on musical material at normal listening levels, the sonic accuracy of the amplifier cannot be improved. Any other amplifier which does not produce as deep a null on the SWDT, or which sounds different from one that does, is less accurate, regardless of whether its sound is pleasing. Once this level of amplifier performance is reached, further improvements in sonic quality must be obtained from elements in the hi-fi chain other than the power amplifier, although, of course, designers will still face the challenges of reliability, efficiency and economy in amplifier designs.

Когда SWDT дает существенный нулевой уровень музыкального материала при нормальных уровнях прослушивания, точность звучания усилителя улучшить невозможно. Любой другой усилитель, который не дает такого глубокого нуля на SWDT или который звучит иначе, менее точен, независимо от того, приятен ли его звук. Как только этот уровень производительности усилителя будет достигнут, дальнейшее улучшение качества звука должно быть достигнуто за счет элементов в цепи Hi-Fi, отличных от усилителя мощности, хотя, конечно, конструкторам по-прежнему придется сталкиваться с проблемами надежности, эффективности и экономичности усилителя.

(Source: Audio magazine, Feb. 1987)

Also see:

Understanding Common-Mode Signals (Feb. 1988)