

Measurement of a Neglected Circuit Characteristic

*Измерение характеристики игнорируемой цепи*

Gérard PERROT

Héphaistos Laboratories

Abstract

This paper is related to a new approach of audio circuit measurements.

Present distortion measurements fail to tally with listening tests, and try to define effects of memoryless non-linear transfer functions. Unfortunately, audio circuits are not memoryless.

This paper presents a measurement set for circuit memory. First measurements seem to exhibit good correlation between this new distortion and listening tests.

*Реферат*

*Эта статья связана с новым подходом к измерению аудиосхем.*

*Нынешние измерения искажений не совпадают с тестами на прослушивание и пытаются определить эффекты безмерных нелинейных передаточных функций. К сожалению, аудиосхемы не лишены памяти.*

*В этой статье представлен набор измерений для памяти схемы. Первые измерения показывают хорошую корреляцию между этим новым искажением и тестами на прослушивание.*

1 Introduction

Measurement of distortion is fundamental for design and evaluation of audio circuits. Several techniques have been defined for distortion measurement and have been widely used for improvement of audio circuits. However, the evaluation of top quality circuits via listening tests does not tally with the figures given by these techniques. and more and more people prefer tube circuits in spite of their poor distortion figures.

*1. Введение*

*Измерение искажений имеет основополагающее значение для проектирования и оценки аудиосхем. Для измерения искажений было определено несколько методов, которые широко использовались для улучшения аудиосхем. Однако оценка цепей высшего качества с помощью прослушивания не соответствует цифрам, полученным с помощью этих методов. и все больше и больше людей предпочитают ламповые схемы, несмотря на их низкие показатели искажения.*

There have been some attempts to define new, sharper measurements better correlated with subjective tests, but with little success. An explanation of this failure may be that these new measurements are based on the classical theoretical model of distortion, regardless of a possible misconception concerning distortion in audio circuits. Questioning the theoretical bases of audio circuit distortion is fruitful and leads to breaking new ground in audio circuit measurement.

*Были попытки определить новые, более точные измерения, лучше коррелирующие с субъективными тестами, но без особого успеха. Объяснение этой неудачи может заключаться в том, что эти новые измерения основаны на классической теоретической модели искажения, независимо от возможного неправильного представления об искажении в аудиосхемах. Вопросы теоретических основ искажения аудиосхем плодотворны и ведут к открытию новых горизонтов в измерении аудиосхем.*

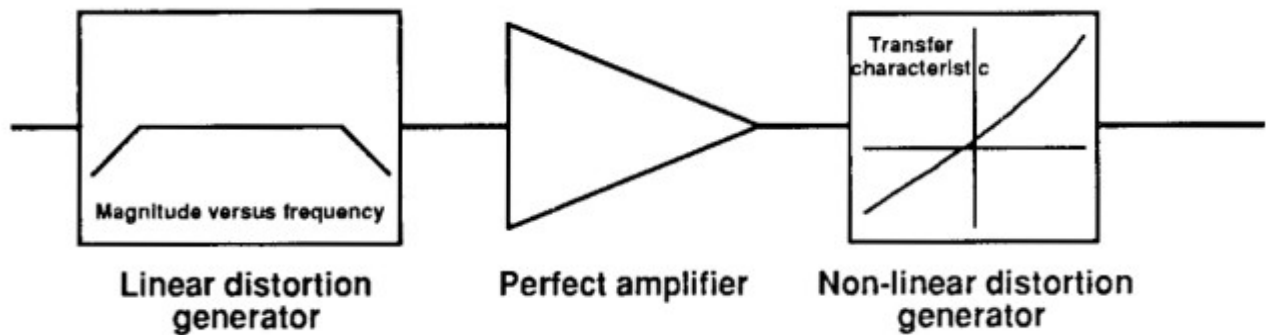
2 Summarised theoretical analysis

2.1 Traditional theoretical analysis

*2 Обобщенный теоретический анализ*

*2.1 Традиционный теоретический анализ*

Fig. 1 presents the classical theoretical model of an audio power amplifier. This model is the base for measuring amplifier distortion. It is made up of a perfect amplifier and two distortion generators : the linear distortion generator corresponds to the amplitude, phase, phase-slope and group delay modifications resulting from the band limitations of a real amplifier ; the non-linear distortion generator corresponds to the non-linear transfer characteristic of a real amplifier.



**Figure 1 : The classical model of an audio amplifier**

*На рис. 1 представлена классическая теоретическая модель усилителя мощности звука. Эта модель является основой для измерения искажений усилителя. Он состоит из идеального усилителя и двух генераторов искажений: генератор линейных искажений соответствует амплитуде, фазе, наклону фазы и групповой задержке, возникающим в результате ограничений полосы частот реального усилителя; генератор нелинейных искажений соответствует нелинейной передаточной характеристике реального усилителя.*

The aim of current distortion measurement is to characterise the distortion generators. Band limitation and non-linear transfer function are measured in order to fully characterise the circuit under test and to define its distortion for any audio signal. The characterisation of the distortion generators is made with sinusoidal signals.

*Цель измерения текущих искажений состоит в том, чтобы охарактеризовать генераторы искажений. Ограничение полосы и нелинейная передаточная функция измеряются для того, чтобы полностью охарактеризовать тестируемую схему и определить ее искажения для любого аудиосигнала. Характеристика генераторов искажений производится синусоидальными сигналами.*

This approach is rigorous and is valid as long as the model itself is valid. The validity of the distortion model is widely accepted even though this model does not take into account a known distortion phenomenon : Transient Intermodulation Distortion. The reason for this is probably that TID ( as far as this concept is limited to slew-rate limitation ) only affects poorly designed circuits and can easily be avoided. However, slew-rate limitation shows that linear and non-linear distortions can be combined in a more complex way than in the classical amplifier model.

*Этот подход является строгим и действителен до тех пор, пока действительна сама модель. Справедливость модели искажения широко признана, даже несмотря на то, что эта модель не принимает во внимание известное явление искажения: переходное интермодуляционное искажение. Причина этого, вероятно, в том, что TID (поскольку эта концепция ограничена ограничением скорости нарастания) влияет только на плохо спроектированные схемы, и его можно легко избежать. Однако ограничение скорости нарастания показывает, что линейные и нелинейные искажения могут комбинироваться более сложным образом, чем в классической модели усилителя.*

Unfortunately, other phenomena combining linear and non-linear distortion occur in many audio amplifiers. Thus their non-linearity is not adequately analysed with sine waves and thus by classical distortion measurements. It is possible to exaggerate these phenomena and to design two simple circuits [1] exhibiting exactly the same classical distortion measurement ( band limitations, non-linear distortion figures and spectrum ) but showing different distortions with many non-sinusoidal and audio signals. These circuits also have a very different sound quality. They prove that the classical measurements of a circuit are usually unable to define its sound quality.

*К сожалению, другие явления, сочетающие линейные и нелинейные искажения, имеют место во многих аудиоусилителях. Таким образом, их нелинейность не может быть адекватно проанализирована с помощью синусоидальных волн и, следовательно, с помощью классических измерений искажений. Можно преувеличить эти явления и спроектировать две простые схемы [1], демонстрирующие точно такие же классические измерения искажений (ограничения полосы частот, нелинейные цифры искажений и спектр), но показывающие различные искажения со многими несинусоидальными и звуковыми сигналами. Эти схемы также имеют очень разное*

качество звука. Они доказывают, что классические измерения цепи обычно не могут определить качество ее звука.

This example highlights a basic limitation of classical measurements in that static measurements are only reliable for stable systems. Classical measurements rely on the implicit hypothesis that the distortion characteristics are immutable. If not, classical measurements fail to fully characterise circuit distortion and to define circuit behaviour with any signal.

Этот пример подчеркивает основное ограничение классических измерений, заключающееся в том, что статические измерения надежны только для стабильных систем. Классические измерения основаны на неявной гипотезе о неизменности характеристик искажения. В противном случае классические измерения не смогут полностью охарактеризовать искажения цепи и определить поведение схемы при любом сигнале.

## 2.2 New theoretical analysis

### 2.2 Новый теоретический анализ

A thorough theoretical analysis of audio circuits reveals many possible causes making characteristics unstable and, especially, variable according to the signal. These changes often have time constants inducing memory phenomena.

There are many sources of memory in audio circuits :

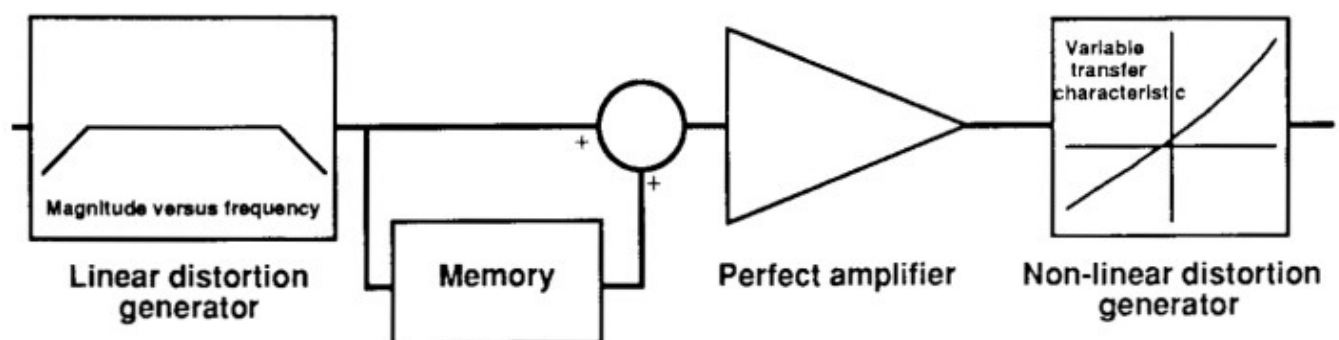
- Memory occurs in components. The main source of memory in components is known as thermal feedback in transistors ; memory also affects resistors ( self-heating ), capacitors ( dielectric absorption ) and wiring ( skin effect in cables ).
- Memory also occurs in circuits and mainly results from combinations of non-linear transfer functions and band limitations ( in power supplies and in feedback loops ).
- Global memory is the combination of all these memory effects.

Тщательный теоретический анализ звуковых цепей выявляет множество возможных причин, делающих характеристики нестабильными и особенно изменяющимися в зависимости от сигнала. Эти изменения часто имеют постоянные времени, вызывающие явления памяти.

В аудио схемах есть много источников памяти:

- Память происходит в компонентах. Основной источник памяти в компонентах известен как тепловая обратная связь в транзисторах; Память также влияет на резисторы (самонагрев), конденсаторы (диэлектрическая абсорбция) и проводку (скин-эффект в кабелях).
- Память также возникает в цепях и в основном возникает из-за комбинаций нелинейных передаточных функций и ограничений диапазона (в источниках питания и в петлях обратной связи).
- Глобальная память представляет собой комбинацию всех этих эффектов памяти.

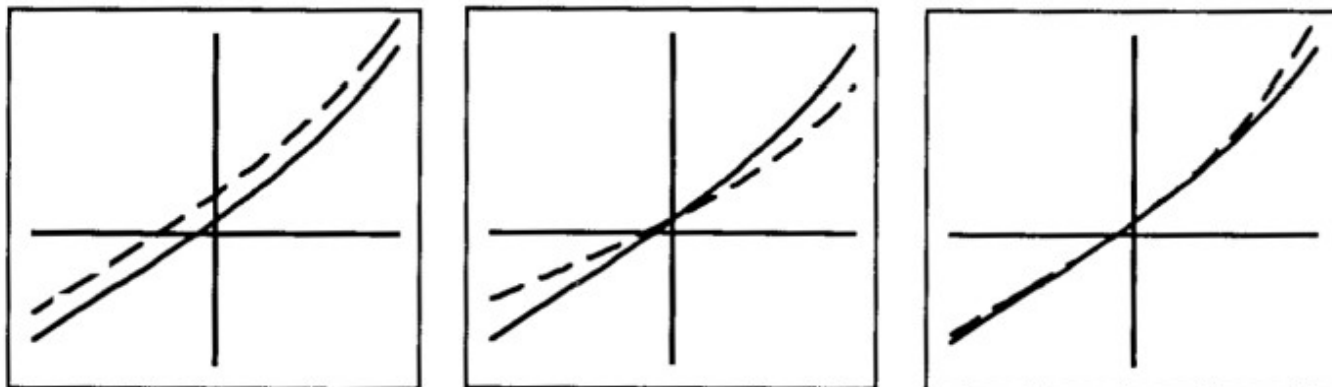
A new circuit model including memory ( Fig. 2 ) can be proposed for distortion analysis. The linear distortion is produced not only by the band limitation effects, but also by the memorizing of the signal. The non-linear distortion is produced by a non-linear variable transfer function. Fig. 3 presents the basic possible variations of the transfer function ( the distortion of the memorised signal might also be considered ).



**Figure 2 : The new model of an audio amplifier**

Для анализа искажений может быть предложена новая модель схемы, включающая память (рис. 2). Линейные искажения возникают не только из-за эффектов ограничения полосы,

но и из-за запоминания сигнала. Нелинейное искажение создается нелинейной переменной передаточной функцией. На рис. 3 представлены основные возможные варианты передаточной функции (можно также учитывать искажение запоминаемого сигнала).



**Figure 3 : The 3 basic variations of the transfer function : offset variation, gain variation and non-linearity variation .**

**NOTE : offset variations can be included in memory.**

The new distortion model is more complex than the previous one and its characteristics are not easy to measure. Memory phenomena are ignored by measurements using static signals like steady-state sine waves (or the signals used for the attempts of new measurements).

*Новая модель искажения более сложна, чем предыдущая, и ее характеристики нелегко измерить. Явления памяти игнорируются при измерениях с использованием статических сигналов, таких как устойчивые синусоидальные волны (или сигналов, используемых для попыток новых измерений).*

3 New measurement set

3.1 Principle

3 Новый набор измерений

3.1 Принцип

Memory measurement in audio circuits is not easy : the related phenomena are generally of low amplitude and may be complex ( with, for example, positive feedback ). However, a first new measurement technique has been defined, which confirms the reality of memory in audio circuits and indicates the order of magnitude of this phenomenon.

*Измерение памяти в звуковых схемах не просто: связанные явления обычно малоамплитудны и могут быть сложными (например, с положительной обратной связью). Тем не менее, была определена первая новая методика измерения, которая подтверждает реальность памяти в звуковых схемах и устройствах. указывает на порядок величины этого явления.*

The principle of this measurement consists of freezing the input signal at a fixed value and measuring the output drift which reveals the fleeting memory of the circuit under test. It can be done with digital audio circuits provided the DA converter is memoryless. Another method consists in switching the input to zero and to analyse the output drift. In that case, the effect of high frequency band limitations appears ( the related time constants are short compared with usual memory phenomena ). In both cases, the low frequency band limitations can affect output voltage and may mask memory (a low frequency pole is also a kind of memory).

*Принцип этого измерения состоит в том, чтобы зафиксировать входной сигнал на фиксированном значении и измерить выходной дрейф, который выявляет мимолетную память тестируемой схемы. Это можно сделать с помощью цифровых аудиосхем при условии, что ЦАП не имеет памяти. Другой метод заключается в переключении входа на ноль и анализе выходного дрейфа. В этом случае проявляется эффект ограничения полосы высоких частот (связанные с*

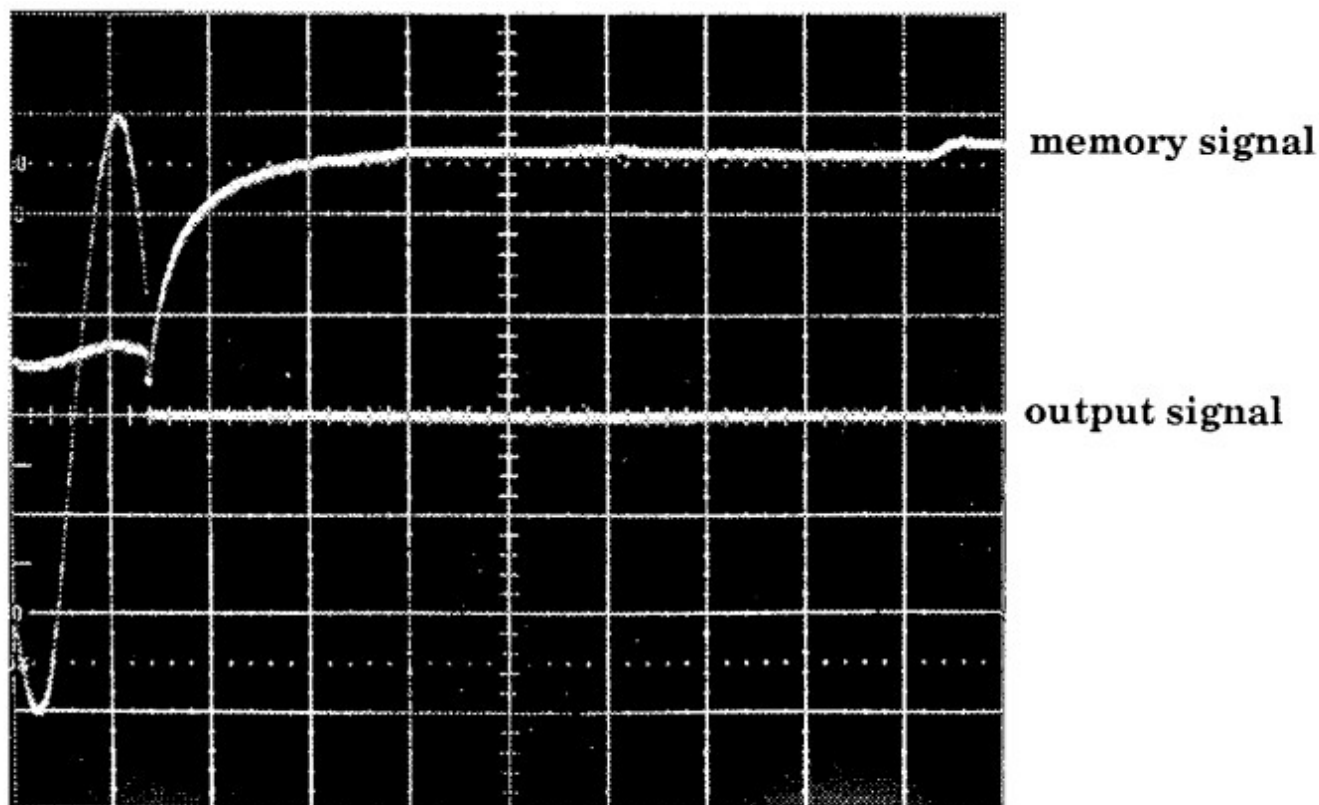
этим постоянные времени малы по сравнению с обычными явлениями памяти). В обоих случаях ограничения низкочастотной полосы могут повлиять на выходное напряжение и могут маскировать память (низкочастотный полюс тоже является своего рода памятью).

Measurements of sampled memory were made in the same condition ( a tone-burst of a 60 Hz sinus signal at 2.6 V pk-pk on a 4  $\Omega$  load ) for 3 amplifiers using different technologies :

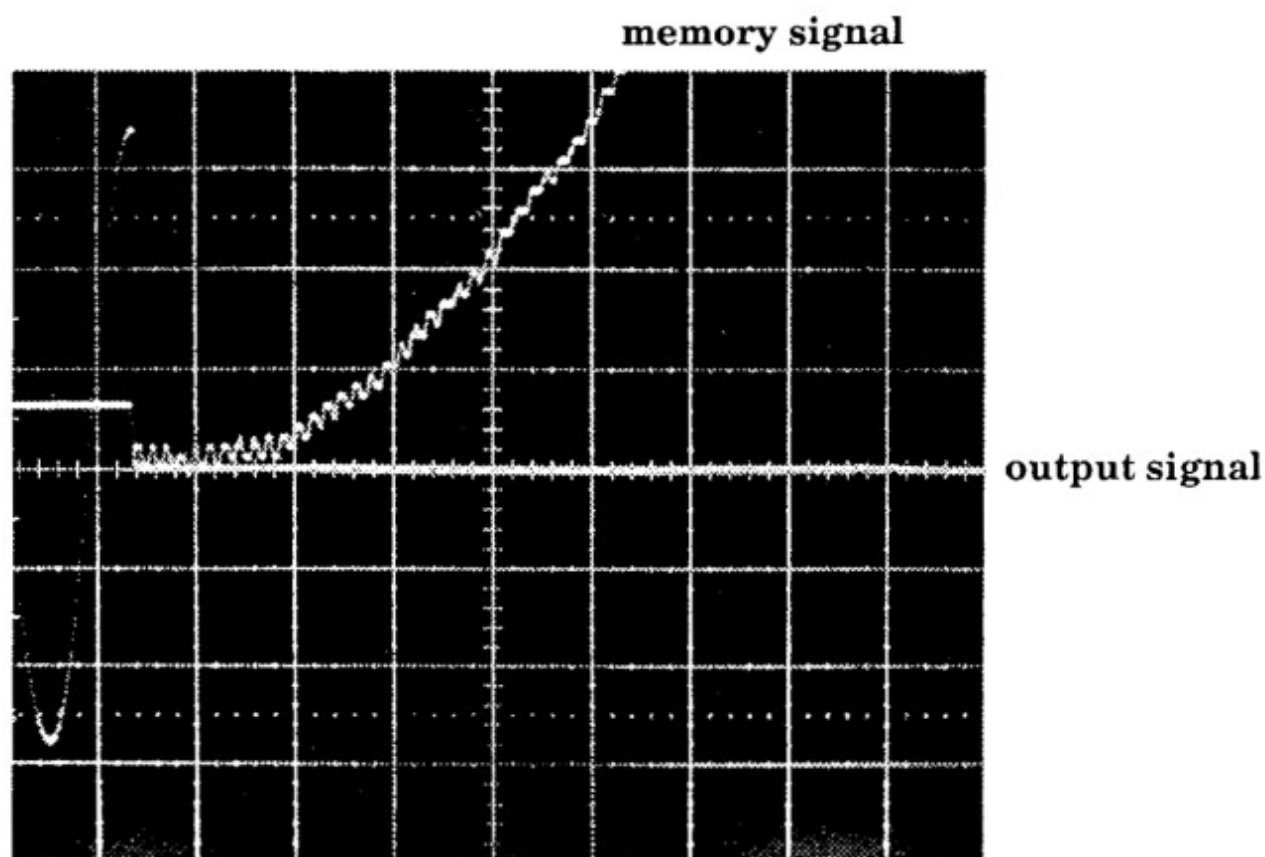
- a commercially available high quality transistor amplifier, with a THD of -86 dBc at the level of the test signal ( Fig. 8 )
- a triode tube amplifier designed by an audiophile, with a THD of -27 dBc at the level of the test signal ( Fig. 9 )
- a new transistor amplifier designed for low memory, with a THD of about -110 dBc at the level of the test signal ( Fig. 10 ).

*Измерения дискретизированной памяти проводились в одних и тех же условиях (всплеск синусоидального сигнала частотой 60 Гц при 2,6 В пик-пик на нагрузке 4 Ом) для трех усилителей с использованием разных технологий:*

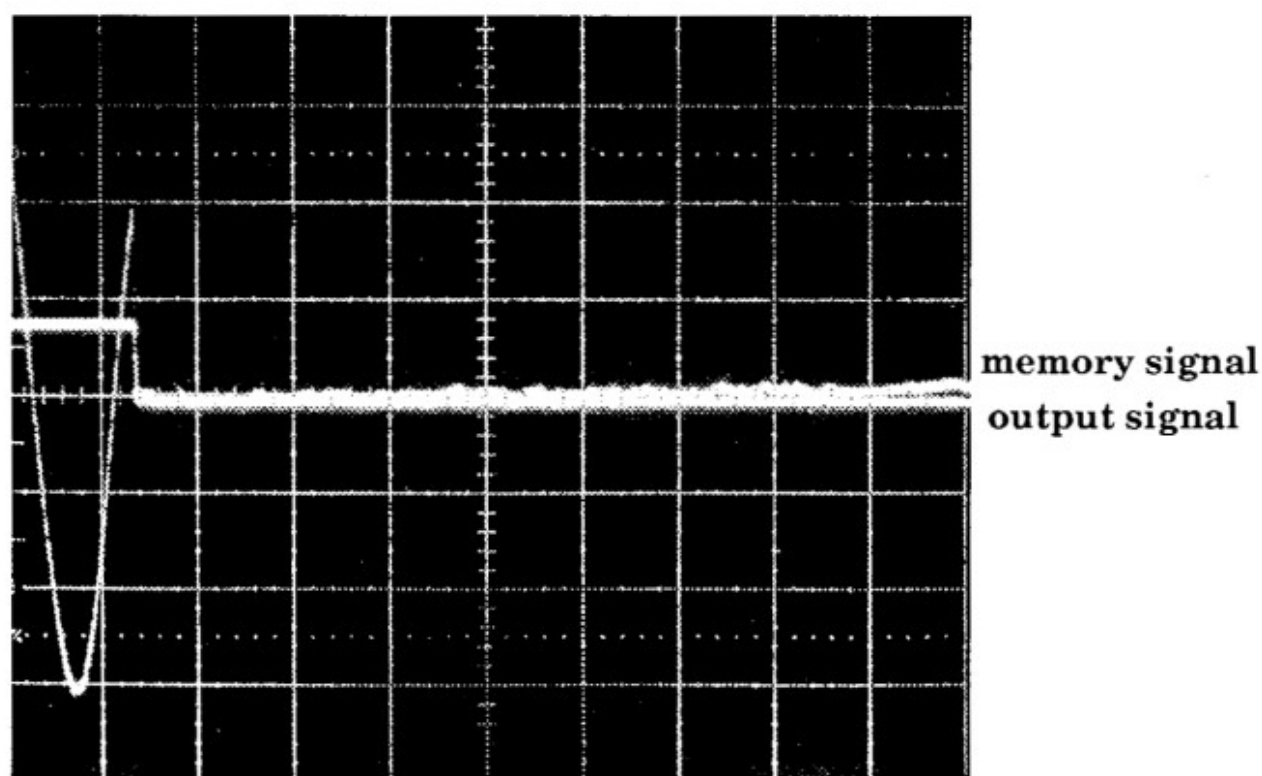
- имеющийся в продаже высококачественный транзисторный усилитель с коэффициентом нелинейных искажений -86 дБн на уровне тестового сигнала (рис. 8)
- ламповый усилитель на триоде конструкции аудиофила, с коэффициентом нелинейных искажений -27 дБн на уровне тестового сигнала (рис. 9)
- новый транзисторный усилитель, рассчитанный на малую память, с КНИ около -110 дБн на уровне тестового сигнала (рис. 10).



**Figure 8 : Output signal ( 2V/div. ) and memory signal ( 1 mV/div. ) for a classical transistor amplifier. Time scale is 10 ms/div.**



**Figure 9 : Output signal ( 2V/div. ) and memory signal ( 2 mV/div. )  
for a tube amplifier. Time scale is 10 ms/div.  
The curvature is induced by a second low-frequency pole.**



**Figure 10 : Output signal ( 2V/div. ) and memory signal ( 0,5 mV/div. )  
for a transistor amplifier using a new memory free technology. Time  
scale is 10 ms/div.**

#### 4.3 Correlation with listening tests

##### *4.3 Корреляция с тестами прослушивания*

Several listening tests were made with the measured AC amplifiers in different conditions, with different listeners ; they gave the same results. They seem to show that the measured memory is better correlated with sound quality than the THD.

The tube amplifier, in spite of its poor distortion figure, was judged as giving a much more natural sound than the traditional transistor amplifier, completely in opposition to the traditional distortion measurement values.

The memory-free transistor amplifier, thanks to its unusual sound quality, was preferred to the tube amplifier even by tube fanatics involved in the listening tests. This result seems to invalidate an explanation for the preference for tube circuits : the hypothesis of distortion pleasant for the ear.

*Было проведено несколько прослушиваний с измеренными усилителями переменного тока в разных условиях, с разными слушателями; они дали одинаковые результаты. Похоже, они показывают, что измеренная память лучше коррелирует с качеством звука, чем THD.*

*Ламповый усилитель, несмотря на плохой показатель искажений, был оценен как дающий гораздо более естественный звук, чем традиционный транзисторный усилитель, что полностью противоречит традиционным значениям измерения искажений.*

*Транзисторный усилитель без памяти, благодаря своему необычному качеству звука, предпочитали ламповому усилителю даже любители ламп, участвовавшие в прослушивании. Этот результат, по-видимому, опровергает объяснение предпочтения ламповых цепей: гипотезу приятного для слуха искажения.*

#### 4.4 Other measurements

Other limited measurements concerning the impact of capacitor technology and feedback factors on memory amplitude seem to confirm some empirical statements of “golden ears” ; they have to be confirmed by further experimentation.

##### *4.4 Другие измерения*

*Другие ограниченные измерения, касающиеся влияния конденсаторной технологии и факторов обратной связи на амплитуду памяти, по-видимому, подтверждают некоторые эмпирические утверждения о «золотых ушах»; они должны быть подтверждены дальнейшими экспериментами.*

#### 5 Conclusion

These limited first results of memory measurements in audio circuits prove that memory really occurs in audio circuits. They show that the proposed model for circuit distortion is closer to reality than the traditional model.

Even if the reason for the audibility of memory distortion is not yet clear, the sound quality improvement resulting from a memory-free design shows that memory is audible. Low memory distortion is the probable reason for the good sound of tubes.

Much Work still has to be done for measuring memory distortion and understanding its effects on audio signals ; however, memory distortion has to be considered when improving and measuring audio circuits.

##### *5. Вывод*

*Эти ограниченные первые результаты измерений памяти в звуковых схемах доказывают, что память действительно присутствует в звуковых схемах. Они показывают, что предлагаемая модель искажения схемы ближе к реальности, чем традиционная модель.*

*Даже если причина слышимости искажения памяти еще не ясна, улучшение качества звука в результате конструкции без памяти показывает, что память слышна. Низкие искажения памяти - вероятная причина хорошего звучания ламп.*

*Многое еще предстоит сделать для измерения искажений памяти и понимания их влияния на звуковые сигналы; однако при улучшении и измерении аудиосхем необходимо учитывать искажения памяти.*

- [11] Héphaïstos, “Comprendre le son des tubes” ( Understanding the sound of tubes ), LED n° 136, Jan./Feb. 1996
- [2] “An Audio Power Amplifier for Ultimate Quality Requirements”, J. Lohstroh and M. Ojala, IEEE trans. on audio and electroacoustics, vol. AU-21, n° 6, Dec 1973