

## Виды искажений и методы их измерений Distortion types and methods of their measurement

### Классификация искажений Distortion classification

Искажения подразделяются на два основных класса:

- линейные;
- нелинейные

Distortion is classified into two main classes:

linear;  
nonlinear

К линейным искажениям относят искажения возникающие в линейных цепях. Это и понятно, в линейных цепях (если эти цепи состоят из идеальных компонентов R, C, L) нет предпосылок для их возникновения. Однако мало где заостряется внимание что этот термин (понятие «линейность») относится только к установившемуся режиму после окончания переходных процессов когда в сигнале уже нет дополнительных компонент.

Linear distortions include distortions that occur in linear circuits. This is understandable, in linear circuits (if these circuits consist of ideal components R, C, L) there are no prerequisites for their occurrence. However, in few places attention is drawn to the fact that this term (the concept of "linearity") refers only to the steady state after the end of transient processes when there are no additional components in the signal.

Что касается нелинейных искажений, то для их возникновения существует множество причин: нелинейности входных и выходных импедансов усилителя, его каскадов усиления, усилительных компонентов, тепловые искажения как активных компонентов так и пассивных и многое другое. Помимо нелинейных искажений есть еще и интермодуляционные искажения, а при недостаточной скорости нарастания выходного напряжения и динамические искажения типа TIM.

As for nonlinear distortions, there are many reasons for their occurrence: nonlinearity of input and output impedances of an amplifier, its amplification stages, amplifying components, thermal distortions of both active and passive components, and much more. In addition to harmonic distortion, there is also intermodulation distortion, and if the slew rate of the output voltage is insufficient, there is also dynamic distortion of the TIM type.

При усилении синусоидальных сигналов с неизменной частотой (что и происходит при измерении THD) вопрос линейных искажений не играет никакой роли, так как измерения происходят по окончании переходных процессов.

When amplifying sinusoidal signals with a constant frequency (which happens when measuring THD), the issue of linear distortion does not play any role, since the measurements take place after the end of the transient.

Во время переходных процессов (не путать с кроссоверными искажениями, которые возникают вблизи перехода сигнала через ноль) возникает широкий спектр гармоник продолжительность и амплитуда которых зависит от продолжительности переходных процессов.

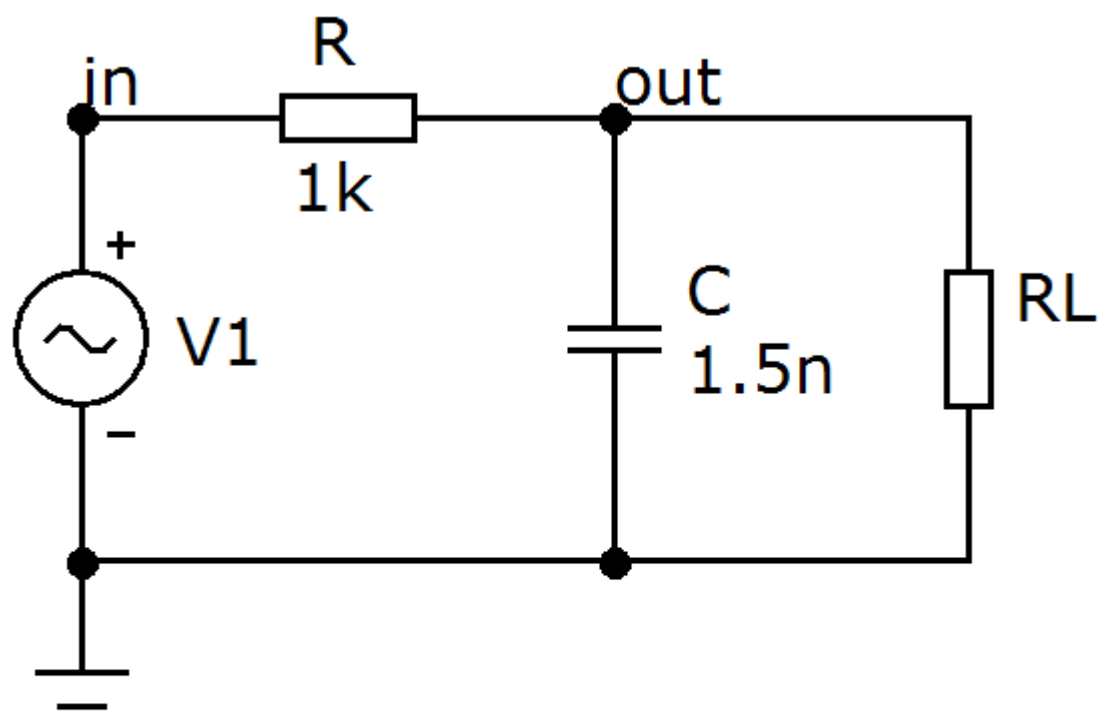
During transients (not to be confused with crossover distortions that occur near the zero crossing of the signal), a wide range of harmonics arise, the duration and amplitude of which depends on the duration of the transients.

Искажения усилителей постоянного тока с однополюсной коррекцией у многих ассоциируются с линейными искажениями простой RC-цепочки.

Рассмотрим параметры простой RC-цепи, рис. 1

The distortion of single-pole corrected DC amplifiers is often associated with the linear distortion of a simple RC circuit.

Consider the parameters of a simple RC-circuit, Fig. 1



$RL \gg R$   $G\text{Delay} = RC, \mu\text{s}$   
R - kohm;  
C - nF

Fig. 1

Снимем диаграмму Бode такой цепи вместе с ГВЗ, рис. 2  
 Let's remove the Bode diagram of such a circuit together with the Group Delay, fig. 2

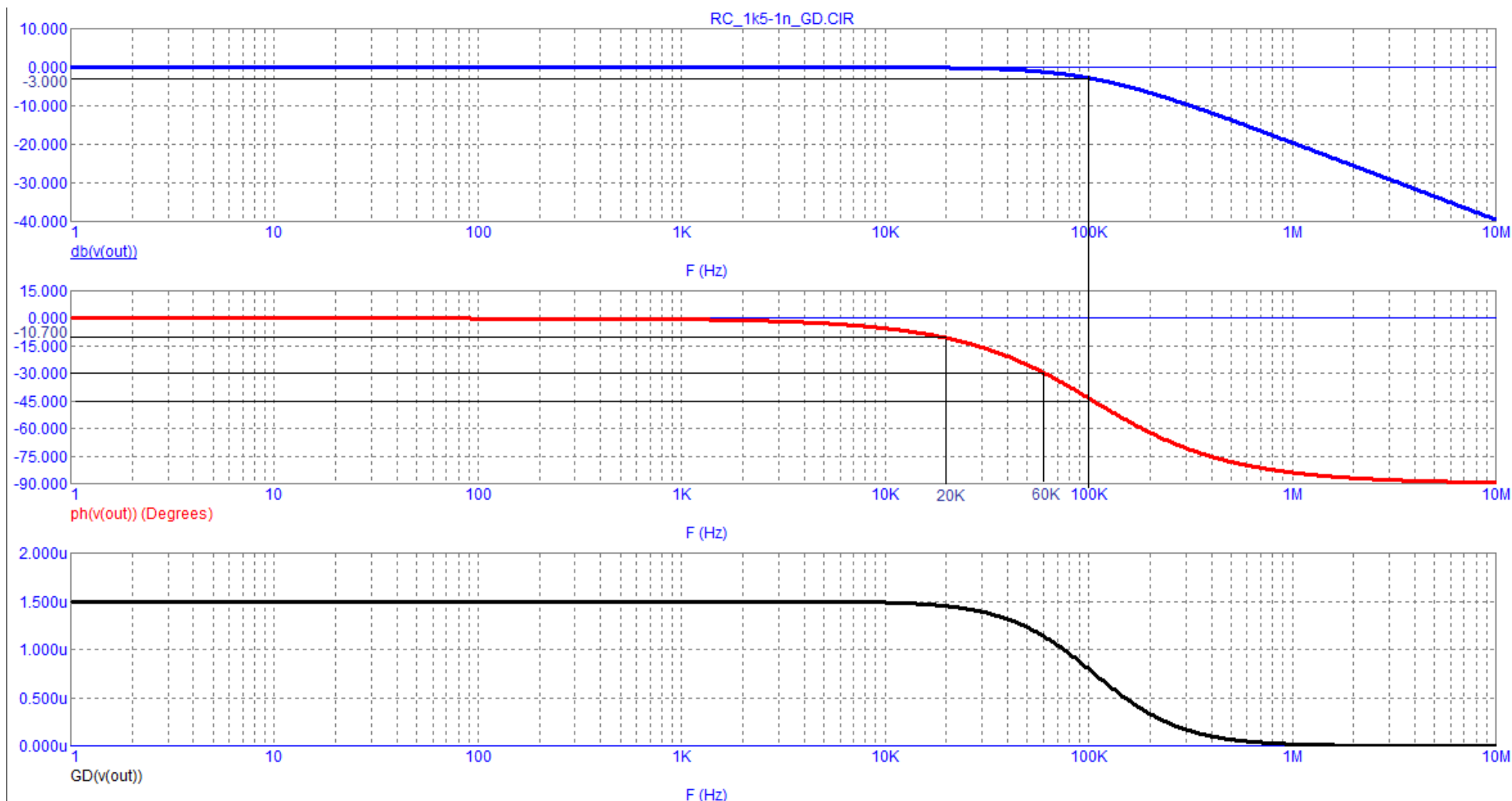


Fig. 2

Полоса пропускания такой цепи на уровне -3 дБ от постоянного тока до 100 кГц. Сдвиг фазы на частоте 100 кГц равен 45 градусов. ГВЗ в мкс равно произведению RC, где сопротивление в кОмах, а емкость в нанофарадах. ГВЗ примерно постоянно до 1/10 частоты среза, т. е. до частоты 10 кГц. На самом деле мы видим что фаза начала крутиться гораздо раньше, практически с частоты 1 кГц. Как утверждает такая наука как психоакустика слух менее чувствителен к амплитудным искажениям и наиболее чувствителен именно к фазовым искажениям. В качестве примера возьмем сигнал частотой 20 кГц с подмешанной к нему третьей гармоникой равной 60 кГц. Согласно диаграммы Бode третья гармоника будет сдвинута на 30 градусов. К чему это приведет наглядно видно на рисунке 3. Пунктирными линиями показаны первая и третья гармоники.

The bandwidth of such a circuit is -3 dB from DC to 100 kHz. The phase shift at 100 kHz is 45 degrees. GD in  $\mu\text{s}$  is equal to the product of RC, where the resistance is in  $\text{k}\Omega$ , and the capacitance is in nanofarads. The group delay is approximately constant up to 1/10 of the cutoff frequency, i.e., up to a frequency of 10 kHz. In fact, we see that the phase began to spin much earlier, practically from a frequency of 1 kHz. According to such a science as psychoacoustics, hearing is less sensitive to amplitude distortions and is most sensitive precisely to phase distortions. As an example, let's take a signal with a frequency of 20 kHz with a third harmonic equal to 60 kHz mixed with it. According to the Bode diagram, the third harmonic will be shifted by 30 degrees. What this will lead to is clearly seen in Figure 3. The dotted lines show the first and third harmonics.

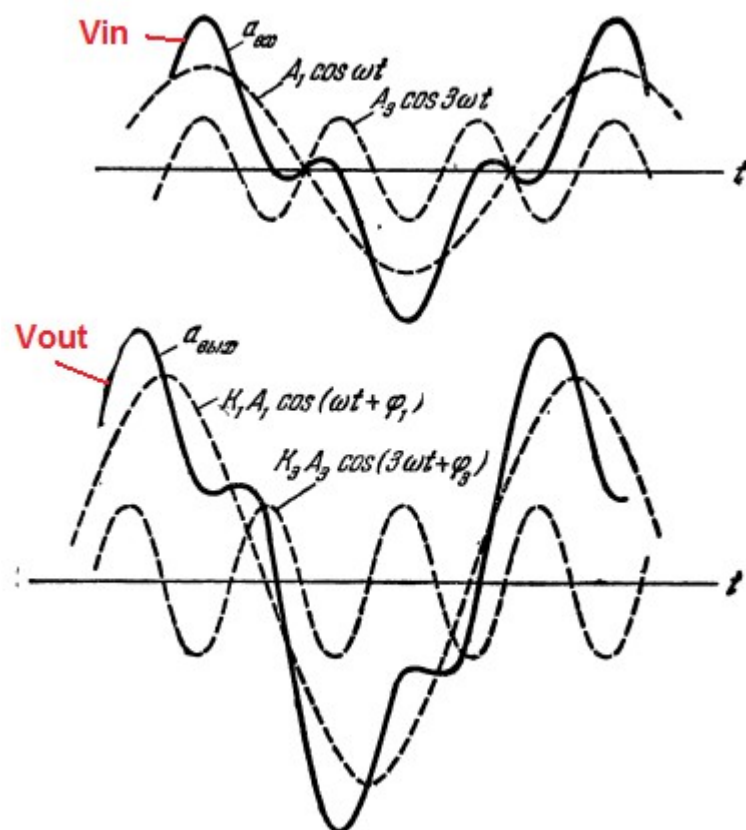


Fig. 3

Как видим из рисунка форма исходного сигнала (непрерывная линия) существенно изменилась, хотя спектр сигнала

остался прежним. Аналогичные изменения формы исходного сигнала происходят и с более низкочастотными сигналами, происходит нарушение формы огибающей спектра сигналов которое ведет к изменению тембральной окраски звука.

As you can see from the figure, the shape of the original signal (continuous line) has changed significantly, although the signal spectrum remains the same. Similar changes in the shape of the original signal occur with lower-frequency signals, the shape of the envelope of the signal spectrum is disturbed, which leads to a change in the timbre color of the sound.

В начале развития звукоусилительной техники усилители строились преимущественно на лампах без ООС. Спектр выходного напряжения таких усилителей был короткий (аналогичный спектру акустических систем), хотя и с высоким содержанием низших гармоник. В этом случае результаты измерения THD хорошо коррелировали с качеством звука. В то время начала интенсивно развиваться схемотехника усилителей на транзисторах с применением Global NFB. По мере увеличения глубины NFB уровень THD снижался, а адекватного повышения качества звука, как это ни парадоксально, не происходило.

At the beginning of the development of sound amplification technology, amplifiers were built mainly on tubes without NFB. The output voltage spectrum of such amplifiers was short (similar to the spectrum of acoustic systems), although with a high content of lower harmonics. In this case, the THD measurement results correlated well with the sound quality. At that time, the circuitry of transistor amplifiers using the Global NFB began to develop rapidly. As the NFB depth increased, the THD level decreased, and an adequate increase in sound quality, paradoxically, did not occur.

Когда поняли что между THD и качеством звука нет никакой корреляции стали искать другие методы тестирования. Так родился тест на интермодуляционные искажения. Как показала практика и этот тест слабо коррелирует с качеством звука. Тогда сделали сигнал многотональным который ближе к музыкальному сигналу. Пример тестов трех усилителей показан на следующих рисунках (4-6) [1].

When they realized that there was no correlation between THD and sound quality, they began to look for other testing methods. This is how the intermodulation distortion test was born. As practice has shown, this test also weakly correlates with sound quality. Then they made the signal multi-tone which is closer to the music signal. An example of tests for three amplifiers is shown in the following figures (4-6) [1].

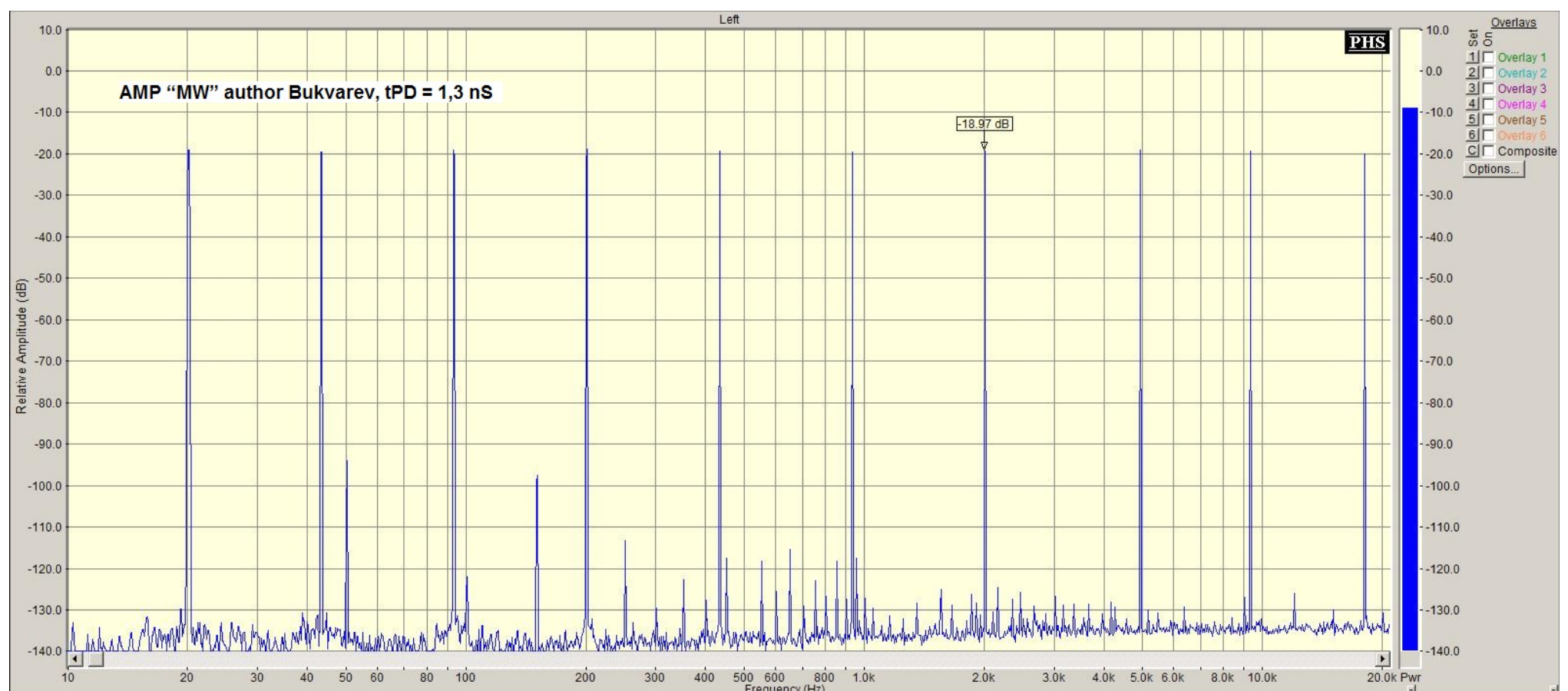


Fig. 4



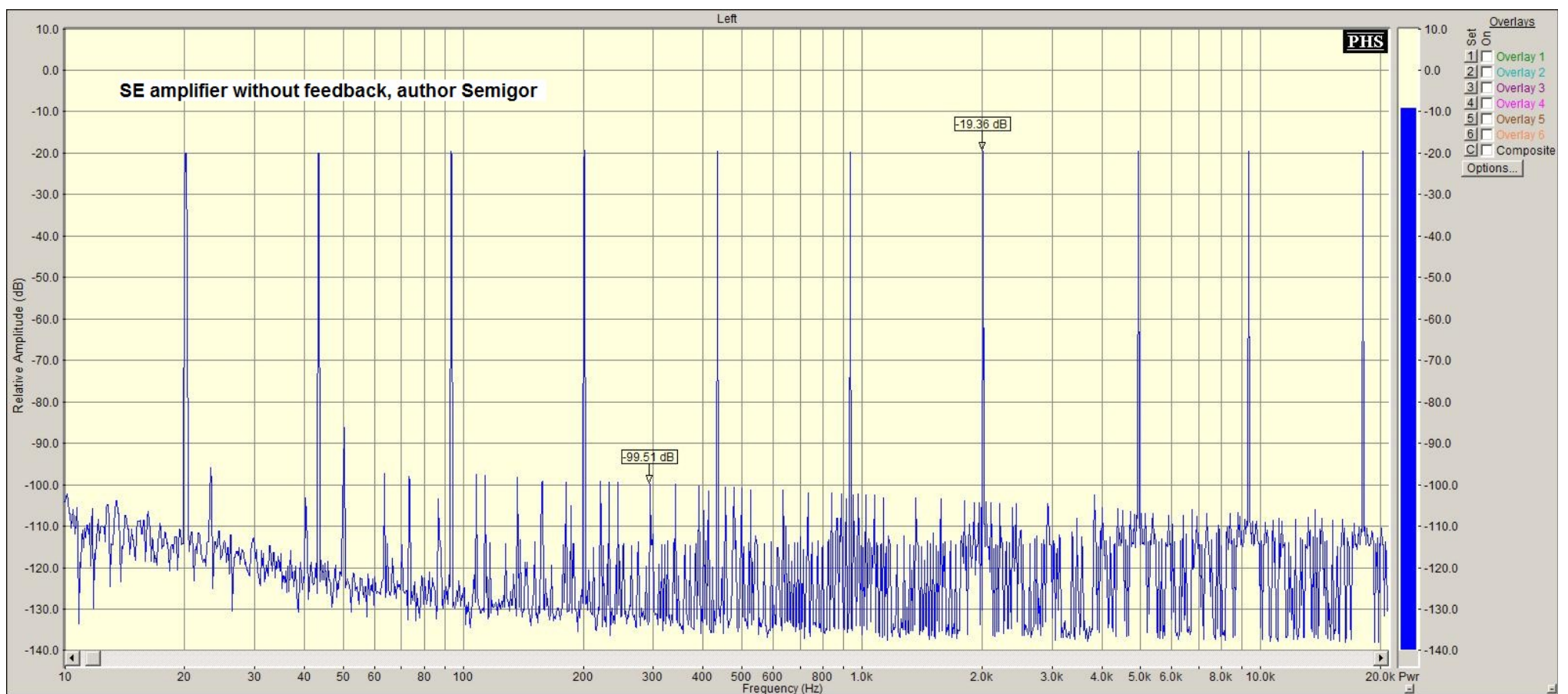


Fig. 5 Результат теста одноканального транзисторного усилителя без NFB  
Fig. 5 Test result of single-ended transistor amplifier without NFB

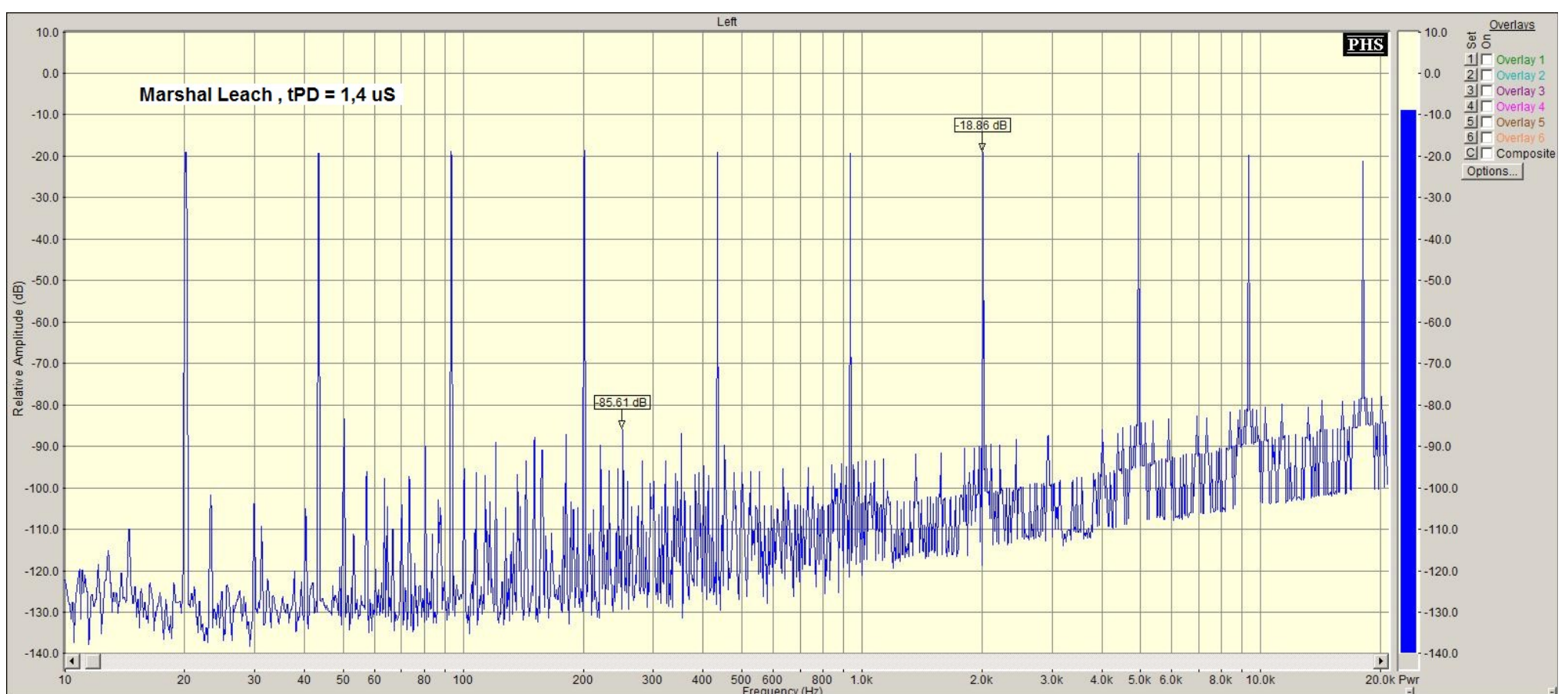


Fig. 6

Первый усилитель имеет очень малое время задержки прохождения сигнала. Всего 1,3 нс. Качество звука этого усилителя оценило большое количество как радиолюбителей, просто меломанов, так и профессионалов и все они дали высокую оценку качеству звука. Из искажений мы видим только 50 Гц и его третью гармонику 150 Гц. Думаю что они могли бы быть устранены более качественным изготовлением блока питания.

Динамический диапазон второго усилителя (транзистрный одноканальный) около 80 дБ ( $100 - 20 = 80$ ). Причем спектр гармоник спадающий.

The first amplifier has a very fast signal propagation delay. Only 1.3 ns. The sound quality of this amplifier was appreciated by a large number of both radio amateurs, music lovers and professionals, and all of them praised the sound quality. Of the distortions, we only see 50 Hz and its third harmonic at 150 Hz. I think that they could be eliminated by a better manufacturing of the power supply.

The dynamic range of the second amplifier (transistor single-cycle) is about 80 dB ( $100 - 20 = 80$ ). Moreover, the spectrum of harmonics is decreasing.

У третьего усилителя динамический диапазон всего 60 дБ, причем спектр высших гармоник носит нарастающий характер. А как известно именно к высшим гармоникам слух наиболее чувствителен, именно они наиболее неприятны. Как писал в одном из интервью Филипп Ньюэлл при одинаковом уровне интермодуляционных искажений слух человека в 40 раз более чувствителен к высшим гармоникам выше пятой. А если учесть что разница в уровнях высших гармоник второго и третьего усилителя равна 30 дБ (30 раз), то даже без умножения еще на 40 понятно что звук третьего усилителя будет заметно хуже. Именно это и подтвердил тест прослушивания. При этом качество звука первого и второго усилителя оказалось неотличимым.

The third amplifier has a dynamic range of only 60 dB, and the spectrum of higher harmonics is growing. And as you know, it is to the highest harmonics that the ear is most sensitive, they are the most unpleasant. As Philip Newell wrote in an interview with the same level of intermodulation distortion, human hearing is 40 times more sensitive to higher harmonics above the fifth. And if we take

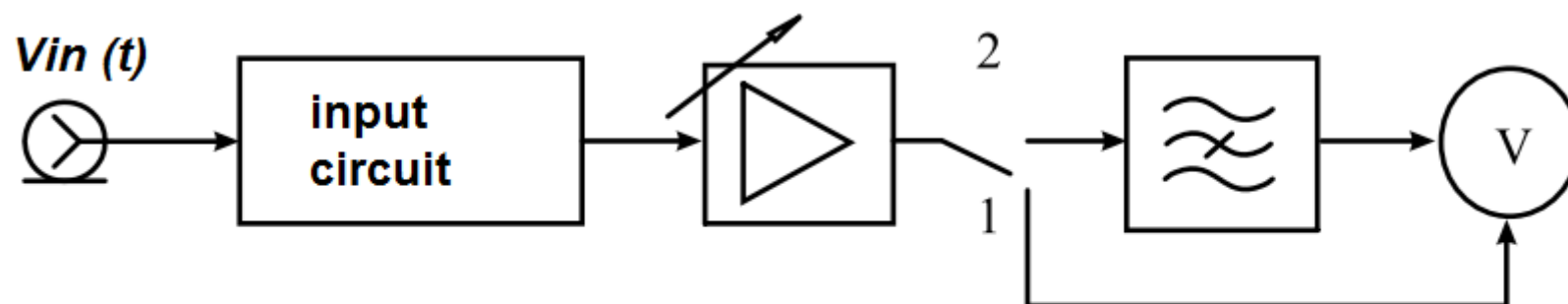
into account that the difference in the levels of the higher harmonics of the second and third amplifiers is 30 dB (30 times), then even without multiplying by another 40, it is clear that the sound of the third amplifier will be noticeably worse. This is exactly what the listening test confirmed. At the same time, the sound quality of the first and second amplifiers was indistinguishable.

Следующая попытка в поисках корреляции с качеством звука предпринята в работе [2], которая позднее привела к рождению нового стандарта и тестов типа DIM 30 and DIM 100. Однако эти тесты недоступны подавляющему большинству радиолюбителей занимающихся конструированием аудиоусилителей.

The next attempt to find a correlation with sound quality was made in [2], which later led to the birth of a new standard and tests such as DIM 30 and DIM 100. However, these tests are not available to the vast majority of radio amateurs involved in the design of audio amplifiers.

Но давайте попробуем все же разобраться в чем же причина отсутствия корреляции между THD и качеством звука. На рисунке 7 показана структурная схема наиболее распространенного аналогового измерителя нелинейных искажений.

But let's try to figure out what is the reason for the lack of correlation between THD and sound quality. Figure 7 shows a block diagram of the most common analog harmonic distortion meter.



**block diagram of a nonlinear distortion meter**

**1 - calibration, 2 - measurement**

Fig. 7

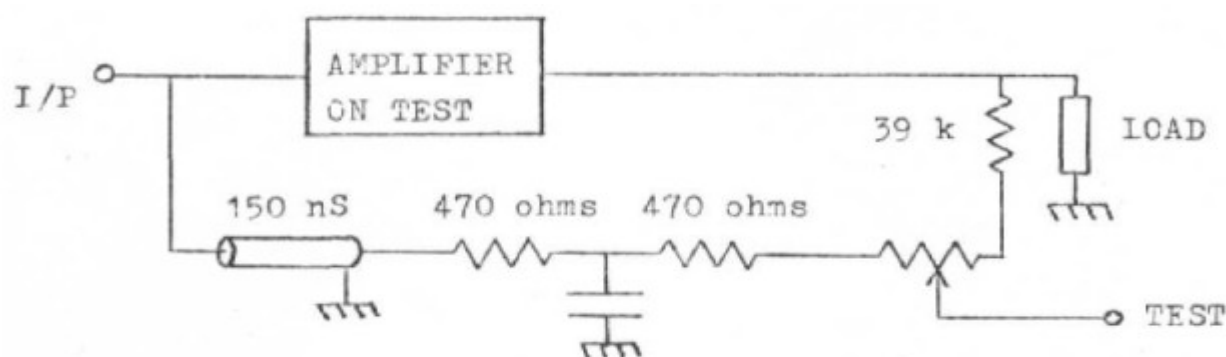
Основной принцип работы измерителя заключается в вырезании основной гармоники режекторным фильтром. Все что остается на выходе фильтра и есть искажения.

The basic principle of the meter is to cut out the fundamental harmonic with a notch filter. All that remains at the output of the filter is distortion.

Во-первых очень сложно сделать перестраиваемый фильтр с высоким подавлением основной гармоники. Во-вторых узлы измерителя сами вносят искажения. В-третьих, как любой фильтр время установления сигнала на выходе измерителя может быть значительным, много больше периода измеряемых сигналов. Поэтому измерение искажений возможно только в установившемся режиме. В этом случае искажения возникающие в переходных процессах самого усилителя оказываются вне поля зрения. А ведь именно они и оказывают наибольшее влияние на качество звука.

First, it is very difficult to make a tunable filter with high fundamental suppression. Secondly, the units of the meter themselves introduce distortions. Third, like any filter, the settling time of the signal at the output of the meter can be significant, much longer than the period of the measured signals. Therefore, distortion measurement is only possible in a steady state. In this case, the distortions arising in the transient processes of the amplifier itself are out of sight. But they have the greatest impact on sound quality.

Единственный способ выделить реально вносимые усилителем искажения — это воспользоваться векторным методом и вычесть выходное напряжение усилителя из идеального входного. Чтобы получить идеальный выходной сигнал необходимо умножить входной сигнал на  $K_u$  и сдвинуть его на время задержки прохождения сигнала в усилителе, т. е. на время  $t_{PD}$  (time Propagation Delay). Можно сделать и по другому, просто сдвинуть входной сигнал на время  $t_{PD}$ , а выходной сигнал ослабить до уровня входного. Этот метод был предложен в [3] и другими авторами еще до Баксандалла, рис. 8



**Fig.2.3. Test circuit for an inverting amplifier**

Ref.29.

P.J.Baxandall, "Audible amplifier distortion is not a mystery."

Wireless World, November 1977, pp 63 - 66.

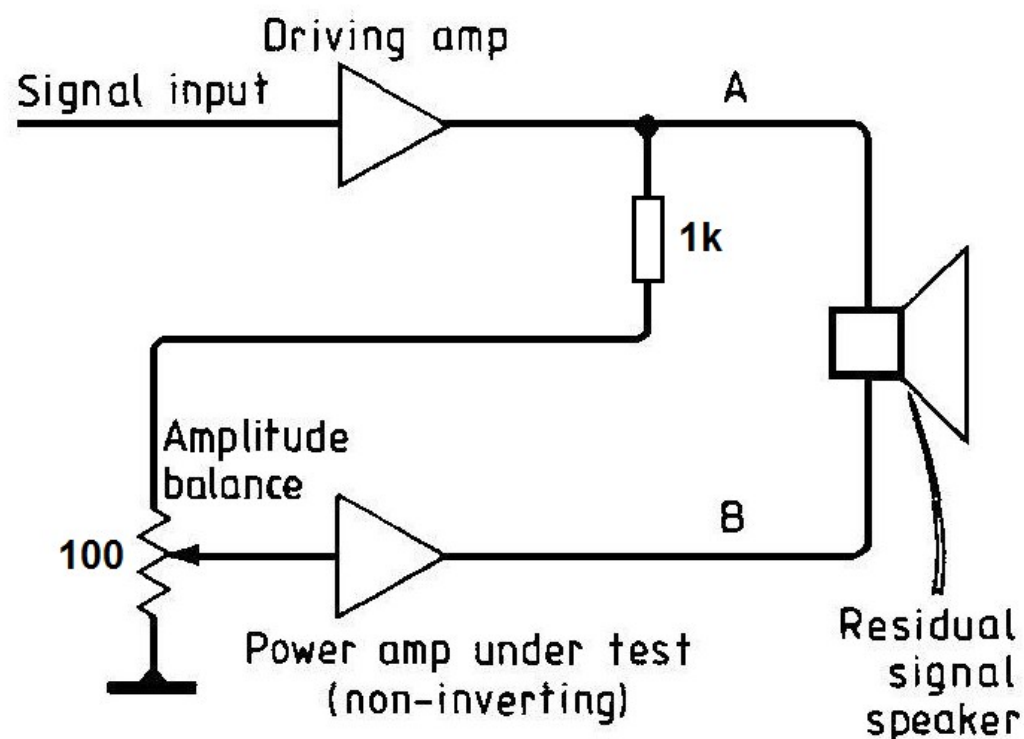
Fig. 8



The only way to isolate the real amplifier distortion is to use the vector method and subtract the amplifier's output voltage from the ideal input voltage. To get the ideal output signal, it is necessary to multiply the input signal by  $K_u$  and shift it by the time delay of the signal passage in the amplifier, that is, by the time  $t_{PD}$  (time Propagation Delay). You can do it differently, just shift the input signal by the time  $t_{PD}$ , and attenuate the output signal to the input level. This method was proposed in [3] and other authors even before Baksandall, Fig. 8

Как видно из рисунка 8 время задержки для входного сигнала формируется фиксированной линией задержки на 150 нс, недостающее время задержки подбирается с помощью RC-цепи. Если же вычитание производить без сдвига входного сигнала во времени то мы получим векторные погрешности, что и показал в своей работе Иржи Достал. Простейший способ оценки векторных погрешностей на слух предложил Хафлер, рис. 9

As can be seen from Figure 8, the delay time for the input signal is formed by a fixed delay line of 150 ns, the missing delay time is selected using an RC circuit. If the subtraction is performed without shifting the input signal in time, then we will get vector errors, as shown in his work by Jiri Dostal. The simplest way to assess vector errors by ear was suggested by Hafler, Fig. 9



**Fig.4. Hafler 'straight-wire' differential test.**

Fig. 9

Если в качестве тестового сигнала использовать прямоугольный сигнал, то на нагрузке будут иголки вверх и вниз от осевой линии. Чем меньше время  $t_{PD}$  тестируемого усилителя, тем короче по длительности будут и иголки на нагрузке. Многие, кто воспользовался этим тестом, и смогли уменьшить время  $t_{PD}$  насколько это возможно убедились в улучшении качества звука.

If you use a square wave as the test signal, the load will have pins up and down from the centerline. The shorter the  $t_{PD}$  time of the amplifier under test, the shorter the needles on the load will be. Many who have used this test and have been able to reduce the  $t_{PD}$  time as much as possible have found an improvement in sound quality.

Измерение векторных погрешностей для двух типов усилителей (инвертирующих и неинвертирующих) предложил в своей книге и Достал [4], рис. 10

Measurement of vector errors for two types of amplifiers (inverting and non-inverting) was proposed in his book and Dostal [4], Fig. 10

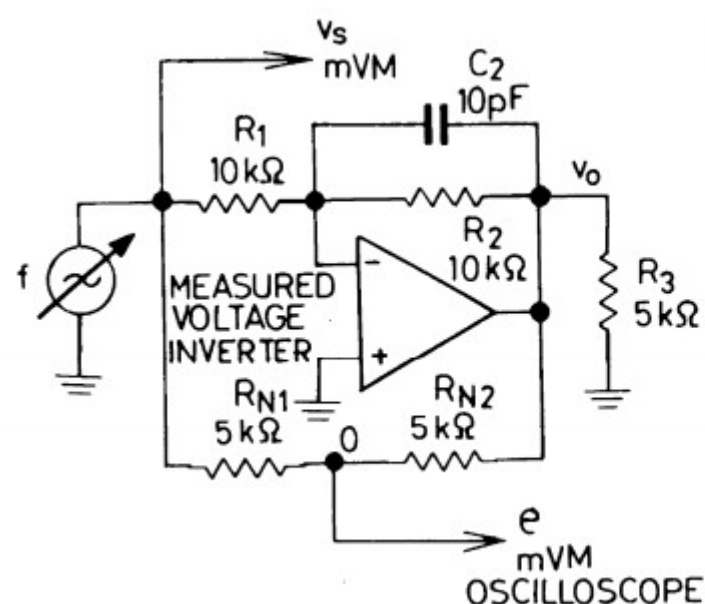


Fig. 10

## 6.4 Measurement of Errors

$$\frac{R_{N2}}{R_{N1}} = |G_I|$$

$$\epsilon_V = \left(1 + \frac{R_{N1}}{R_{N2}}\right) \frac{|e|}{|v_s|} = 2 \frac{|e|}{|v_s|}$$

**Figure 6-25.**  
Measurement of  
the voltage-  
inverter vector  
error.

И хотя векторная погрешность не является искажением сигнала в прямом смысле этого слова, но его величина косвенно говорит о величине скоростных искажений которые проявляются при любом отклонении сигнала от синусоиды и о которых упоминает в своей книге Достал. Правда Достал не совсем четко сформулировал само понятие этого вида искажений.

And although the vector error is not a signal distortion in the literal sense of the word, its value indirectly speaks of the magnitude of the speed distortions that appear at any deviation of the signal from the sinusoid and which he mentions in his book I got it. True, I didn't quite clearly codify the very concept of this type of distortion.

Поэтому я осмелился интерпретировать их по своему. Если говорить о векторном формировании напряжения, то достаточно увеличить или уменьшить амплитуду вектора образующего синусоиду, увеличить или уменьшить скорость вращения этого вектора как тут же возникают скоростные искажения. Величина этих искажений зависит от времени задержки прохождения сигнала (от tPD), что по непонятным мне причинам вызывает смех местных гурзу.

Therefore, I dared to interpret them in my own way. If we talk about the vector formation of voltage, then it is enough to increase or decrease the amplitude of the vector forming the sinusoid, increase or decrease the rotation speed of this vector, and speed distortions immediately appear. The magnitude of these distortions depends on the signal propagation delay time (from tPD), which for some unknown reason makes the local gurus laugh.

Проявление подобного рода искажений я уже показывал неоднократно в разных ветках, в том числе и ветке по FCD. Кому это интересно могут пройти и посмотреть. Честно говоря мне уже изрядно надоело доказывать то, что лежит на поверхности и не требует доказательств.

I have already shown the manifestation of this kind of distortions several times in different branches, including the FCD branch. Anyone who is interested can go through and see. Frankly speaking, I am already pretty tired of proving what lies on the surface and does not require proof.

Пару рекомендаций тем кто захочет поэкспериментировать с этим методом.

Следует учитывать что ГВЗ в диапазоне звуковых частот может иметь небольшие отклонения, поэтому для большей точности измерения на многотональном сигнале или на звуковом сигнале следует использовать среднее значение. Если я использую в качестве тестового сигнала треугольный сигнал частотой 10 кГц, то я использую в качестве tPD задержку в усилителе на этой частоте. Для начала подаю синусоидальный сигнал и тщательно калибрую как коэффициент усиления, так и время задержки до полного совпадения «идеального» входного сигнала (см. выше) и выходного сигнала.

A couple of recommendations for those who want to experiment with this method.

It should be borne in mind that the group delay in the audio frequency range may have small deviations, therefore, for greater measurement accuracy on a multi-tone signal or on an audio signal, an average value should be used. If I use a 10 kHz triangle signal as a test signal, then I use a delay in the amplifier at that frequency as a tPD. To begin with, I apply a sinusoidal signal and carefully calibrate both the gain and the delay time until the "ideal" input signal (see above) and the output signal match.

Если усилитель постоянного тока, то его ГВЗ как правило линейно от долей Герца, до нескольких сотен кГц и выше. Усилители с разделительным конденсатором на входе я временно перевожу в усилители постоянного тока и тщательно их балансирую. И только после этого тестирую в симуляторе.

If the amplifier is a direct current, then its GDT is usually linear from fractions of Hertz, up to several hundred kHz and above. Amplifiers with a blocking capacitor at the input I temporarily convert to DC amplifiers and carefully balance them. And only after that I test it in the simulator.

Даже усилители постоянного тока с системой сервоконтроля имеют отклонение ГВЗ в области НЧ от горизонтальной линии. В этом случае я использую время ГВЗ на горизонтальном участке в диапазоне частот 5... 20 кГц.

Even DC amplifiers with a servo control system have a delay in the low frequency range from the horizontal line. In this case, I use the delay time on the horizontal section in the frequency range 5 ... 20 kHz.

При использовании в качестве тестового сигнала треугольника векторная погрешность представляет собой прямоугольный сигнал. При малейшей неточности  $K_u$  полки прямоугольного сигнала будут иметь наклон в ту либо другую сторону. При измерении скоростных искажений при неточном измерении tPD будут остатки прямоугольного сигнала. При точном подборе как tPD так и  $K_u$  в результате вычитания получаем все виды искажений: нелинейные, кроссоверные и скоростные. Линейные искажения при этом полностью компенсируются задержкой и на результат теста не оказывают влияния.

When using a triangle as a test signal, the vector error is a square wave. At the slightest inaccuracy  $K_u$ , the shelves of the rectangular signal will have an inclination to one side or the other. When measuring velocity distortion with an inaccurate measurement of tPD, there will be residuals of a square wave. With an accurate selection of both tPD and  $K_u$ , as a result of subtraction, we obtain all types of distortions: nonlinear, crossover and high-speed. Linear distortion is completely compensated for by the delay and does not affect the test result.

При тестировании реальных усилителей методом Хафлера также удобно использовать треугольный сигнал частотой 3...10 кГц. В этом случае настройка заключается в получении прямоугольного сигнала на нагрузке. Амплитуда прямоугольного сигнала и будет косвенно говорить о величине скоростных искажений.

When testing real amplifiers using the Haffler method, it is also convenient to use a triangular signal with a frequency of 3 ... 10 kHz. In this case, the adjustment consists in obtaining a square-wave signal at the load. The amplitude of the square wave signal will indirectly speak about the magnitude of the speed distortion.

Литература:

1. <http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=72049&p=2451108&viewfull=1#post2451108>
2. Eero Leinonen, Matti Otala, and John Curl, A Method for Measuring Transient Intermodulation Distortion (TIM)\*
3. by Peter J. Baxandall, Audible amplifier distortion is not a mystery, Wireless World, November 1977
4. Jiri Dostal, Operational Amplifiers, 1993

Best regards  
Petr