

## 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 это определение (этот термин или 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, there are few places where attention is drawn to the fact that this definition (this term or the concept of "linearity") refers only to the steady state after the end of transients, when there are no additional components in the signal.

**В соответствии с теорией во время переходных процессов сигнал можно описать в квазигармоническом виде следующей формулой:**

**In accordance with the theory, during transient processes, the signal can be described in quasi-harmonic form by the following formula:**

$$s(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)]$$

**Мгновенная частота для данного сигнала в данный момент времени имеет одно единственное значение. В то же время в данный момент времени существует несчетное число спектральных составляющих с различными частотами, т. е. гармонических составляющих. Но почему то большинство читателей в упор не хотят этого видеть и понимать.**

**The instantaneous frequency for a given signal at a given time has one single meaning. At the same time, at a given moment in time, there is an uncountable number of spectral components with different frequencies, i.e., harmonic components. But for some reason the majority of readers point-blank do not want to see and understand this.**

**Музыкальный сигнал это скорее импульсный сигнал и для него применимо определение сплошного переходного процесса.**

**The music signal is rather an impulse signal and the definition of a continuous transient process applies to it.**

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, SID.

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, SID type.

Тесты на стационарных синусоидальных сигналах в установившемся режиме не дают полезной информации об усилителе, так как не говорят о его динамических характеристиках, о способности точно передавать импульсные звуковые сигналы.

Tests on stationary sinusoidal signals in a steady state do not give useful information about the amplifier, since they do not speak about its dynamic characteristics, about the ability to accurately transmit impulse sound signals.

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 зависят от их особенностей (сложности) и продолжительности (времени выхода на установившийся режим).

During transient processes (not to be confused with crossover distortions that occur near the transition of the signal through zero), a wide range of harmonics appears, the duration and amplitude of which depend on their characteristics (complexity) and duration (time to reach the steady state).

В формировании любого звука (музыкального инструмента или голоса) можно выделить три фазы: атаку звука (процесс нарастания звука), стационарную часть и процесс спада звука. Соотношения между фазами у разных инструментов разные. Как оказалось именно атака и процесс спада звука определяют тембр звука, отличия одной ноты у разных инструментов. Выяснилось, что человек слабо (в меньшей степени) реагирует на установившиеся процессы (стационарную часть сигнала), а обращает большее внимание на нестационарные, на динамические параметры звука, которые и отвечают за тембр звука.

In the formation of any sound (musical instrument or voice), you can distinguish three phases: the attack of sound (the process of increasing sound), the stationary part and sound decay process. The relationships between the phases are different for different instruments. As it turned out, it is the attack and decay of the sound that determine the timbre of the sound, the differences between one note in different instruments. It turned out that a person weakly (to a lesser extent) responds to steady-state processes (stationary

part of the signal), and pays more attention to non-stationary, to the dynamic parameters of sound, which are responsible for the timbre of the sound.

### Теория гласит:

Отклик линейной цепи при произвольном воздействии будет иметь такой же вид, как и сигнал на входе, если цепь обладает линейной АЧХ и ФЧХ в бесконечной полосе частот. Если же это условие не выполняется, то происходит так называемое линейное преобразование спектра, сопровождающееся искажением выходного сигнала что мы и наблюдаем на выходе усилителя в начале первого периода синусоидального сигнала (а также на вершинах треугольного сигнала и на фронтах прямоугольника).

### The theory says:

The response of a linear circuit under an arbitrary action will have the same form as the signal at the input, if the circuit has a linear frequency response and phase response in an infinite frequency band. If this condition is not met, then it happens like this called linear transformation of the spectrum, accompanied by a distortion of the output signal, which we observe on the output of the amplifier at the beginning of the first period of the sinusoidal signal (as well as at the tops of the triangular signal and at the edges of the rectangle).

Правда в этом утверждении упущено влияние GDelay, а именно: если GDelay не равно нулю, то возникают скоростные искажения на которые указал Иржи Достал [4]. А так как в реальности это реализовать невозможно, то для исключения заметности этих искажений время задержки прохождения сигнала не должно превышать 100 нс (лучше если оно будет меньше с запасом в 2...3 раза).

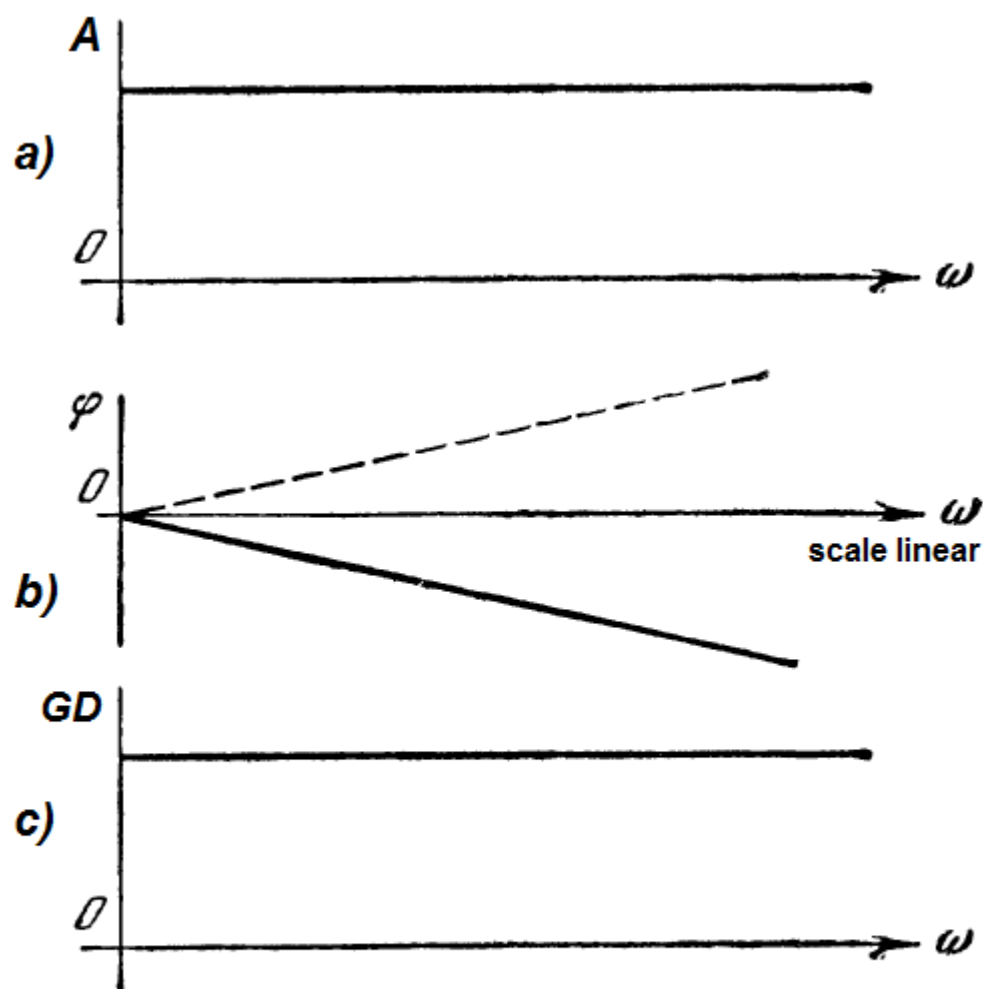
The truth is, this statement misses the influence of GDelay, namely: if GDelay is not equal to zero, then speed distortions appear, which were pointed out by Jiri Dostal [4]. And since in reality this is impossible to implement, in order to exclude the visibility of these distortions, the signal transmission delay time should not exceed 100 ns (it is better if it is less than 2 ... 3 times with a margin).

GDelay по определению - это производная фазы по частоте, геометрически - тангенс угла наклона к касательной в выбранной точке на графике ФЧХ.

Таким образом для неискаженной передачи любого сигнала графики АЧХ, ФЧХ и ГВЗ должны выглядеть следующим образом

By definition, GDelay is the derivative of the phase with respect to frequency, geometrically - the tangent of the angle of inclination to the tangent at a selected point on the phase response graph.

Thus, for undistorted transmission of any signal, the graphs of the frequency response, phase response and group delay should look as follows



### Ideal amplifier frequency response

a) amplitude-frequency; b) phase-frequency  
c) Group Delay (time Propagation Delay)

Нелинейность Gdelay (следствие нелинейности АЧХ и ФЧХ) ведет к так называемой амплитудно-фазовой конверсии сигнала, к нарушению огибающих формант, что в свою очередь ведет к искажению тембра. От величины самой задержки прохождения сигнала зависит передача микродинамики звукового сигнала, отвечающей за передачу нюансов тонкой звуковой материи. Чем меньше задержка, тем меньше скоростные искажения отвечающие за искажения первого периода (FCD - First Cycle Distortion [1]). Название FCD принадлежит Грэму Мейнард (Graham Maynard). Для получения малых скоростных искажений время задержки не должно превышать 100 нс.

The nonlinearity of Gdelay (a consequence of the nonlinearity of the frequency response and phase frequency response) leads to the so-called amplitude-phase conversion of the signal, to the violation of the formant envelopes, which in turn leads to the distortion of the timbre. The transmission of the microdynamics of the sound signal, which is responsible for the transmission of the nuances of

subtle sound matter, depends on the magnitude of the signal transmission delay itself. The shorter the delay, the less speed distortion responsible for the distortion of the first period (FCD - First Cycle Distortion [1]). The FCD name belongs to Graham Maynard. To obtain low speed distortions, the delay time should not exceed 100 ns.

Что касается фазовой глухоты человека, то это не соответствует действительности. Ранние исследования проводились на монофонических сигналах. Более поздние исследования опровергли этот факт.

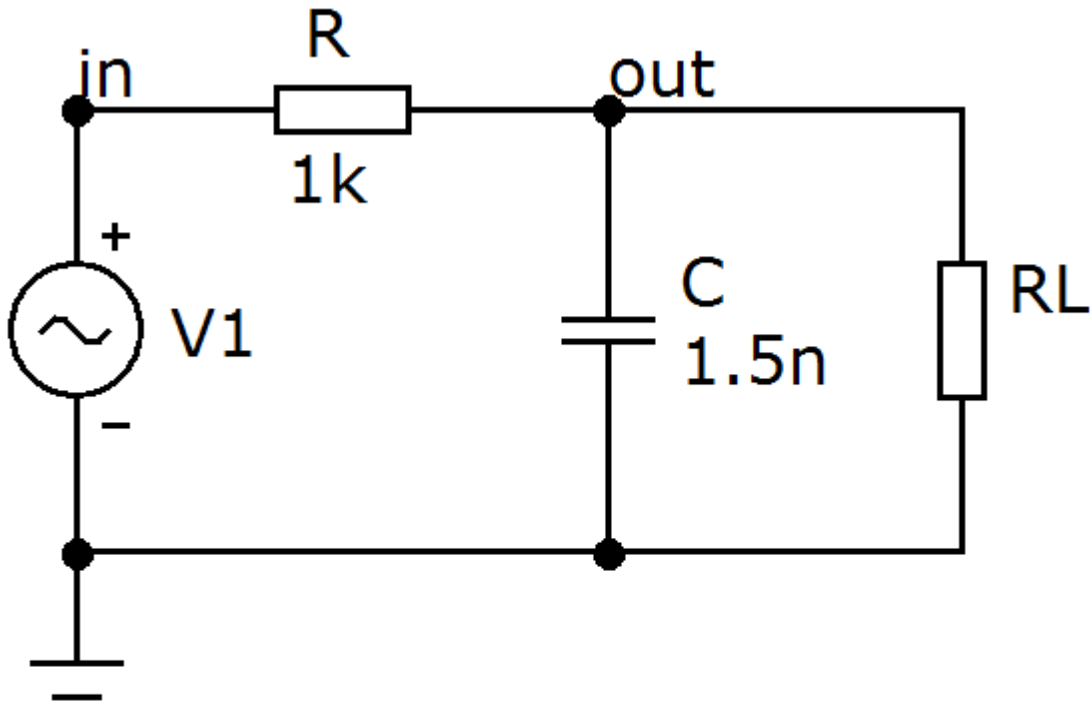
As for the phase deafness of a person, this is not true. Early research was done on monophonic signals. Later studies have refuted this fact.

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

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



$RL \gg R$   $GDelay = RC, \mu s$   
 $R - k\Omega$ ;  
 $C - nF$

Fig. 1

Снимем диаграмму Боде такой цепи вместе с ГВЗ, рис. 2

Let's remove the Bode diagram of such a circuit together with the Group Delay, fig. 2

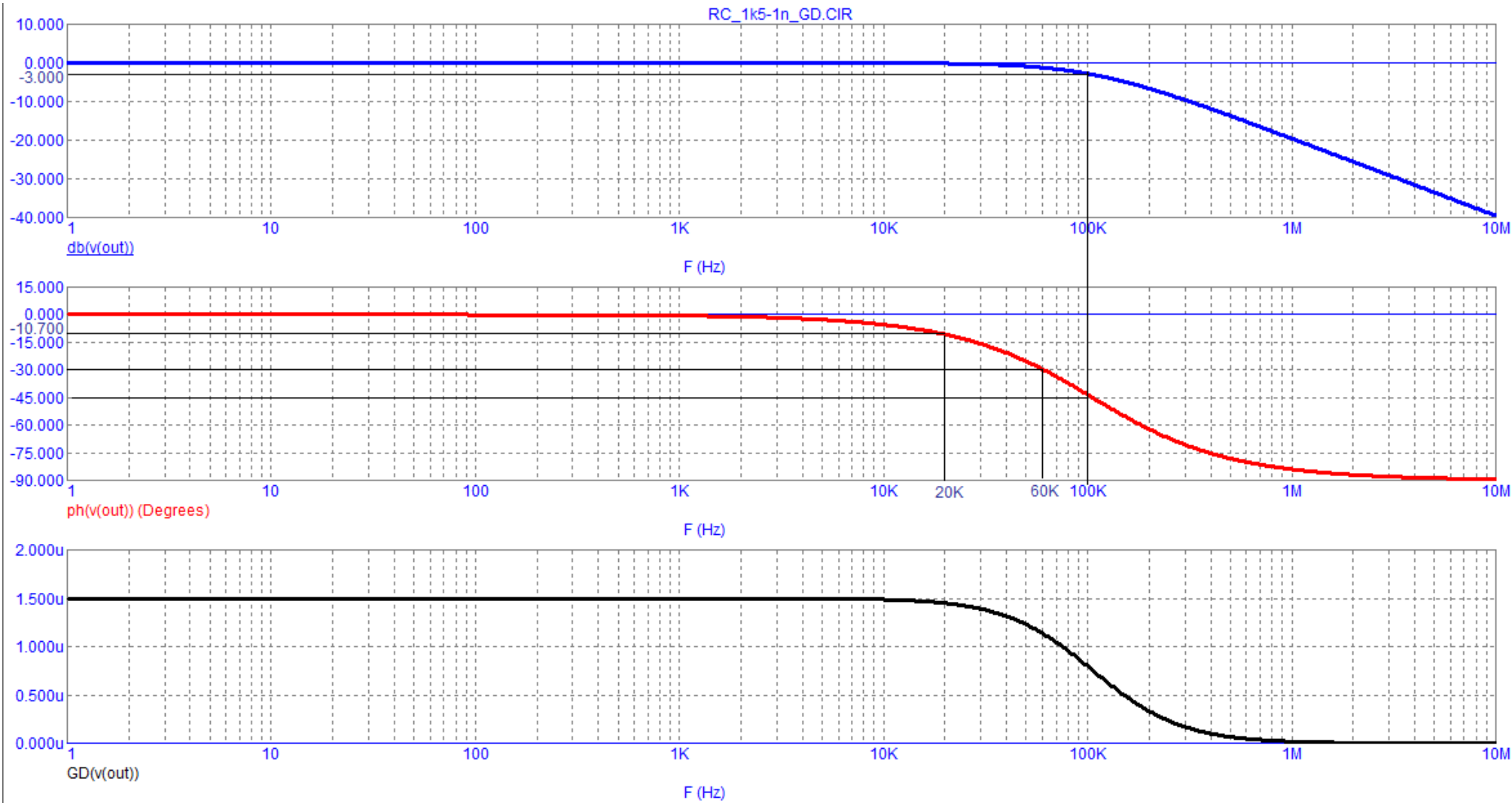


Fig. 2

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 Бодэ 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  $\mu s$  is equal to the product of RC, where the resistance is in 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.

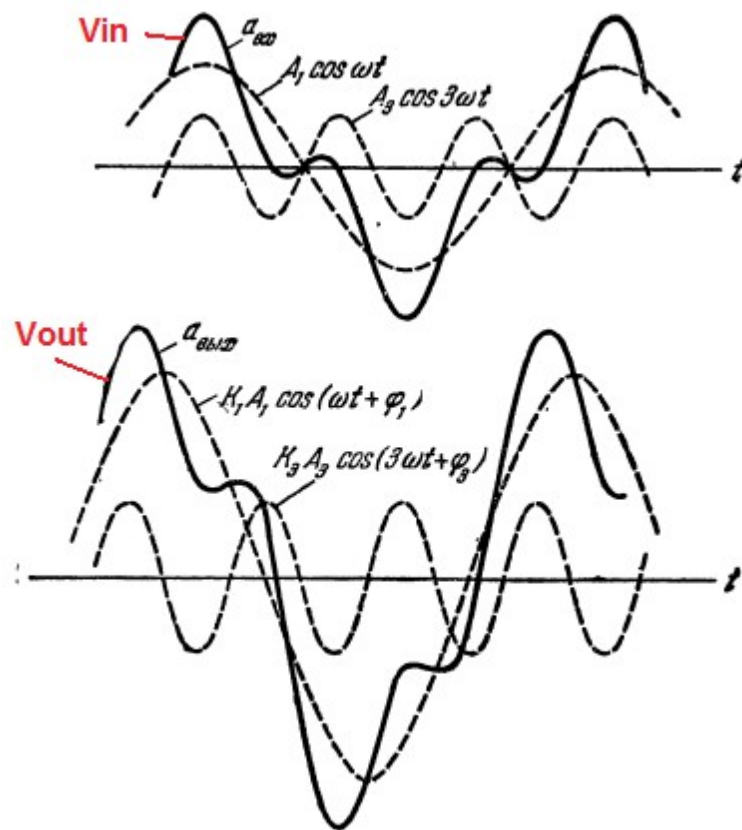


Fig. 3

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) [2].

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) [2].



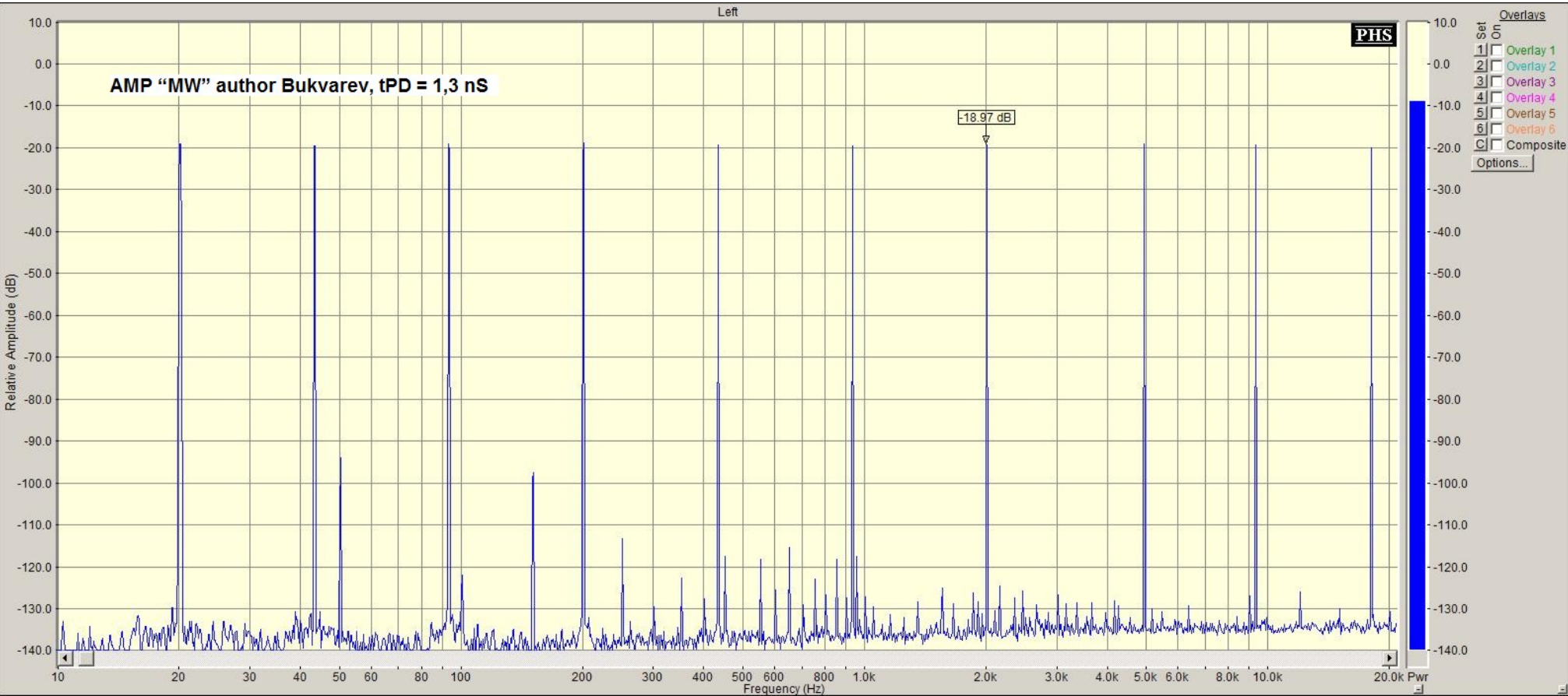


Fig. 4

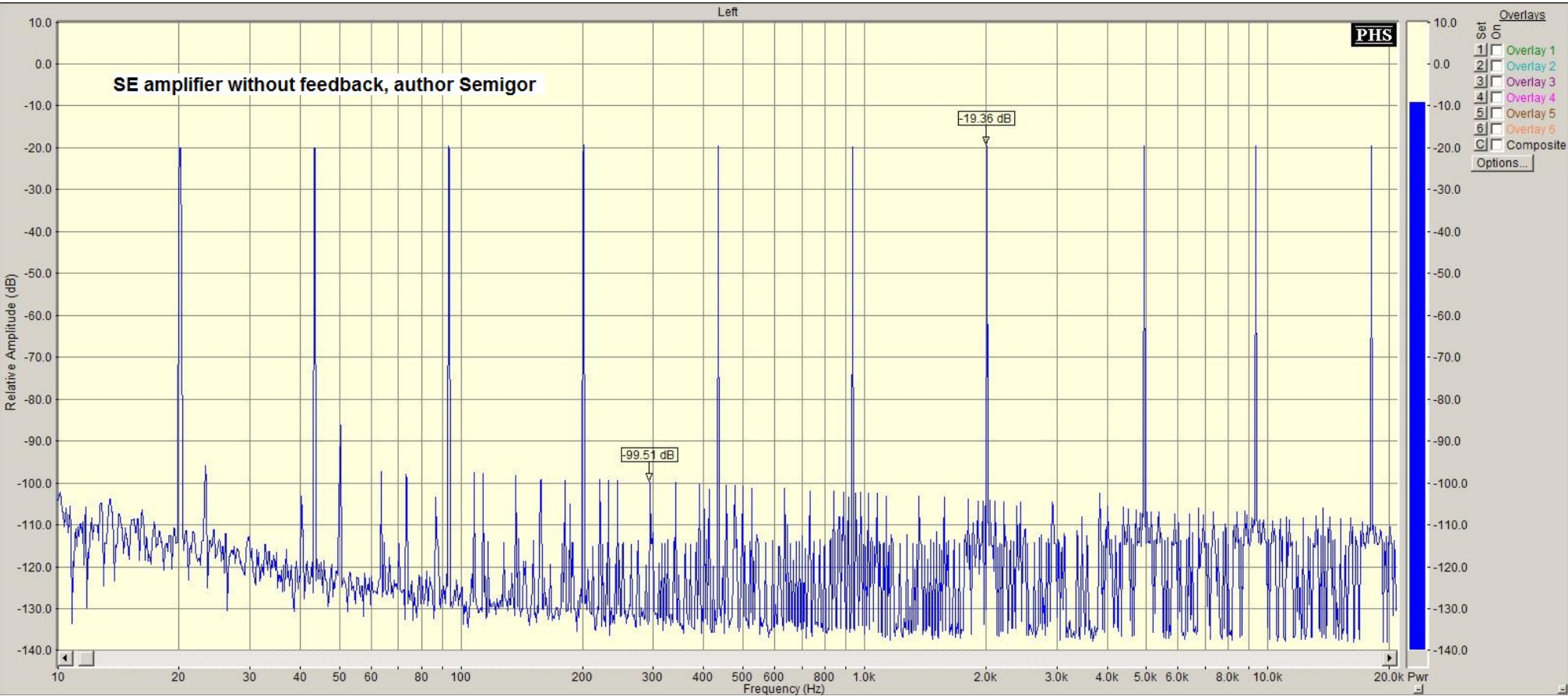


Fig. 5 Test result of single-ended transistor amplifier without NFB

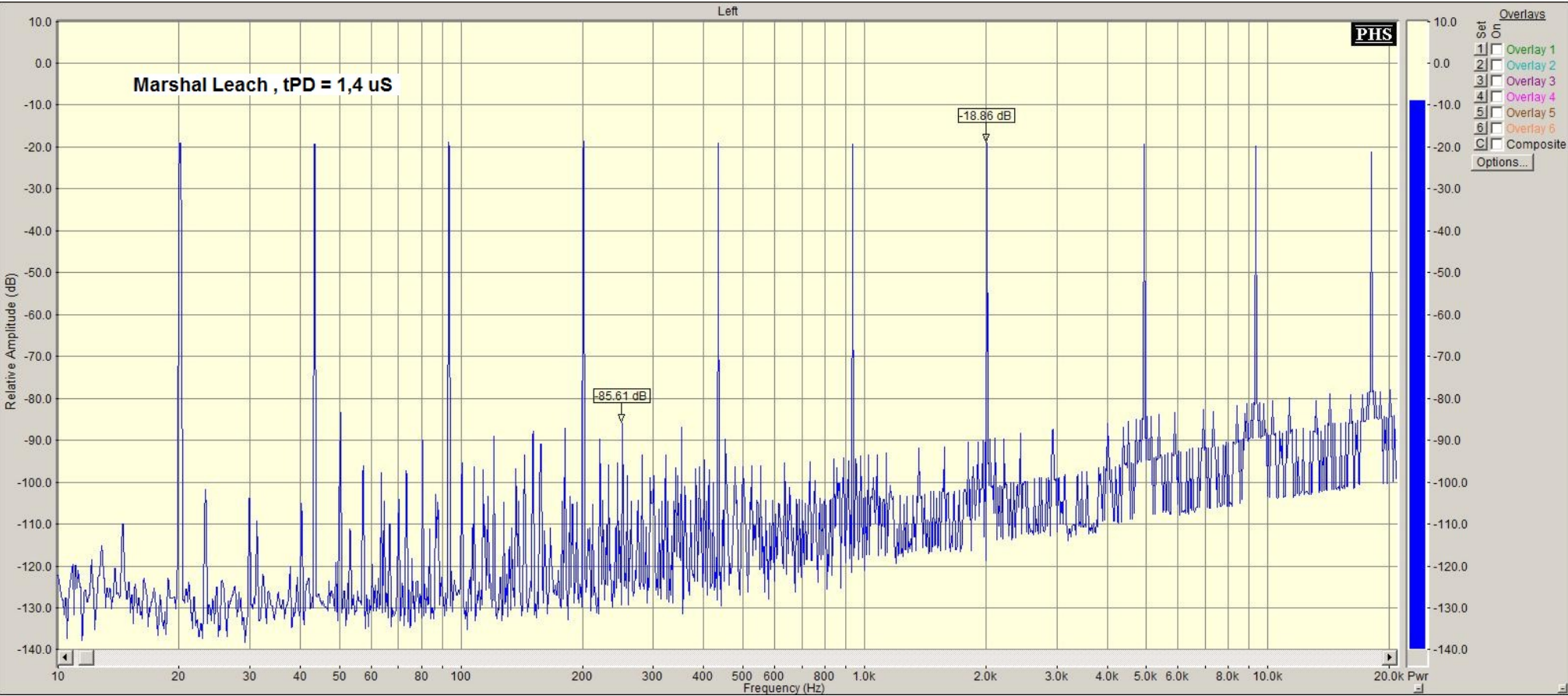


Fig. 6

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 (транзисторный однотакт) 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 Филип 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.

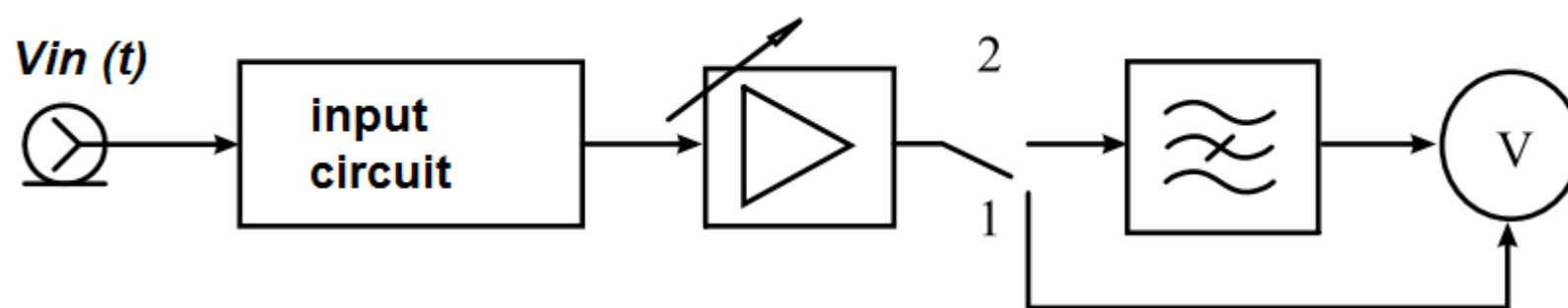
The third amplifier has a dynamic range of only 60 dB, and the spectrum of higher harmonics is growing. And as you know, it is to the highest harmonics that the ear is most sensitive, they are the most unpleasant. As Philip Newell wrote in an interview with the same level of intermodulation distortion, 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 [3], 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 [3], 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 у любого фильтра время установления сигнала на выходе измерителя значительно 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. Thirdly, like any filter, the settling time of the signal at the output of the meter is 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 [4] и другими авторами еще до Баксандалла, рис. 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 [4] and other authors even before Baksandall, Fig. 8

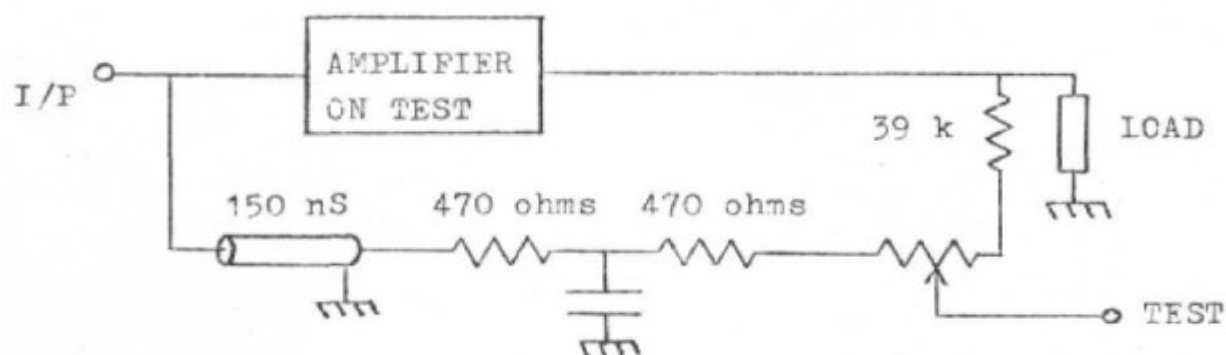


Fig.2.3. Test circuit for an inverting amplifier

Ref.29.

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

Wireless World, November 1977, pp 63 - 66.

Fig. 8

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 [5]. 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 [5]. The simplest way to assess vector errors by ear was suggested by Hafler, Fig. 9

Методом Баксандалла широко пользовался популярный российский радиолюбитель И.Акулиничев добиваясь в своих конструкциях минимальных векторных и скоростных искажений (т. е. минимального  $G_{Delay}$ ). К особенностям его конструкций можно отнести отсутствие радиочастотного фильтра НЧ на входе усилителя. Все кто повторил его конструкции отметили высокое качество звука и никто не отметил наличия каких либо помех из-за отсутствия фильтра.

The Baksandall method was widely used by the popular Russian radio amateur I. Akulinichev, who achieved minimal vector and speed distortions in his designs (i.e., minimal  $G_{Delay}$ ). **Its design features include the absence of a RF filter at the amplifier input.** Everyone who repeated his designs noted the high sound quality and no one noted the presence of any interference due to the lack of a filter.

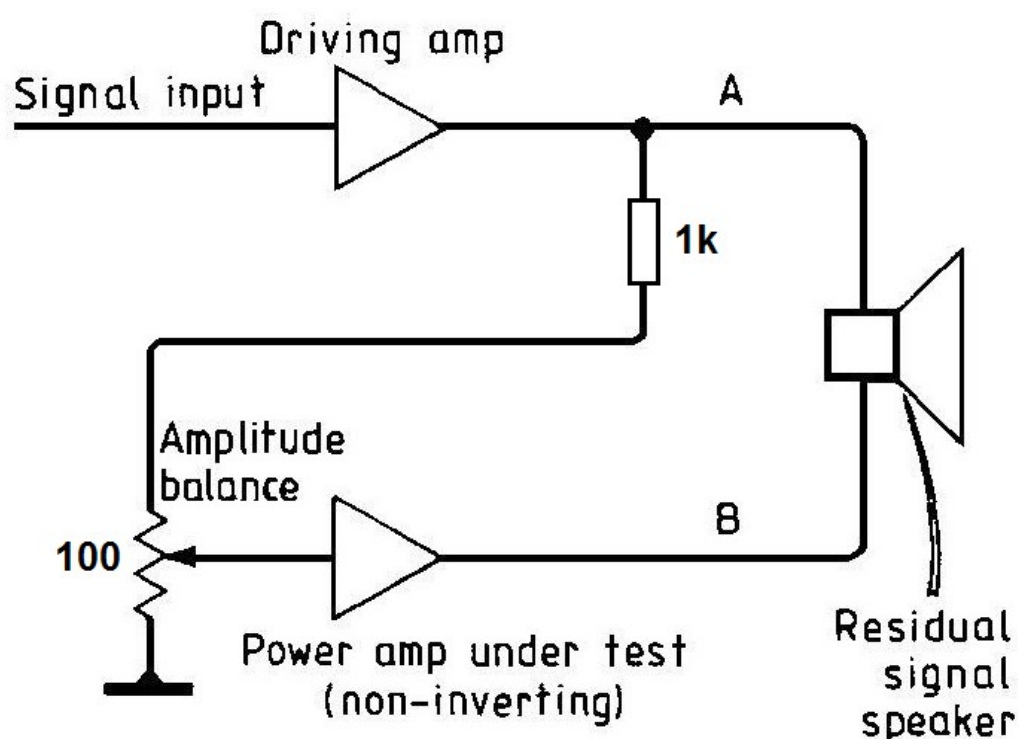


Fig.4. Hafler 'straight-wire' differential test.

Fig. 9

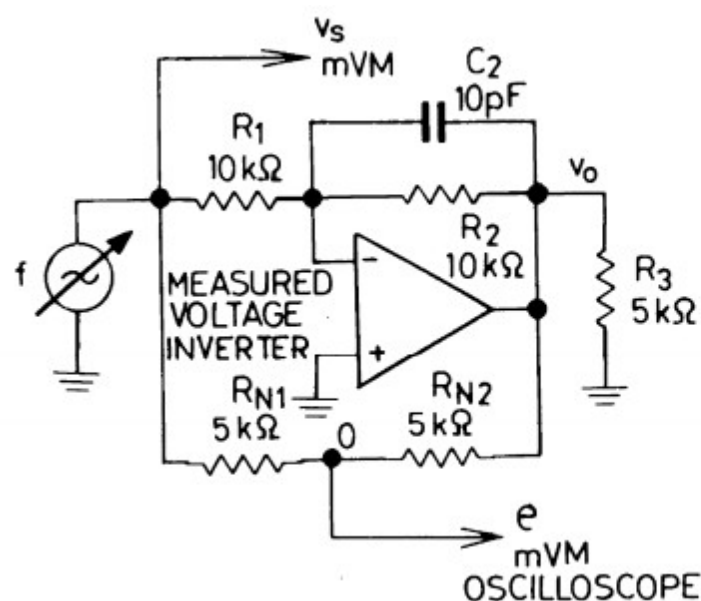
Если в качестве тестового сигнала использовать прямоугольный сигнал, то на нагрузке будут иголки вверх и вниз от осевой линии. Чем меньше время  $t_{PD}$  тестируемого усилителя, тем короче по длительности будут иголки на нагрузке. Реже пользуются треугольным сигналом, но именно он наиболее удобен для использования в этом тесте. Переменным резистором добиваются получения прямоугольного сигнала на нагрузке. Амплитуда этого сигнала (векторная погрешность) и говорит о

времени задержки прохождения сигнала в тестируемом усилителе. Многие, кто воспользовался этим тестом, и смогли уменьшить время tPD насколько это возможно убедились в улучшении качества звука.

If a square wave is used as a test signal, the load will have pins up and down from the centerline. The shorter the tPD time of the amplifier under test, the shorter the needles on the load will be. A triangular signal is used less often, but it is the most convenient for use in this test. A variable resistor is used to obtain a rectangular signal across the load. The amplitude of this signal (vector error) indicates the delay time of the signal propagation in the amplifier under test. Many who have used this test and have been able to reduce the tPD 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 [5], рис. 10

Measurement of vector errors for two types of amplifiers (inverting and non-inverting) was proposed in his book and Dostal [5], 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.

Fig. 10

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 (выделено желтым цветом) зависит от времени задержки прохождения сигнала (от tPD), рис. 10a).

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 (highlighted in yellow) depends on the signal propagation delay time (from tPD), Fig. 10a).

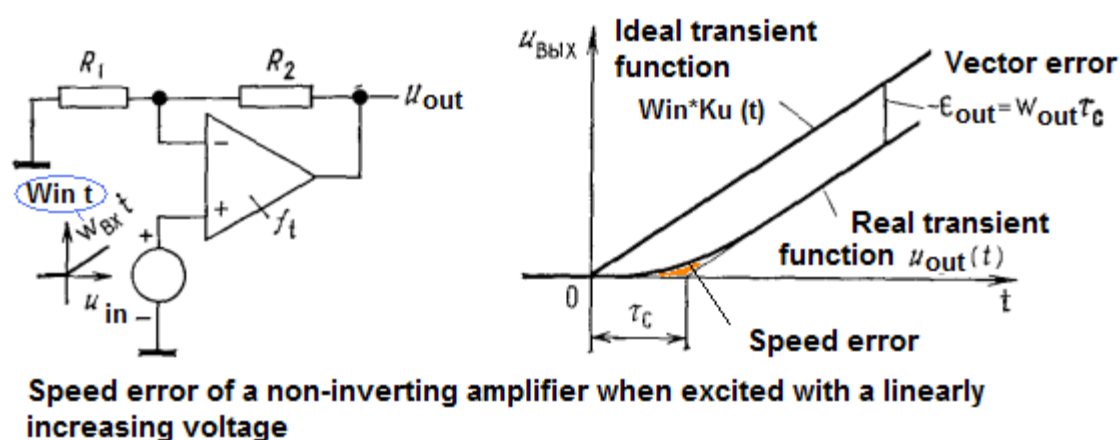


Fig. 10a)

Пару рекомендаций тем кто захочет поэкспериментировать с этим методом.

Следует учитывать что GDelay 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 GDelay 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 GDTime 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 GDelay 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 в прямом смысле слова (то что отвечает за «линейность») 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 distortions in the literal sense of the word (what is responsible for "linearity") are fully compensated for by the delay and do 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.

Следует отметить что метод Хафлера прекрасно работает на любом сигнале, в том числе и на реальном музыкальном. Настройка сводится к установке минимального напряжения на нагрузке.

It should be noted that Haffler's method works great on any signal, including a real musical one. The setting is reduced to setting the minimum voltage on the load.

#### Литература:

1. <https://www.diyaudio.com/forums/solid-state/32758-cycle-distortion-graham.htm>
2. <http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=72049&p=2451108&viewfull=1#post2451108>  
(<http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=72049&page=23>)
3. Eero Leinonen, Matti Ojala, and John Curl, A Method for Measuring Transient Intermodulation Distortion (TIM)\*
4. by Peter J. Baxandall, Audible amplifier distortion is not a mystery, Wireless World, November 1977
5. Jiri Dostal, Operational Amplifiers, 1993

Best regards  
Alexander Petrov (Petr)

### Пример использования треугольного сигнала на практике An example of using a triangle signal in practice

Проверим треугольным сигналом модель усилителя выполненного по [5], рис. 11  
Let's check the amplifier model made according to [5], fig. 11

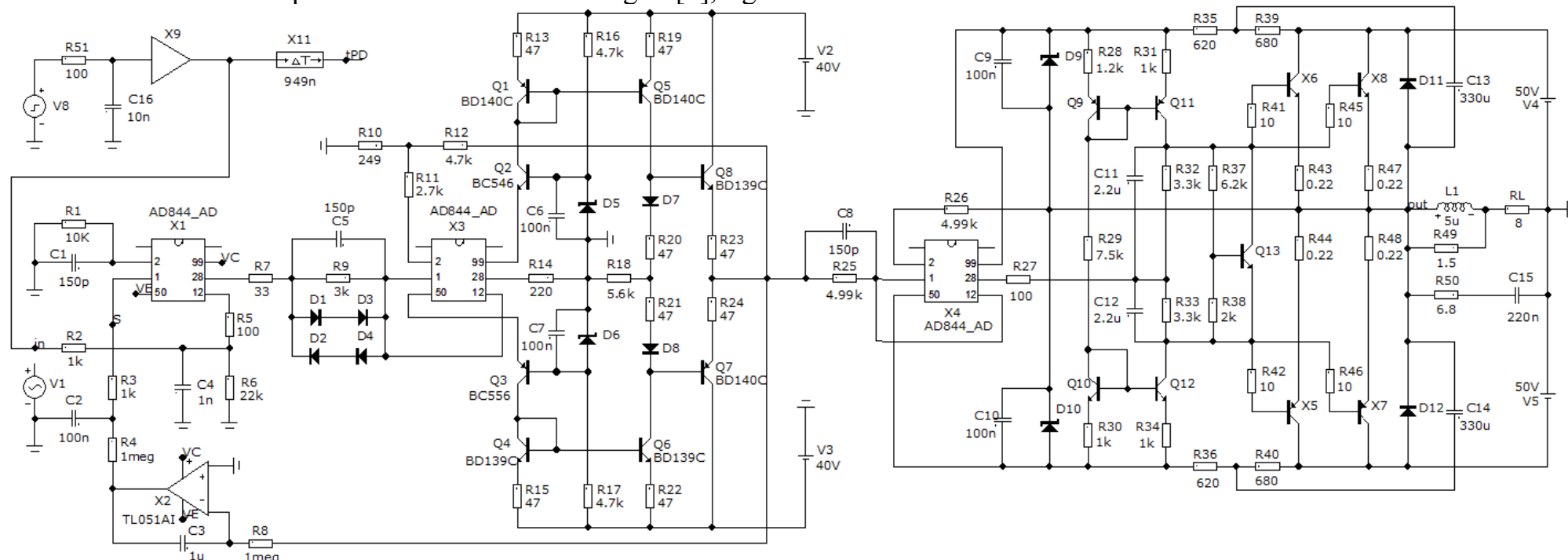


Fig. 11

Сигнал генератора подается на вход усилителя через НЧ-фильтр. Для начала в самом усилителе отключим НЧ-фильтр,

конденсатор  $C4=0$ . Скорость нарастания такого сигнала на выходе усилителя ничтожно мала:  $60V/50\mu S = 1,2 V/\mu s$ . Посмотрим как усиливается такой сигнал, рис. 12.

The generator signal is fed to the amplifier input through a low-pass filter. To begin with, in the amplifier itself, turn off the low-frequency filter, capacitor  $C4 = 0$ . The slew rate of such a signal at the amplifier output is negligible:  $60V / 50\mu S = 1.2 V / \mu s$ . Let's see how such a signal is amplified, Fig. 12.

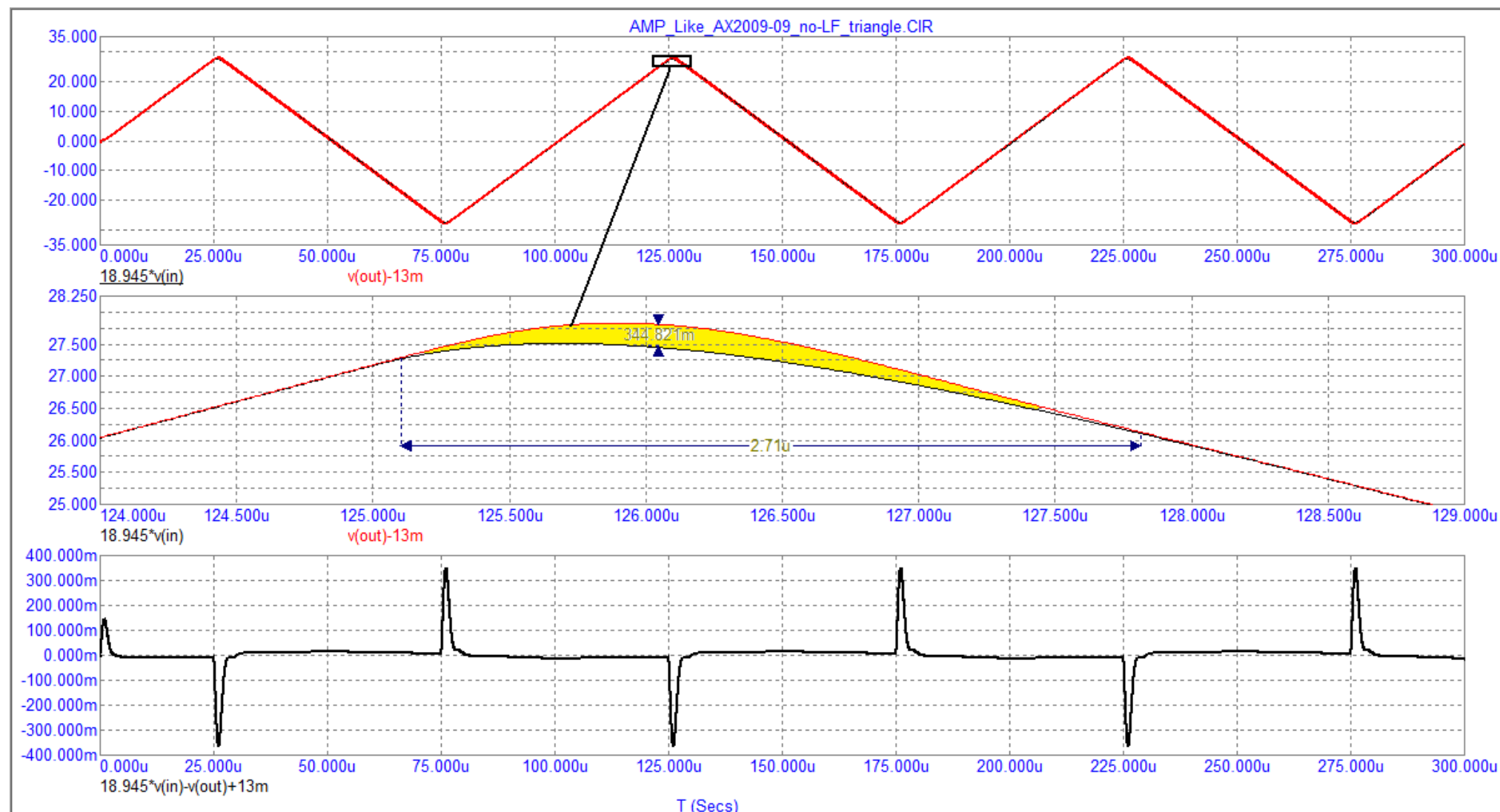


Fig. 12

Если растянуть сигналы вблизи перехода через ноль, то можно убедиться что выходной сигнал опережает входной на 13 нс.

If you stretch the signals near the zero crossing, you can make sure that the output signal is ahead of the input one by 13 ns.

На вершинах треугольника амплитуда сигнала увеличивается на 345 мВ из-за запаздывания реакции усилителя на изменение вектора образующего сигнал. Длительность приращения сигнала равна периоду сигнала частотой 350 кГц — частота на которой есть пиковый уровень АЧХ и пиковый уровень GD.

Следует обратить внимание на то, что вершины сигнала эквивалентны началу первого периода синусоидального сигнала. Таким образом искажения возникающие напротив вершин треугольника эквивалентны искажениям первого периода (FCD). С другой стороны это не что иное как скоростные искажения.

Включим входной фильтр усилителя ( $C4=1$  нФ) и снова проведем тест, рис. 13.

At the vertices of the triangle, the signal amplitude increases by 345 mV due to the delay in the response of the amplifier to a change in the vector of the generating signal. The duration of the signal increment is equal to the period of the signal with a frequency of 350 kHz - the frequency at which there is a peak frequency response level and a peak GD level.

It should be noted that the signal peaks are equivalent to the beginning of the first period of the sinusoidal signal. Thus, the distortions occurring opposite the vertices of the triangle are equivalent to the first cycle distortion (FCD). On the other hand, this is nothing more than speed distortion.

Turn on the input filter of the amplifier ( $C4 = 1$  нФ) and perform the test again, Fig. 13

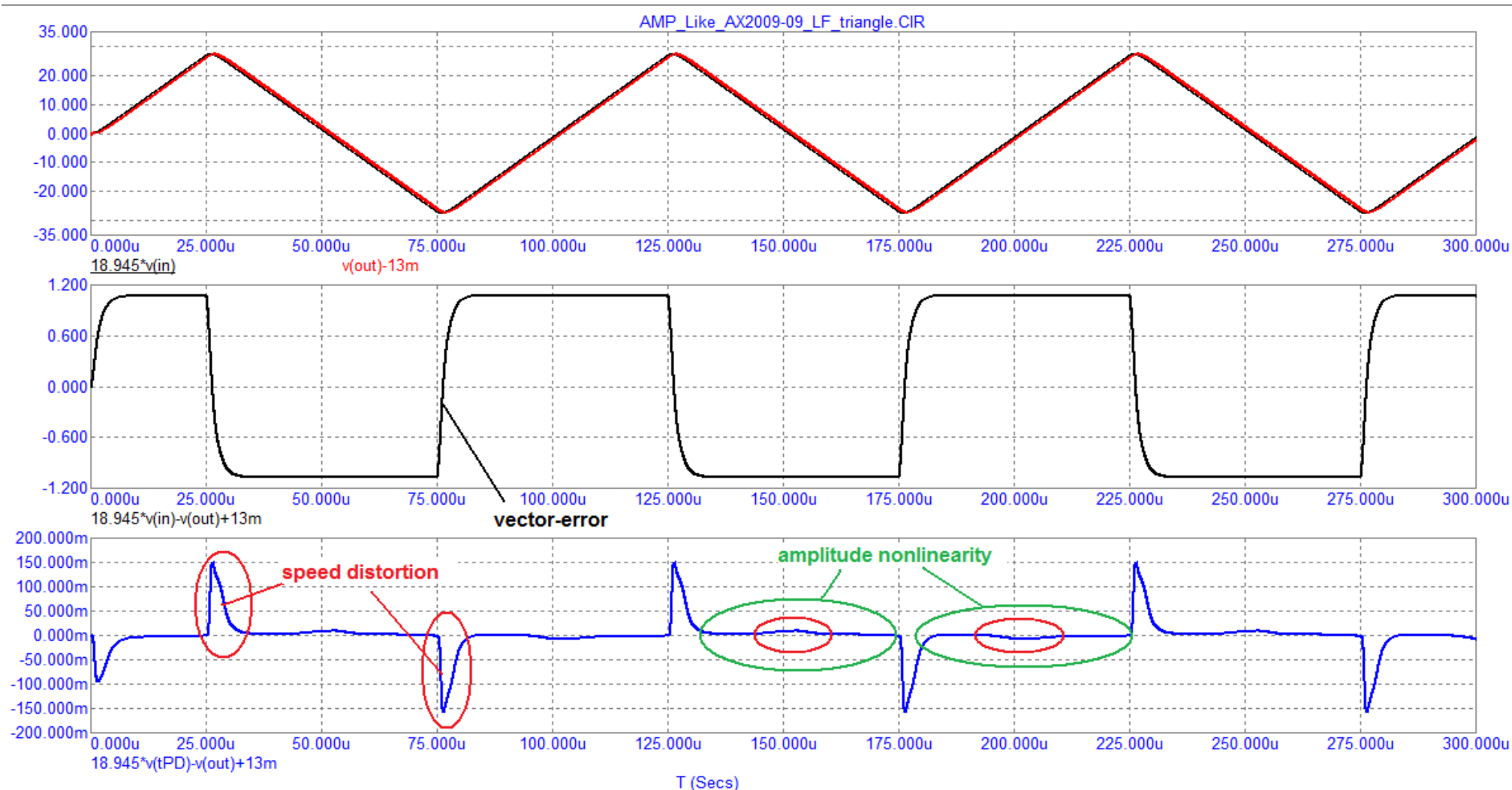


Fig. 13

Благодаря включению фильтра НЧ время задержки прохождения сигнала возрастает практически до 1 мкс (945 нс). Амплитуда векторной погрешности равна 1 В (2 В от пика до пика). Амплитуда скоростных искажений снизилась более чем в 2 раза и стала равна 150 мВ. Напротив перехода сигнала через ноль явно видны кроссоверные искажения. Растянем сигнал по вертикали и посмотрим уровень этих искажений, рис. 14

Thanks to the inclusion of the low-pass filter, the signal propagation delay time increases to almost 1  $\mu$ s (945 ns). The magnitude of the vector error is 1 V (2 V peak-to-peak). The amplitude of high-speed distortions decreased by more than 2 times and became equal to 150 mV. Crossover distortion is clearly visible opposite the zero crossing of the signal. Stretch the signal vertically and see the level of these distortions, Fig. 14

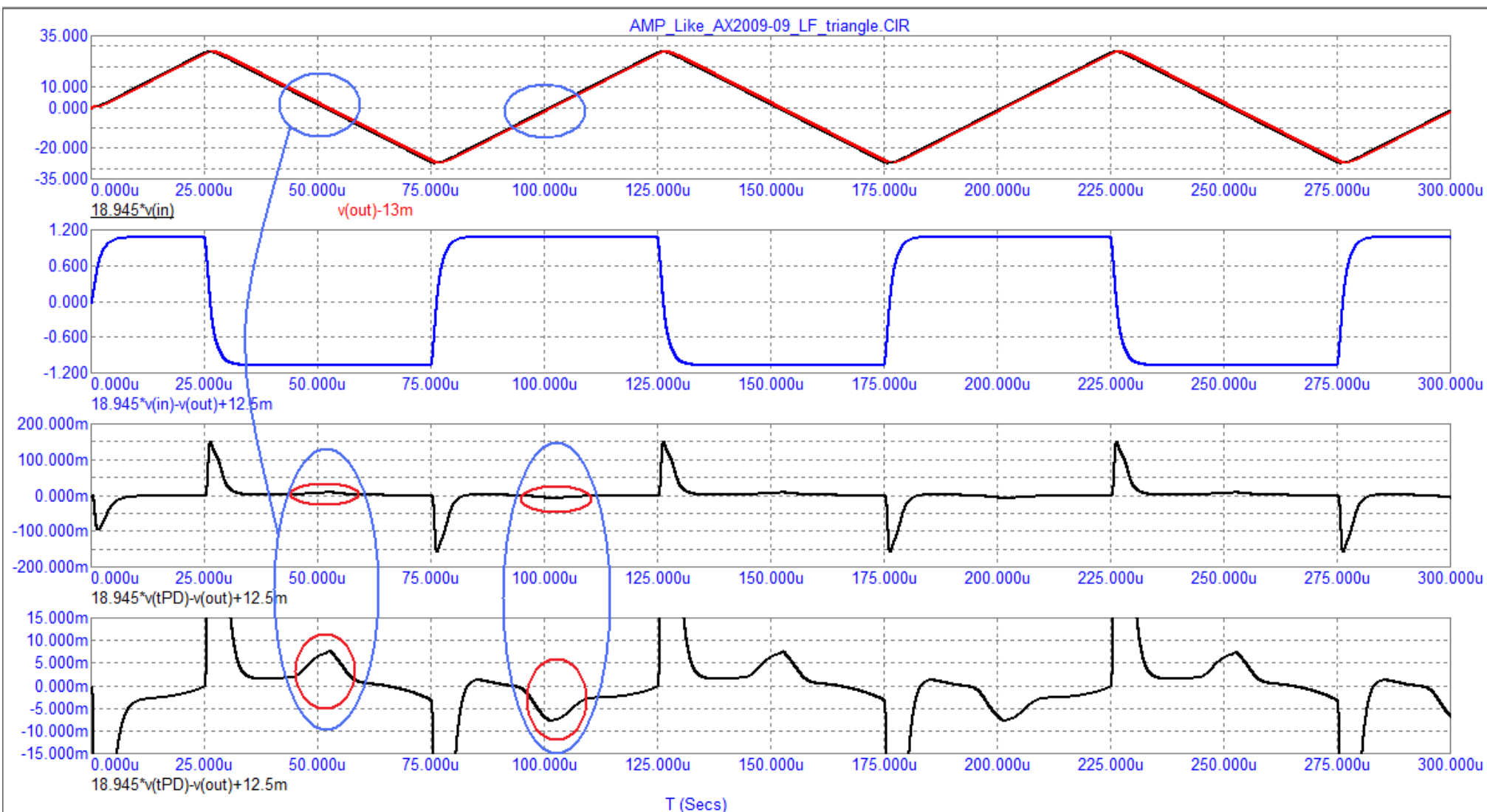


Fig. 14

Согласно тесту амплитуда кроссоверных искажений превышает 5 мВ. Дополнительно проведем тест этого усилителя с помощью специально разработанного для этой цели режекторного фильтра, рис. 15

The crossover distortion is greater than 5 mV in the test. Additionally, we will test this amplifier using a notch filter specially designed for this purpose, Fig. 15



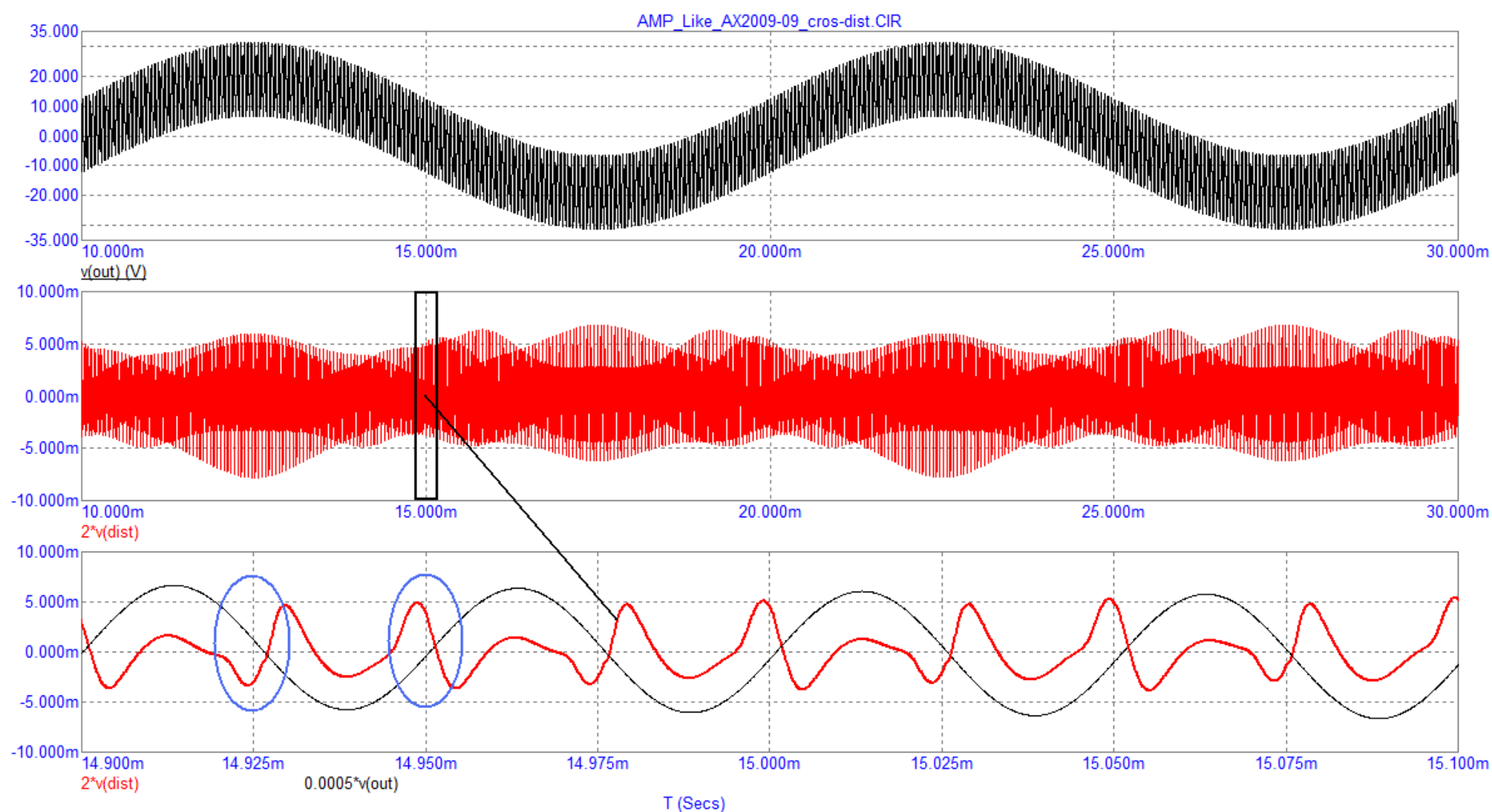


Fig. 15

При амплитуде сигнала чуть больше 10 В мы также наблюдаем искажения вблизи перехода выходного сигнала через ноль (контрольный сигнал черная линия).

Для сравнения проведем тест треугольным сигналом усилителя [6], рис. 16

With a signal amplitude of slightly more than 10 V, we also observe distortions near the transition of the output signal through zero (the control signal is black line).

For comparison, let us carry out a test with a triangular signal of the amplifier [6], Fig. 16

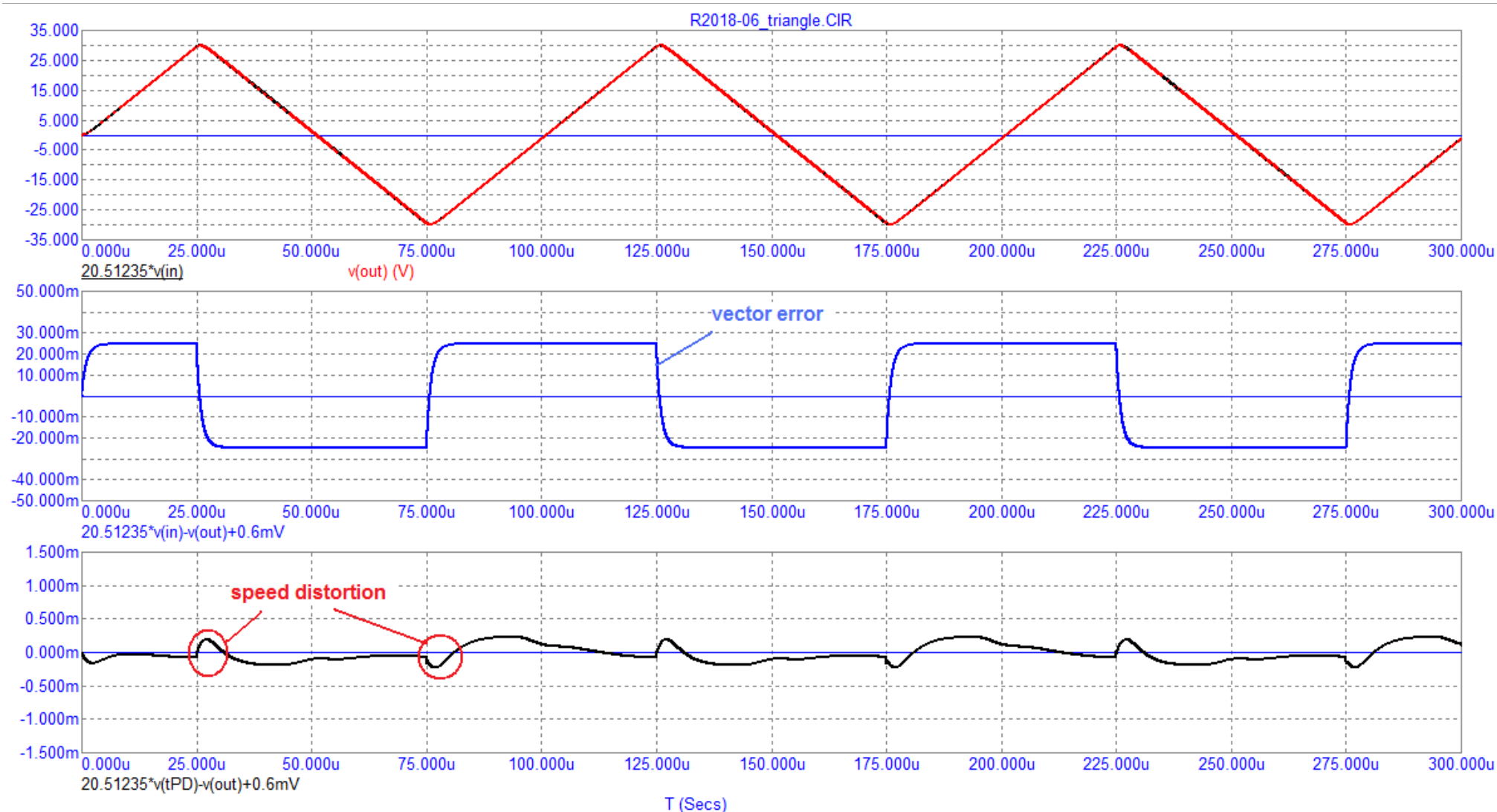


Fig. 16

По сравнению с предыдущим усилителем все виды искажений этого усилителя ничтожно малы  
Compared to the previous amplifier, all types of distortion of this amplifier are negligible

В дополнение проведем аналогичный тест на сигналах 19 и 20 кГц, рис. 17

In addition, we will conduct a similar test on 19 and 20 kHz signals, Fig. 17

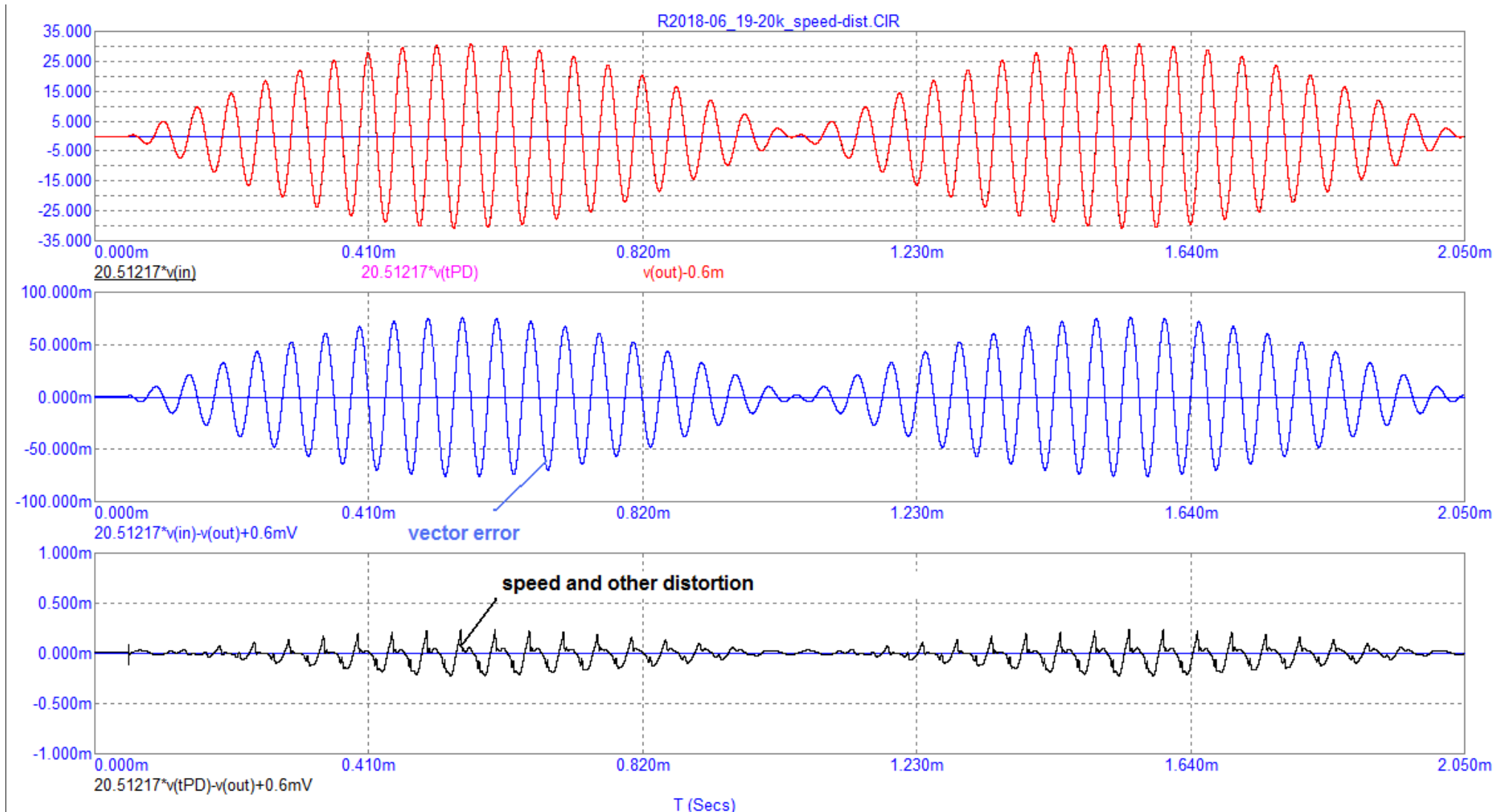


Fig. 17

На синусоидальных сигналах все виды искажений не превышают долей миллиВольта.

Проведем аналогичный тест на первом усилителе, рис. 18

On sinusoidal signals, all types of distortion do not exceed fractions of a mV.

Let's carry out a similar test on the first amplifier, Fig. 18

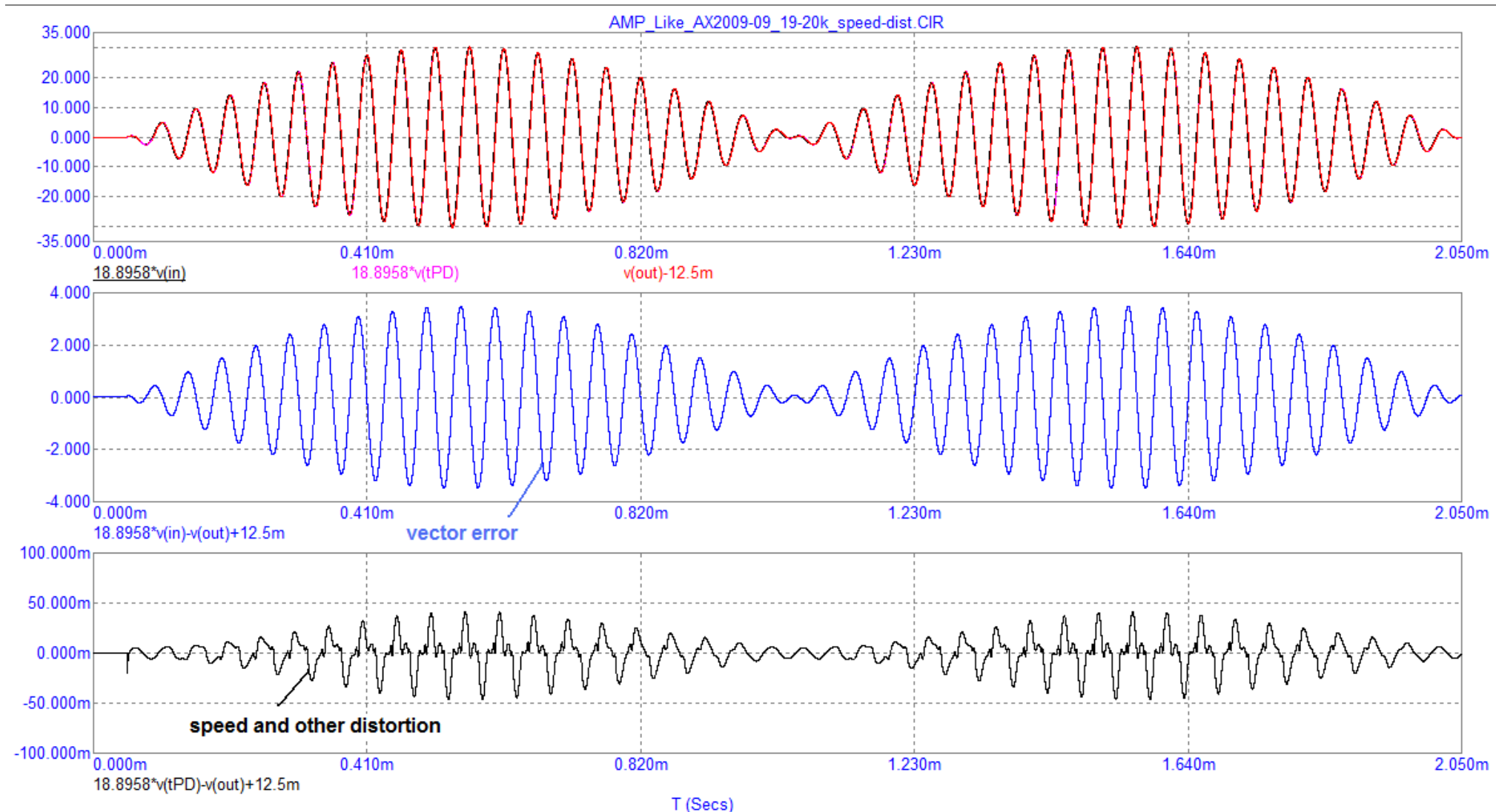


Fig. 18

И на синусоидальных сигналах напротив вершин сигнала мы видим продукты искажений аналогичные искажениям напротив вершин треугольного сигнала амплитуда которых достигает почти 50 мВ. Поэтому неудивительно что и в тесте на IMD в звуковом диапазоне возникает повышенный уровень шумовой подставки за счет продуктов интермодуляции высших порядков. Напротив переходов через ноль хорошо видны и кроссоверные искажения.

Нелинейность амплитудной характеристики затрудняет подбор коэффициента передачи ( $K_u$ ) хорошо работающего во всем диапазоне амплитуд сигнала.

And on sinusoidal signals opposite to the signal peaks, we see distortion products similar to the distortions opposite the triangular signal peaks, whose amplitude reaches almost 50 mV. Therefore, it is not surprising that in the IMD test in the audio range an increased level of noise bias occurs due to higher-order intermodulation products. Crossover distortions are clearly visible opposite

the zero crossings.

The nonlinearity of the amplitude characteristic makes it difficult to select the transmission coefficient ( $K_u$ ) that works well over the entire range of signal amplitudes.

Литература:

Literature:

5. paX, by Jan Didden, audioXpress 2009\_08-09

6. А.Петров, УМЗЧ с токовой обратной связью, Радио 2018-06 (A. Petrov, AMP with current feedback, Radio 2018-06 )

Best regards

Alexander Petrov (Petr)