

Природа искажений звуковых сигналов и так ли они «неуловимы»

Вместо вступления начнем с выдержки из статьи «как это звучит» [1]: «Звуковой сигнал по своей физической природе похож на шум. Только через восприятие человеком он несет музыкальную информацию о произведении в целом и о звучании отдельных инструментов. При восприятии всего объема этой информации мы не испытываем никакого дискомфорта или ощущения чего-то инородного. Наоборот, мелкие, но естественные детали (реверберация зала, дыхание вокалиста, фон в гитарном комбике, движение пальцев по струнам) придают произведению естественность и натуральность.

Парадокс состоит в том, что разрушение этой музыкальной информации вследствие искажений превращает звуковой сигнал в шум, не несущий никакой информации об источнике сигнала. Особенно это заметно на информационно насыщенных сигналах — атаках, вокале, барабанном железе, сибилантах. При их искажении появляется одновременно звучащий шум, сопровождающий сам сигнал. При этом дыхание вокалиста становится грубым и шумным, звук тарелок сопровождается однотонным «ш-ш-ш» независимо от того, какая это тарелка, шипящие звуки приобретают неприятную навязчивость.»

Примерно то же самое пишет и Чивер по поводу различий работы на стационарных сигналах и реальном музыкальном со ссылкой на [2]: «Вспышки шума, обнаруживаемые в течение первых нескольких десятых долей секунды в сложных ударных звуках рояля или клавесина, являются ключевыми элементами в процессе распознавания. Мозг имеет очень сложный механизм уяснения многотональности, но при определенном пороге дополнительных случайных вибраций (шумов) механизм нейронной обработки просто отказывает. Я полагаю, что обратная связь сама создает уровни интермодуляционных искажений, которые модулируют и иным образом запутывают шумовые всплески музыкальных инструментов, ведя к субъективному ощущению, что звук «искусственный».»

Известно что для снижения искажений используют всякого рода обратные связи. Не будем останавливаться на всем их многообразии остановимся лишь на наиболее часто применяемой общей отрицательной обратной связи (ОООС). Структура усилителя с ОООС в общем виде представлена на рисунке 1.

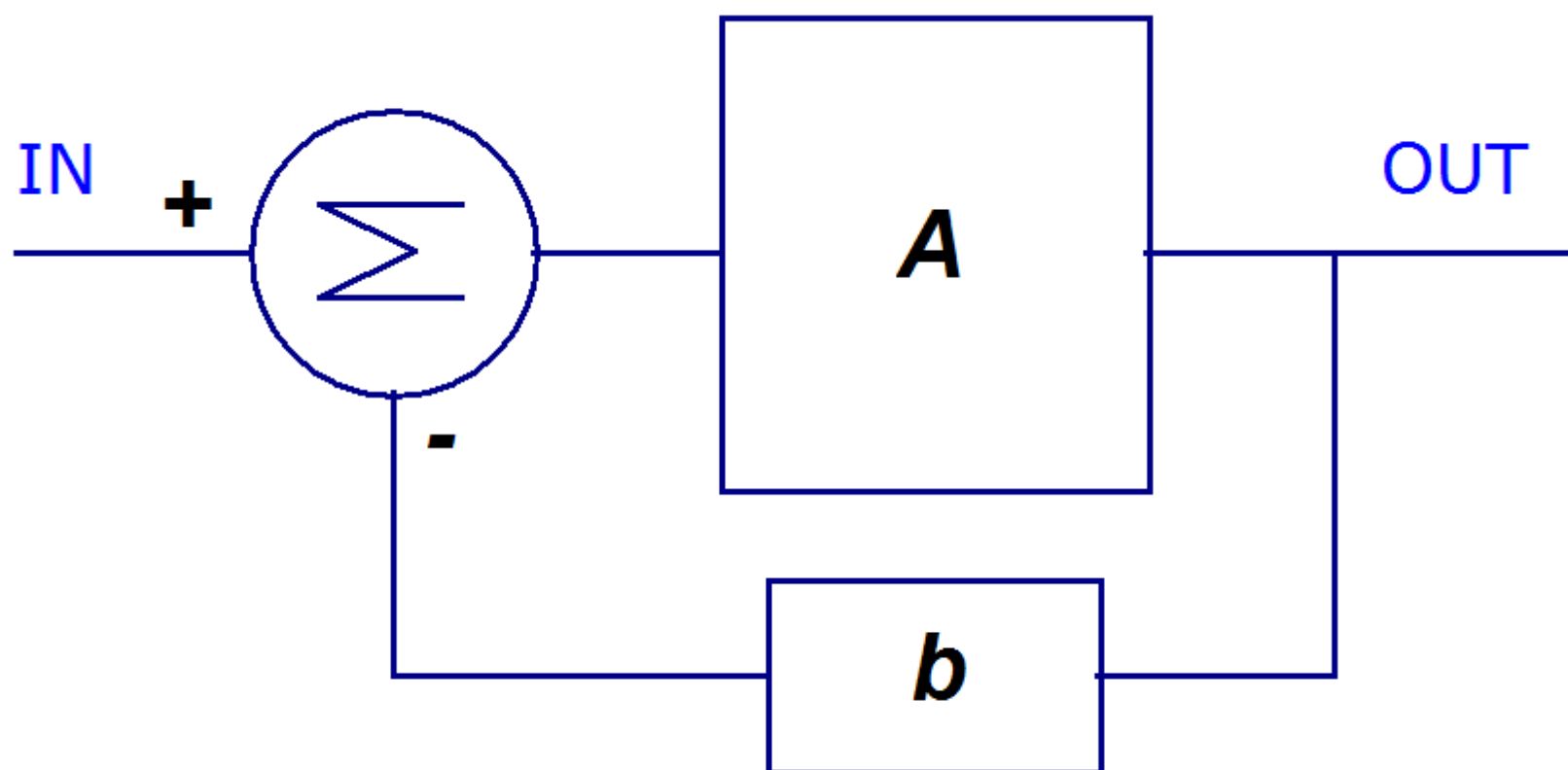


Рис. 1

A — коэффициент усиления с разомкнутой петлей ОС (усиление прямого контура),
 b — коэффициент ослабления ОС ($b = A/K_u$),
 Ab — петлевое усиление

Входной сигнал сравнивается с ослабленным в K_u раз выходным в сумматоре и разностный сигнал усиливается в A раз. Чем больше A тем больше петлевое усиление при заданном K_u и тем меньше уровень разностного сигнала который после усиления и поступает на выход усилителя OUT.

Все бы работало идеально, если бы не одно но. Нахождение сигнала со входа до выхода требуется время, которое называют временем задержки прохождения. В зарубежной литературе его называют Time Propagation Delay (tPD). Чаще всего его указывают для единичного усиления и измеряют в середине периода между входным и выходным сигналами. Время tPD зависит от K_u прямо пропорционально.

В усилителях постоянного тока (УПТ) без следящего питания, вольтодобавки и прочих ПОС время задержки постоянно в звуковой полосе и далеко за ее пределами и численно равно

групповому времени задержки (ГВЗ). В усилителях с разделительным конденсатором на входе, в цепи ООС на общий, а также с сервоконтролем имеет место роста ГВЗ ниже нескольких кГц. В ряде случаев ГВЗ принимает даже отрицательное значение. Тем не менее рост ГВЗ в области НЧ не означает рост задержки в установившемся режиме, напротив, конденсаторы как дифцепи в сочетании с неизбежными задержками прохождения сигналов создают затяжные переходные процессы и в установившемся режиме имеет место опережение сигналов.

Известно что сложение/вычитание двух идеальных синусоидальных сигналов сдвинутых во фазе менее 180 градусов (один задержан по отношению к другому) не ведет к появлению искажений в результирующем напряжении измеренном в установившемся режиме, оно будет лишь сдвинуто на время равное половине задержки.

Проведем простой эксперимент с помощью «установки» рис. 2

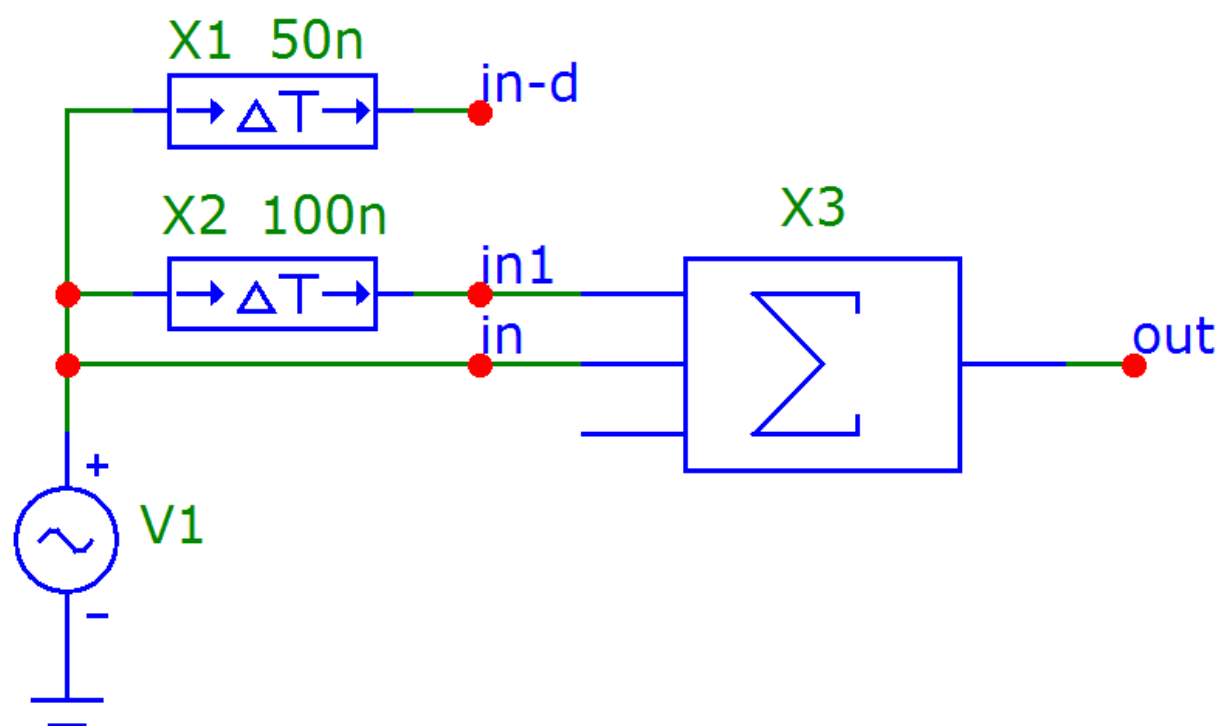


Рис. 2

Установив частоту генератора V1 равной 20 кГц и задержку X2 равной 100 нс на выходе сумматора получим синусоидальный сигнал задержанный на 50 нс. Его начало показано на рисунке 3

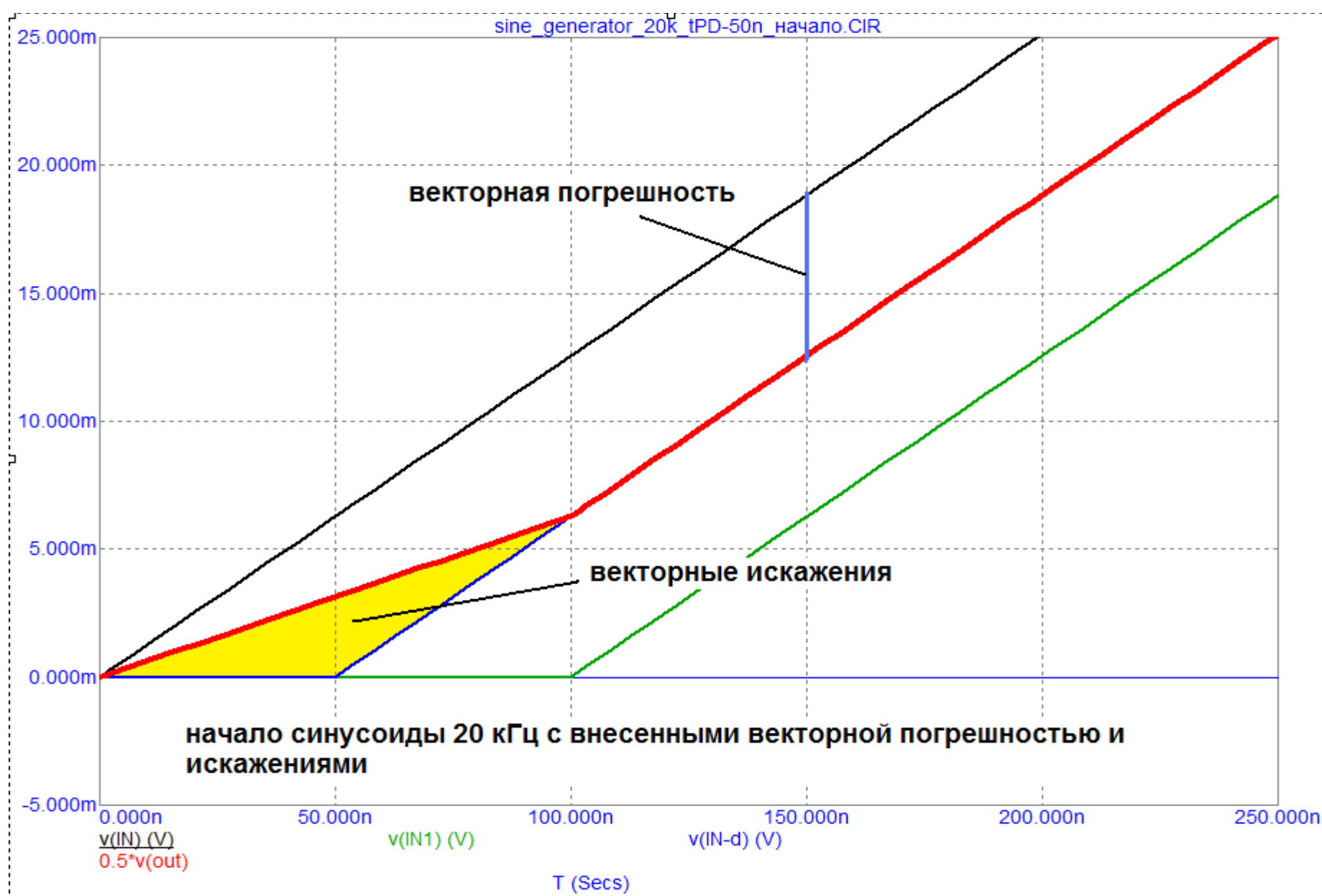


Рис. 3

Черной линией показан сигнал генератора, зеленой — задержанный сигнал, синей - сигнал задержанный на 50 нс и красной — выходной сигнал приведенный по уровню к входному делением на 2.

Сигнал генератора в симуляторе бесконечен в обе стороны, потому и не имеет искажений на идеальной активной нагрузке (резисторе) на любом периоде так как резистор не вносит задержки в сигнал.

Совсем другая ситуация происходит при подаче сигнала на вход усилителя и измерении его искажений на выходе. В этом случае начало теста эквивалентно подаче сигнала на усилитель с помощью безынерционного ключа синхронизированного с переходом через ноль.

Анализ первого периода синусоиды ничем не отличается от анализа других повторяющихся сигналов. В любом сигнале происходят искажения связанные с временем задержки прохождения сигнала через усилитель. Если бы не было задержки, то не было бы и искажений. Анализ первого периода синусоиды на искажения косвенно говорит об уровне векторных погрешностей и искажений. Повторяющиеся сигналы другой формы (меандр, треугольник) безразлично на каком периоде измерять для выявления этого вида искажений.

На синусоидальном сигнале сдвиг по фазе на первом периоде вносит векторные погрешности (смещение — отраженной синей линией) и векторные искажения (желтый треугольник), рис. 3. Природа синусоидального сигнала такова, что со второго периода на выходе сумматора рис. 2 сигнал идеален. Это понятно из рисунка 4 и табл. 1. Тем не менее на выходе реальных усилителей даже на синусоидальном сигнале благодаря циркуляции искажений внесенных на первом периоде в петлю ОС они плавно спадают до минимального значения в течение длительного времени (выход на установившийся режим затягивается до сотен периодов).

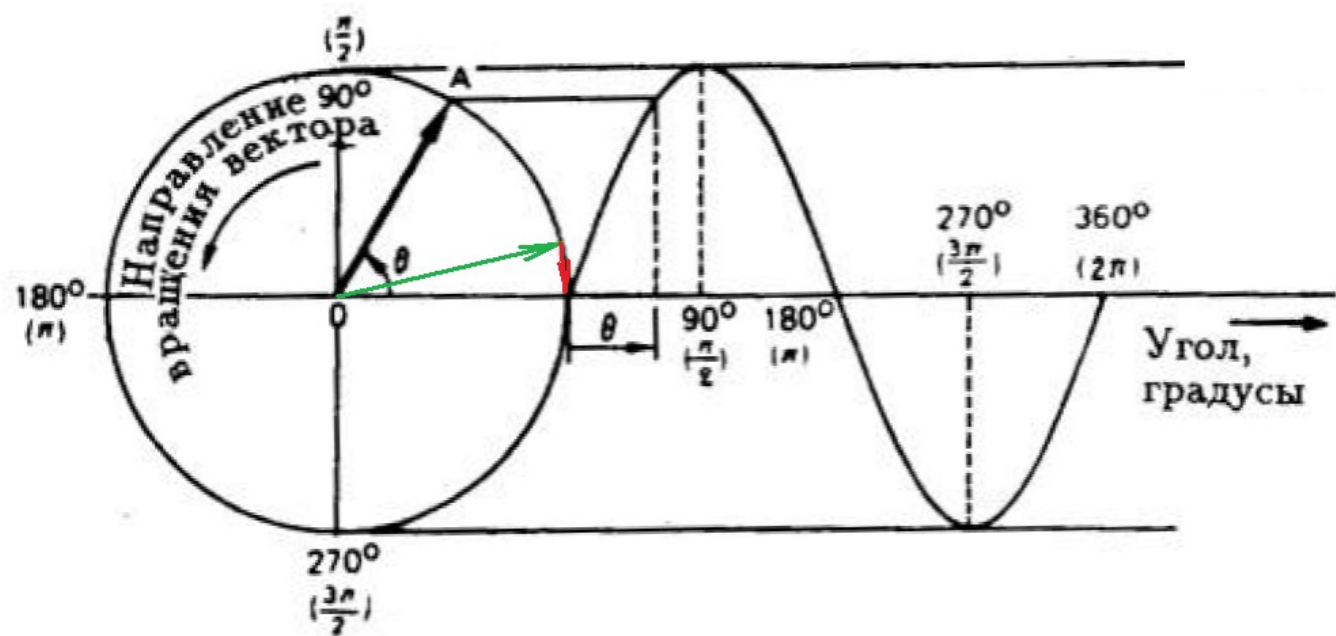


Рис. 4

Исследуем выходной сигнал (рис. 2) на общий коэффициент гармоник (Кг). Результаты измерений для частот 20 Гц, 1 и 20 кГц сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Частота	Время задержки одного из сигналов	Время задержки выходного сигнала	Искажения суммы двух сигналов, %	
			1-й период	2-й период и последующие
20 Гц	100 нс	50 нс	0,000004	0,000000000001
	1 мкс	500 нс	0,00003	0,000000000001
	10 мкс	5 мкс	0,0004	0,000000000001
	100 мкс	50 мкс	0,006	0,000000000001
	250 мкс	125 мкс	0,03	0,000000000001
	1 мс	500 мкс	0,4	0,000000000001
	5 мс	2,5 мс	6,5	0,000000000001
1 кГц	10 нс	5 нс	0,000018	0,000000000002
	100 нс	50 нс	0,0002	0,000000000002
	1 мкс	500 нс	0,002	0,000000000002
	2 мкс	1 мкс	0,006	0,000000000002
	5 мкс	2,5 мкс	0,03	0,000000000002
	10 мкс	5 мкс	0,1	0,000000000002

20 кГц	10 нс	5 нс	0,0002	0,000000000002
	100 нс	50 нс	0,0033	0,000000000002
	200 нс	100 нс	0,011	
	1 мкс	500 нс	0,23	0,000000000002
	2 мкс	1 мкс	0,9	0,000000000002
	5 мкс	2,5 мкс	5,0	0,000000000002

Как видно из таблицы искажения выходного сигнала отсутствуют уже со второго периода. В то же время на первом периоде искажения тем меньше, чем меньше время задержки.

Если измерить искажения первого периода самого генератора, то они ничтожно малы (стремятся к нулю). Поэтому упреки отдельных читателей, мол на первом периоде ничего измерять нельзя, не принимаются. Вот что писал В.Матюшкин в работе [3]:

«Нелинейность усилителя проявляется гораздо сильнее во время переходного процесса (длительность которого за счет задержки сигнала в цепи ООС может быть значительной), особенно на его начальном этапе, когда действие ООС наименее эффективно (*примеч. авт. из-за упомянутой задержки*). В отличие от динамических искажений, приводящих к перегрузке входного каскада на протяжении всей длительности неблагоприятного по параметрам входного сигнала - рассматриваемые переходные НИ имеются даже тогда, когда отсутствуют динамические, но только пока переходный процесс не закончен. А если учесть, что реальные звуковые программы очень далеки от стационарности и на самом деле вызывают в УМЗЧ почти непрерывный переходный процесс, то при воспроизведении таких программ НИ могут намного превышать измеренные обычными методами в одном и том же экземпляре усилителя.»

Время задержки (а значит и скоростные параметры) некоторых усилителей сильно зависит от сопротивления источника сигнала (растет с ростом Ri). Поэтому входному каскаду и сопротивлению источника сигнала (их согласованию между собой) следует уделять не менее пристальное внимание.

От времени задержки зависят скоростные и векторные погрешности (искажения) на которые обращал внимание Достал [4], рис. 5. В соответствии с расчетом для получения векторных искажений менее 0,01% время задержки прохождения сигнала не должно превышать 80 нс.

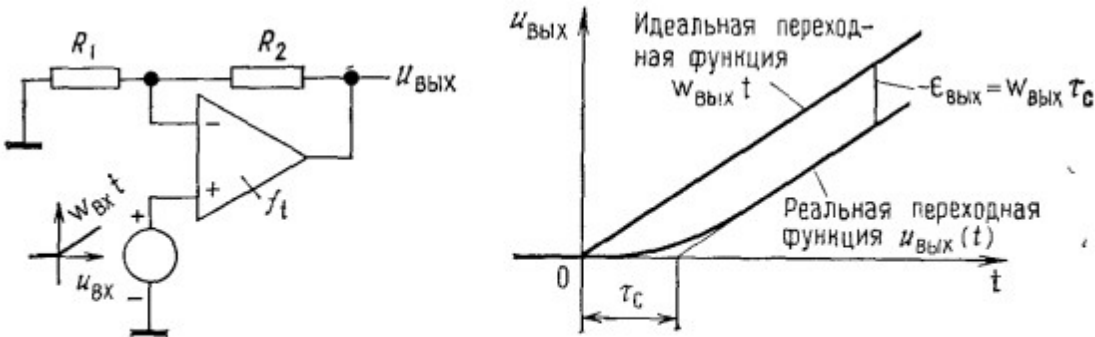


Рис. 9 16. Скоростная погрешность неинвертирующего усилителя при возбуждении его линейно-нарастающим напряжением.

Рис. 5

Векторные искажения не проявляются на синусоидальных сигналах в установившемся режиме. Они проявляются в начале периода и по его окончании (например. в начале и в конце бурста), при любых отклонениях от синусоидального напряжения, а также при резких изменениях направления скалярного вектора напряжения которыми изобилуют реальные музыкальные сигналы, рис. 6.

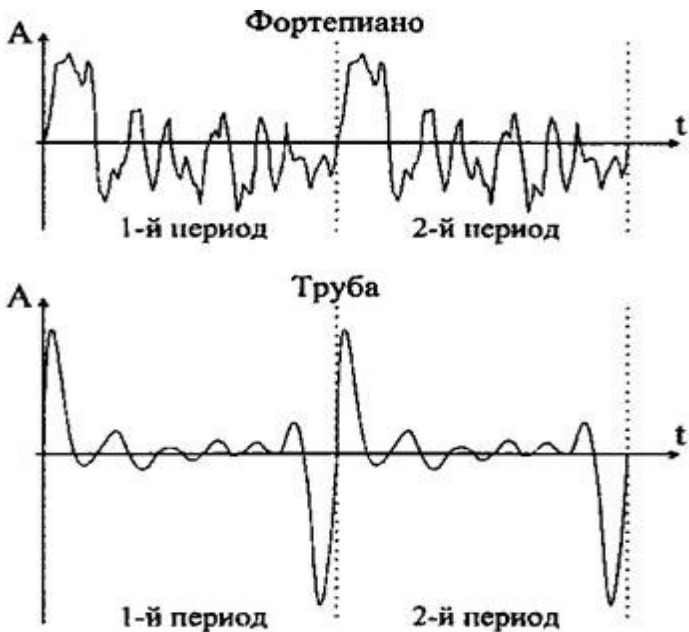


Рис. 3.6. Сигналограммы звучания трубы и фортепиано

Рис. 6

Для музыкальных сигналов не применимо векторное представление рис. 4, здесь лучше

подходит скалярный метод представления, рис. 7

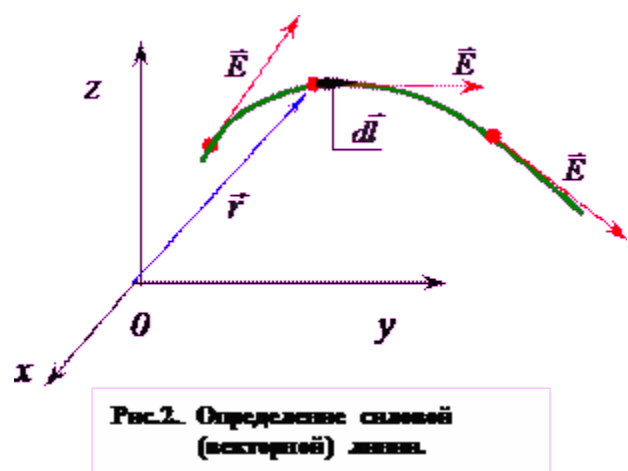


Рис. 7

Прекрасный тест для выявления векторных искажений проверка усиления пилообразного напряжения частотой 10 кГц. Для этого достаточно вычесть из приведенного входного напряжения задержанного на время задержки прохождения выходной сигнал усилителя и посмотреть результат.

Теперь представим себе процесс начала усиления реального сигнала. Чем больше усиление усилителя с разомкнутой ООС тем больше задержка сигнала на выходе и какая бы быстродействующая (как любят писать некоторые авторы) ОС ни была в узел сравнения сигнал ОС поступает с задержкой. Чем больше задержка тем больше вероятность перегрузки входных каскадов и возникновения динамических искажений на которых заострял внимание Матти Отала и Ееро Лейнонен в работе [5]. Авторы показали что динамические интермодуляционные искажения практически отсутствуют в усилителях с первым полюсом 20 кГц и выше и глубиной ООС не более 30 дБ. Авторы также заострили внимание что низкая мощностная полоса пропускания отвечающая за скорость нарастания сигнала говорит о склонности усилителя к динамическим искажениям.

Еще в 50-х годах Вильямсон писал, что для высококачественного усиления звукового сигнала достаточно чтобы Кг на максимальной мощности был не выше 0,1%. Мол такое низкое содержание гармоник фактически не обнаруживаемо в самых утонченных тестах прослушивания. Он также отметил что фазовые сдвиги между гармоническими составляющими сложного, установившегося сигнала не влияют на слышимое качество звука, но в динамике оказывают существенное влияние на натуральность воспроизведения. Уровень фона и шумов должен быть, по крайней мере, не хуже -60 дБ. Следует, однако, иметь в виду что речь шла о ламповых усилителях без ООС с монотонным спадающим спектром. Поэтому на малых уровнях сигнала вносимые усилителями искажения были существенно ниже. Более того перегрузка ламповых усилителей приводит лишь к компрессированию сигналов и никак не к жесткому клипированию как это происходит в транзисторных усилителях.

Линн Олсон в статье «Гармоники стоящие за цифрой искажений» привел пример блестящего анализа Нормана Кроухерста (N. Crowhurst) того, как с помощью ОС идет обвальное падение порядка гармоник. Статья была перепечатана в Glass Audio (The Amplifier Distortion Story, 6/95 и 1/96). Начал он с одного каскада, имеющего только одну вторую гармонику, затем добавил второй каскад последовательно первому. На выходе уже появились 2-я, 3-я и 4-я гармоники. Когда он сделал двухтактный усилитель, то хвост гармоник протянулся до десятой, потеряв все четные. И, наконец, замкнул петлю обратной связи, что дало ряд гармоник вплоть до 81-й. Весь этот «наворот» произошел всего-то из одной «идеальной» лампы, имеющей одну только вторую гармонику!

После того как убедились что уровень Кг измеренный в установившемся режиме ни о чем не говорит начали измерять интермодуляционные искажения. Однако измерение двухтональным методом в большом окне это все равно что измерять среднюю температуру по больнице. Показания оказываются на 30...40 дБ оптимистичнее чем есть на самом деле. Оказалось что более информативным в этом плане измерение с помощью многотональных или шумоподобных сигналов. Большую работу в этом направлении провел наш бывший соотечественник А.Войшвило который показал что динамический диапазон отдельных глубокоОСных усилителей с уровнем общих гармонических искажений ниже 100...120 дБ сужается до 30...40 дБ. Примерно тоже самое происходит и на реальных звуковых сигналах где динамический диапазон сужается за счет шума от интермодуляционных продуктов искажений высшего порядка.

Следующий параметр на который до недавнего времени не обращали должного внимания это фазовая характеристика петлевого усиления. Можно выделить три основных фазовых характеристики:

- характеристика подавляющего большинства УМЗЧ выполненных по структуре Лина с первым полюсом 1 кГц и ниже (в большинстве композитных усилителей первый полюс ниже 100 Гц благодаря ОУ);
- характеристика УМЗЧ с частотой первого полюса выше 20 кГц (идеально 200 кГц и выше);
- характеристика УМЗЧ с 2-х полюсной коррекцией или аналогичной

У первого типа фазовый сдвиг петлевого усиления в подавляющей части звукового диапазона (в

середине) составляет 90 градусов, задержка прохождения сигнала может достигать нескольких мкс.

У второго типа фазовый сдвиг начинается в конце звукового диапазона или даже за его пределами, задержка прохождения сигнала как правило находится в пределах 30...100 нс, время выхода на установившийся режим примерно в 1,5...2 раза больше задержки. Выходное сопротивление постоянно во всем звуковом диапазоне и не имеет фазового сдвига.

У третьего типа фазовый сдвиг может достигать более 180 градусов возвращаясь к частоте единичного петлевого усиления на уровень 150 градусов и менее, чем и достигается устойчивость работы. Что касается задержки в установившемся режиме, то она может быть очень малой — несколько нс, а то и вообще иметь опережение. В то же время задержка в самом начале изменения вектора напряжения может достигать нескольких десятков нс, а выход на установившийся режим может быть от нескольких сотен нс до нескольких мкс и носить колебательный характер. Не смотря на ничтожную задержку (или даже опережение) в установившемся режиме, задержка в начале синусоиды (или в момент изменения вектора напряжения) с последующим затянутым колебательным характером выхода на опережение наряду с высокой точностью звукопередачи может давать ощущение гипертрофированного «воздуха» в звуке.

Фаза выходного сопротивления (за редким исключением) полностью соответствует фазовому углу петлевого усиления.

По этому поводу С.Агеев писал [6]:

«... при фазовом угле петлевого усиления, близком к $\pm 90^\circ$, $\pm 270^\circ$, амплитудные нелинейности исходного усилителя практически полностью конвертируются в фазовые (т. е. в паразитную фазовую модуляцию, пусть и ослабленную в $|bA|$ раз). При этом паразитная модуляция амплитуды практически исчезает, и получаемые результаты измерений интермодуляционных искажений могут быть на 20...30 дБ более оптимистичными, чем на самом деле покажет анализатор спектра (и слух в случае УМЗЧ). К сожалению, именно так и обстоят дела с большинством ОУ и многими УМЗЧ. Запас устойчивости по фазе на высоких частотах для УМЗЧ не следует выбирать меньше 20° ... 25° (ниже - ненадежно) и невыгодно повышать более 50° ... 70° (заметные потери в площади усиления, т. е. в быстродействии и глубине ООС).»

До недавнего времени считалось что важен спектральный состав сигнала, а фазовые соотношения между составляющими сигнала не имеют значения. Вот что по этому поводу пишет И.Алдошина в статье «Слуховые пороги»: «Изменения фазовых соотношений между спектральными составляющими сигнала существенно меняют его временную структуру. Исследования последних лет показали что изменения фазовых соотношений влияют на изменение тембра, четкость определения высоты музыкального сигнала и др. Именно точная передача соотношений (как по амплитуде, так и по фазе) между всеми гармониками требуется для сохранения натурального тембра инструмента, а не амплитуда той или иной гармоники самой по себе.

Чувствительность слуха зависит от порядка гармоник: заметность гармонических искажений третьего порядка вдвое выше, чем искажений второго порядка, заметность искажений от пятого порядка и выше в 6...10 раз выше, чем второго. Именно этим объясняется странное явление, что в акустических системах, имеющих в основном нелинейные искажения низших порядков, пороговые значения составляют 1...2%, в то же время в транзисторных усилителях и цифровой аппаратуре, где возникают нелинейные искажения высоких порядков, уровни нелинейных искажений должны составлять сотые и тысячные процента, чтобы они были незаметны для слуховой системы.»

Следующий параметр, на который следует обращать внимание это интермодуляционные искажения. Филипп Ньюэлл в статье «Интермодуляционные искажения - неуловимый враг» пишет: «Воспринимаемые слухом искажения, являются именно интермодуляционными искажениями. Когда воспроизводится комплексный музыкальный сигнал, то сложное спектральное распределение результатов интермодуляции не только не способствует обогащению гармонической структуры музыки (как это происходит за счёт проявления гармонических искажений, по крайней мере, гармоник-обертонов низших порядков), но и всё больше начинает напоминать обычное добавление шума.

При наличии интермодуляционных искажений теряется чистота и проницательность звучания, пропадает детализировка на низких уровнях сигнала, теряется характерная "лёгкость" звучания.

Очень серьёзно страдают от интермодуляционных искажений духовые оркестры и хоры. Мультичастотные исследования демонстрируют, что во многих случаях общее количество интермодуляционных искажений может быть почти в четыре раза большим, чем измеренное суммарное значение коэффициента нелинейных искажений!

С увеличением количества возбуждающих частот резко возрастает число интермодуляционных производных, потому что ещё и сами производные начинают интермодулировать между собой. Не нужно обладать большим воображением, чтобы представить себе результаты такого процесса для сложного музыкального сигнала. Получится хаотический модуляционный шум, который по уровню, может быть, всего на 40 dB тише, чем собственно музыка.»

Надо сказать что это явление подтверждают многочисленные тесты на многотональных сигналах.

Находящиеся под маркетинговым диктатом киты Mark Levinson, Cello и Krell (и не только) движутся в сторону более линейных усилительных блоков, позволяющих применять менее глубокую обратную связь. Все эти движения находятся в жесткой оппозиции к современным, стандартным,

общепринятым измерениям, порождающим «технические характеристики». Эта тенденция доказывает, что требуется ревизия существующей методологии измерений, если целью измерения характеристик звукового оборудования является корреляция с субъективным качеством звука.

В дополнение несколько цитат из переписки на вегалабе:

<http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=2754&p=150781&viewfull=1#post150781>

ИГВИН

Клячин там объяснял с точки зрения ламп.

Хорошая микродинамика - на слух это: более точный, более естественный звук, длинные послезвучия, акустическая атмосфера записи хорошо слышна.

Плохая - как будто включили пороговый шумодав.

<http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=3273&p=132619&viewfull=1#post132619>

Л. Зув

Сергей, раз уж речь зашла об искажениях, позволю себе наглость привести еще пару цитат. .

Сообщение от SIA

По моему опыту, единственный объективный параметр, жестко коррелирующий с прозрачностью и нейтральностью, это векторная точность. Остальные, если они достаточно хороши, на звук практически не влияют.

Сообщение от SIA

Если векторная погрешность очень мала (менее 0.01%) - статистически различного влияния усилителя не отмечено. Просто нейтральный, детальный, но без следов резкости звук, причем, что важно, воспроизводимый независимо от топологии и конструкции усилителя.

То есть, разные по схемотехнике и идеологии усилители, укладываемые на реальном сигнале в 0.01%, практически невозможно отличить, равно как и заметить какие-либо дефекты, которые могли бы достоверно быть отнесены к усилителю.

Напомню, что исследованиями векторных искажений начали заниматься с самого начала развития звукоусилительной техники. Наиболее удачная публикация на эту тему была у Питера Баксанда [7]. Его метод с успехом использовал и И.Акулиничев. Цифры приведенные С.Агеевым соответствуют расчетам И.Достала [4] в соответствии с которыми 0,01% векторных искажений соответствует задержка прохождения сигнала 80 нс.

Даже если усилитель в установившемся режиме имеет ничтожно малые нелинейные искажения это никак не может гарантировать его качество звука, так как качество звука наилучшим образом коррелирует с векторными искажениями.

Векторные искажения на синусоидальном сигнале рождаются только в следующих случаях:

- **в начале и конце бурста,**
- **при скачкообразном изменении амплитуды сигнала,**
- **при изменении частоты.**

Все это в полной мере присутствует в музыкальных сигналах.

Векторный метод измерения искажений наилучшим образом применим в УПТ, так как ГВЗ - прямая линия от постоянного тока до нескольких МГц и в них нет переходных процессов во всем звуковом диапазоне. Ну а как применить этот метод для большинства усилителей с развязкой входа по постоянному току? Для этого модель усилителя необходимо временно перевести в УПТ и сняв диаграмму Боде убедиться в том что ГВЗ (GD) постоянно как минимум с 20 Гц. Рассмотрим это на примере популярного «безупречного» усилителя Д.Селфа [8], рис. 8

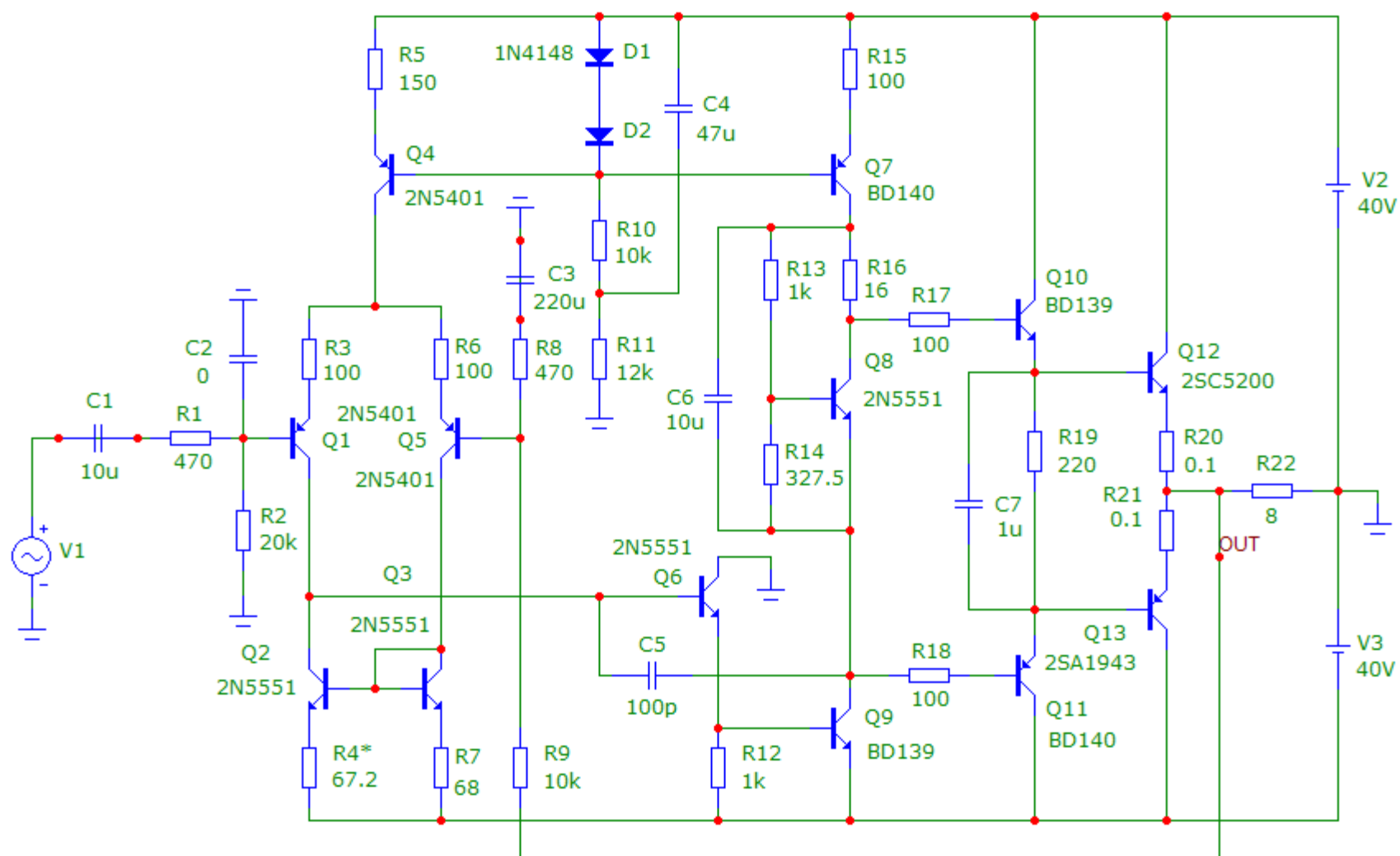


Рис. 8

Для перевода усилителя в УПТ достаточно выкоротить входной конденсатор C1 и конденсатор в цепи ООС C3. Подбором резистора R4 балансируем усилитель по постоянному току (выставим ноль на выходе) и снимем диаграмму Боде, рис. 9.

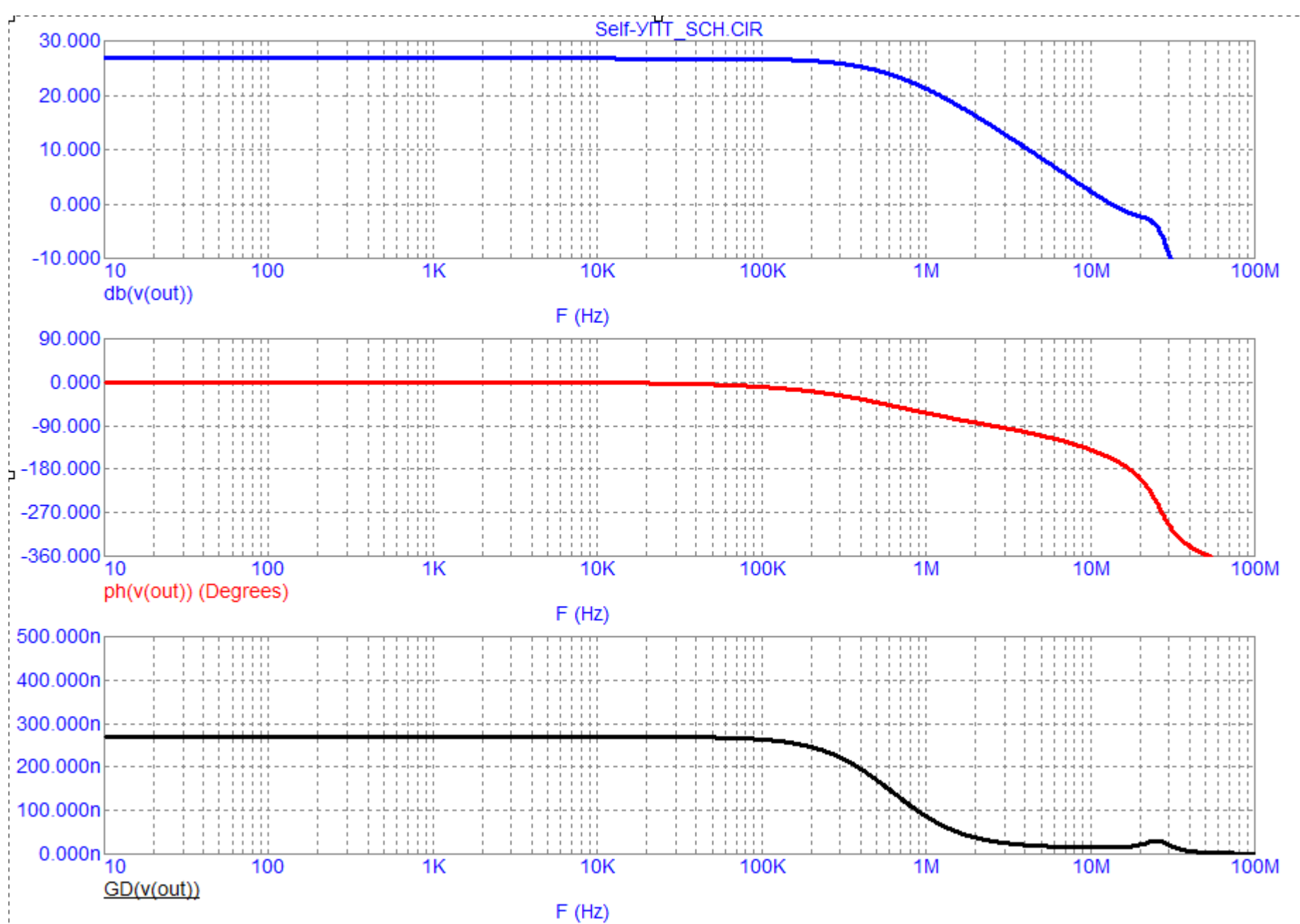


Рис. 9

Наиболее просто измерить векторные искажения в начале и конце бурста на частоте, например 20 кГц, а также на вершинах треугольного сигнала частотой 10 кГц. Однако наиболее близкий к музыкальному сигналу многотональный. В качестве тестового сигнала воспользуемся мультитоном [8] и измерим векторные искажения, рис. 10

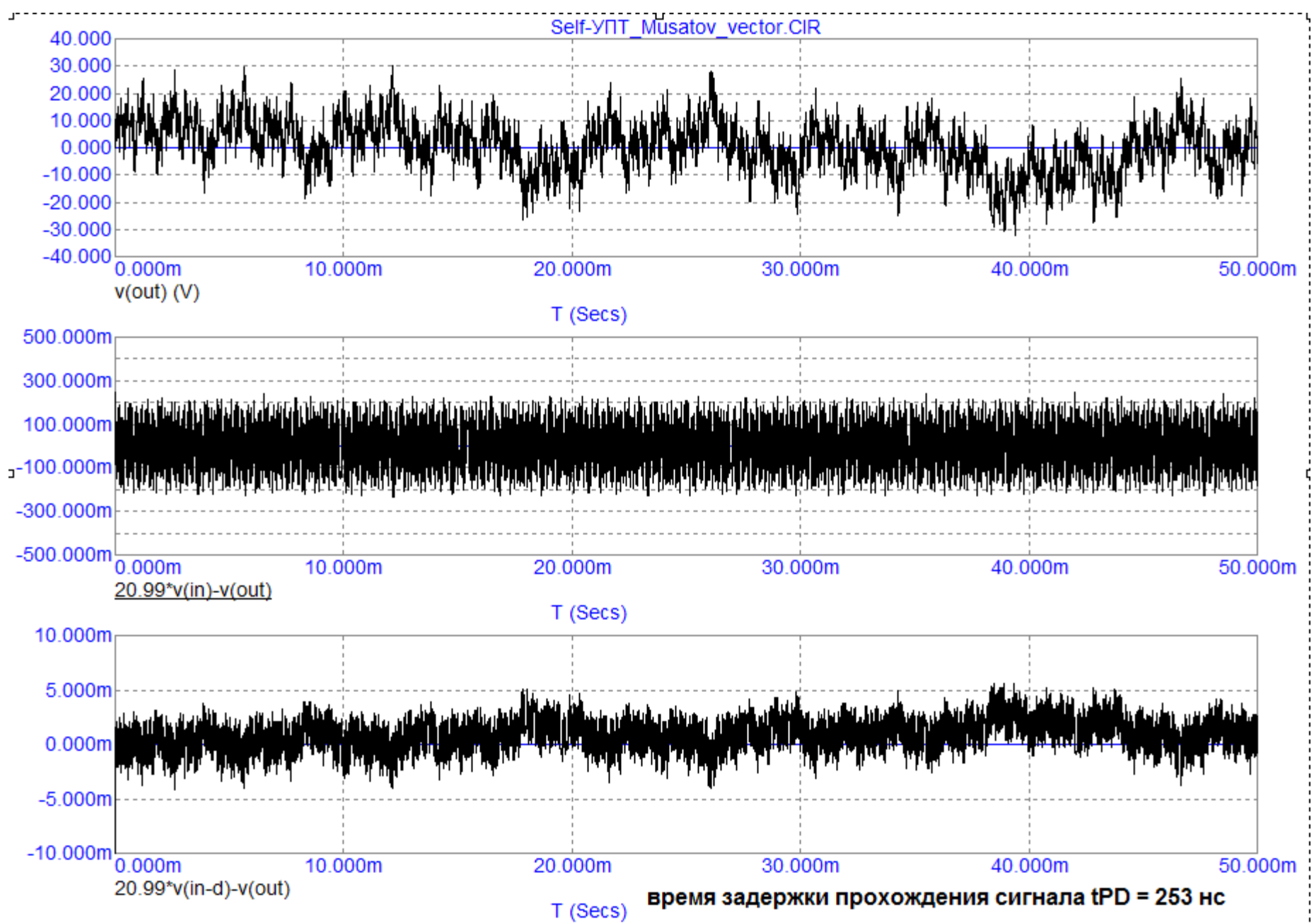


Рис. 10

Векторная погрешность в среднем имеет амплитуду от пика до пика примерно 400 мВ, а векторные искажения около 5 мВ которые «смазывают» мелкие детали звукового материала, убивают микродинамику и создают интермодуляционную шумовую подставку. И хотя выходное напряжение от пика до пика достигает 60 В его среднее значение примерно на 10 дБ ниже, т. е. около 20 В. Таким образом шумовая подставка от векторных искажений составляет 0,025 % что соответствует динамическому диапазону около -70 дБ. Некоторые авторы утверждают что время задержки ни на что не влияет. Прделаем аналогичный тест модели усилителя [9], рис. 11

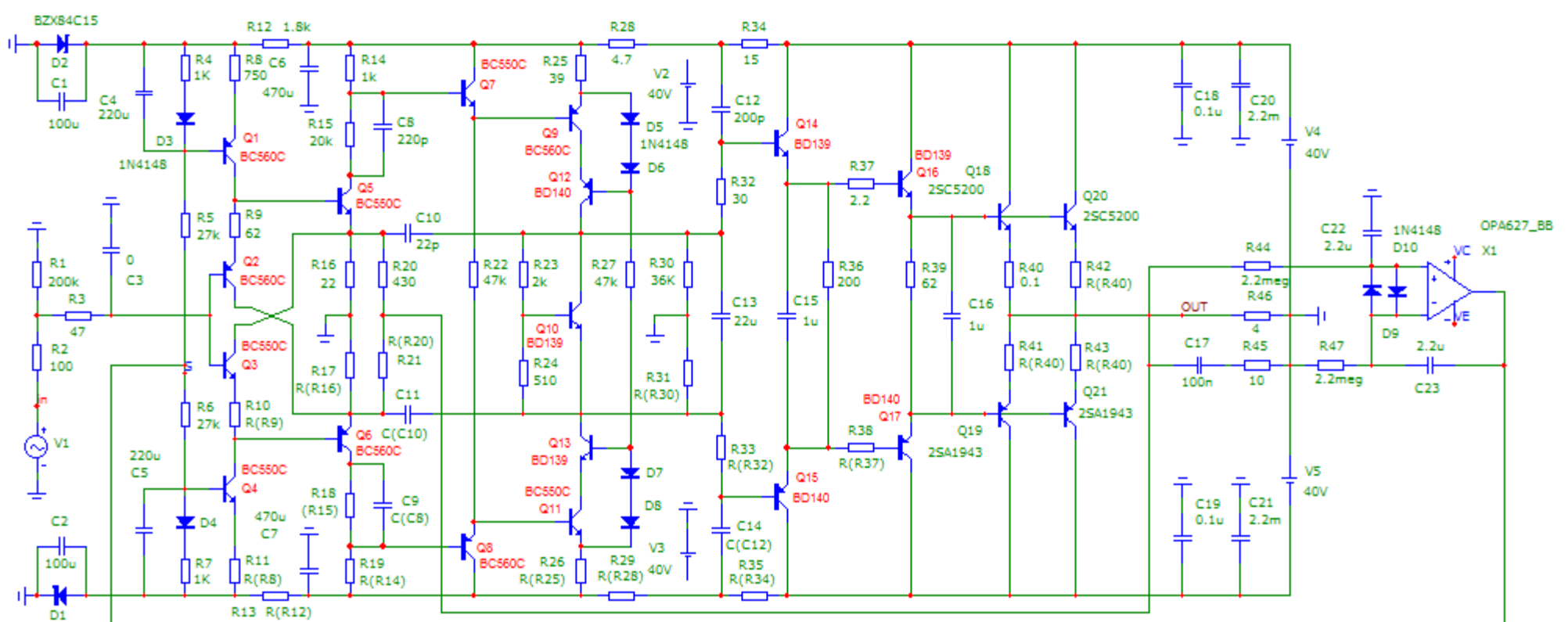


Рис. 11

Чтобы получить постоянное ГВЗ во всем звуковом диапазоне пришлось переделать систему сервоконтроля. Диаграмма Боде показана на рис. 12

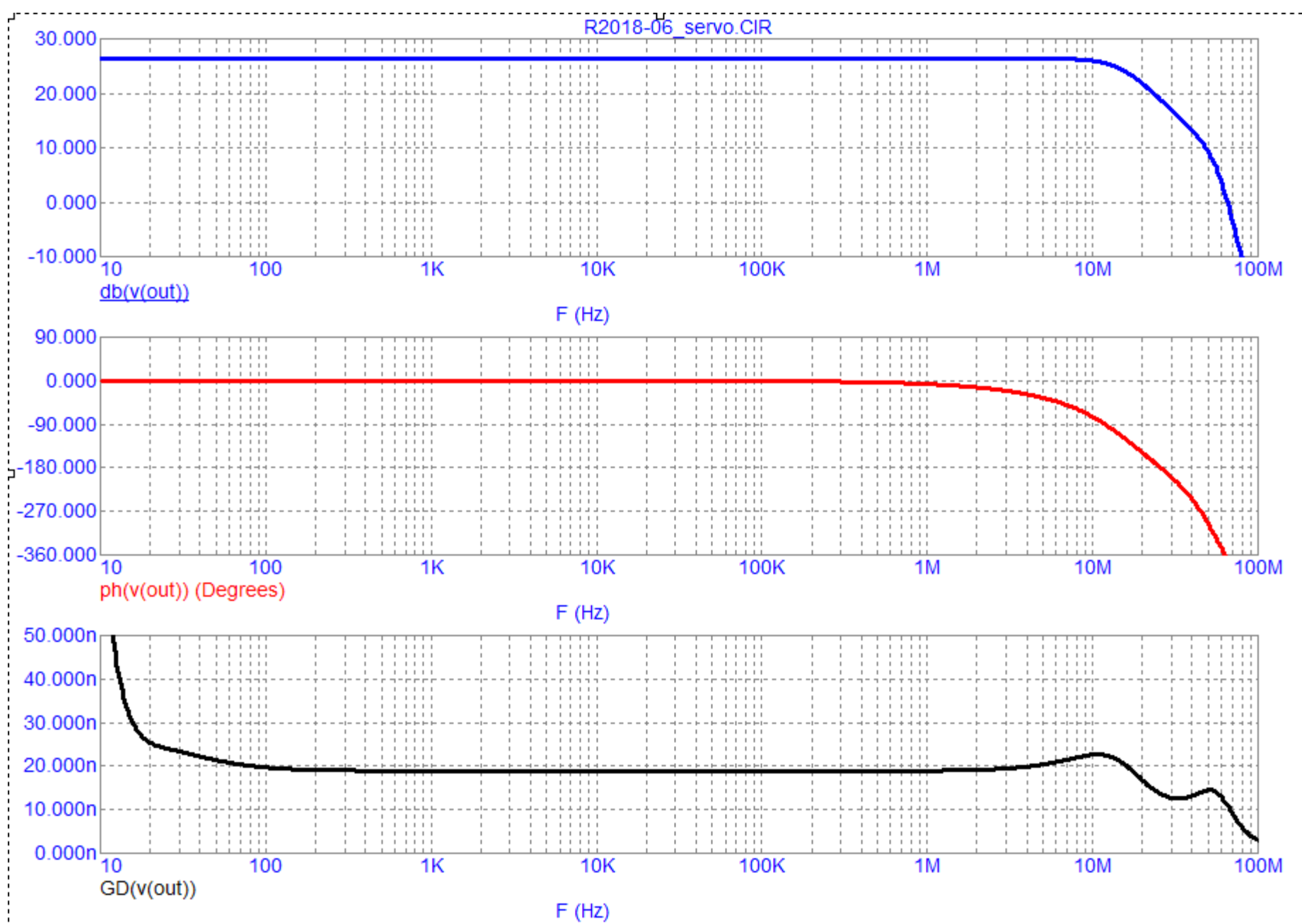


Рис. 12

На рисунке 13 показан результат теста

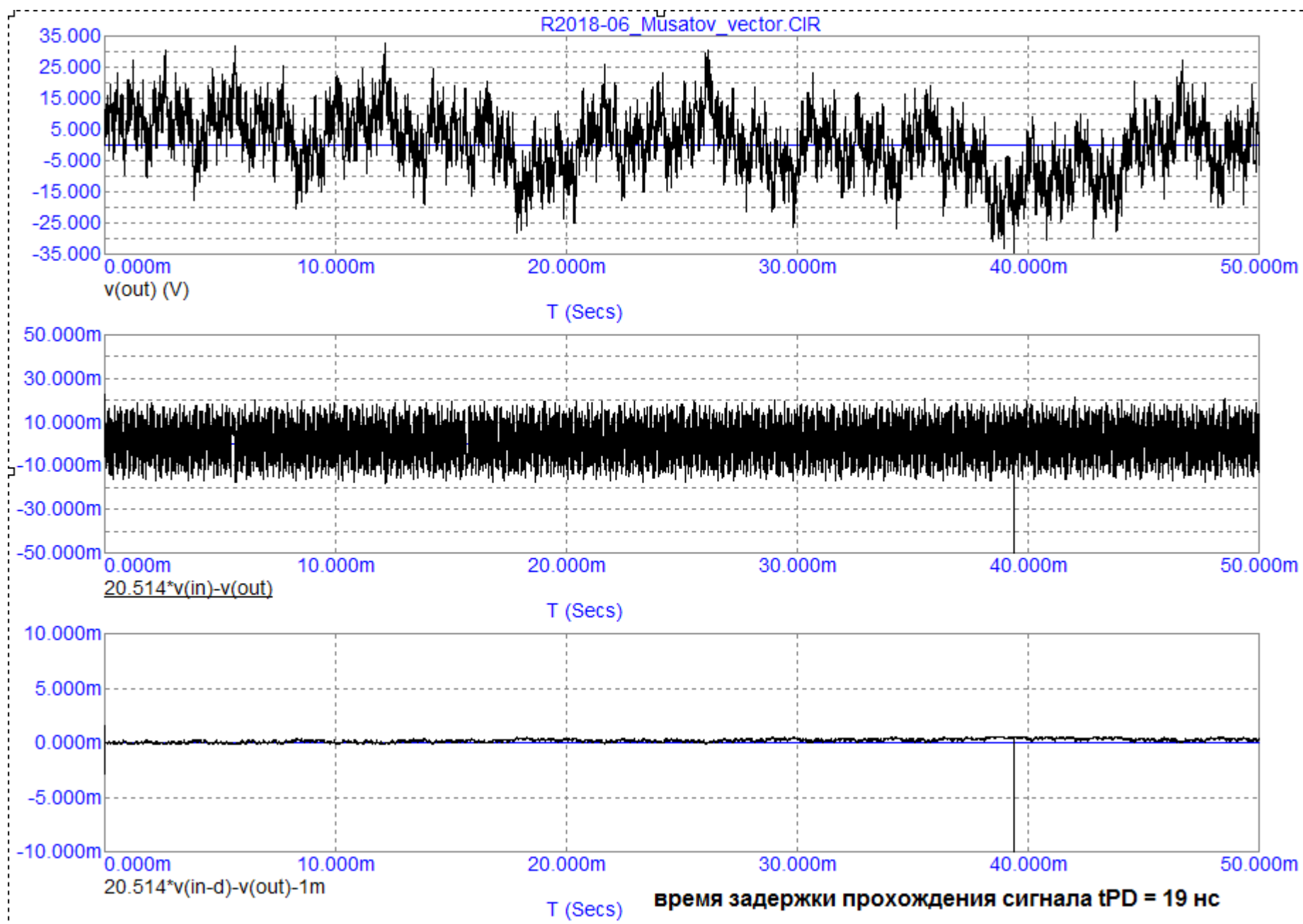


Рис. 13

Как видим векторная погрешность от пика до пика менее 20 мВ что более чем в 20 раз меньше чем в усилителе Селфа, а векторные искажения ничтожно малы.

Проведем еще один тест предложенный Хирагой [15] на устойчивость к внешним воздействиям типа обратной ЭДС и на нагрузочную способность усилителя [14]. Тест заключается в подаче на вход усилителя сигнала частотой 1...6 кГц, а к выходу через фильтр-пробку настроенную на входную частоту через резистор равный импедансу нагрузки (4 Ома) подключают сигнал частотой 50...60 Гц уровнем 25...30 В(пик). Тест заключается в измерении спектра ИМИ на выходе УМЗЧ. Такой тест еще называют обратной интермодуляцией (RIMD), результат теста отображен на рис. 14. При полезном сигнале частотой 6 кГц выходной ток усилителя модулируется паразитным током амплитудой более 7,5 А частотой 50 Гц.

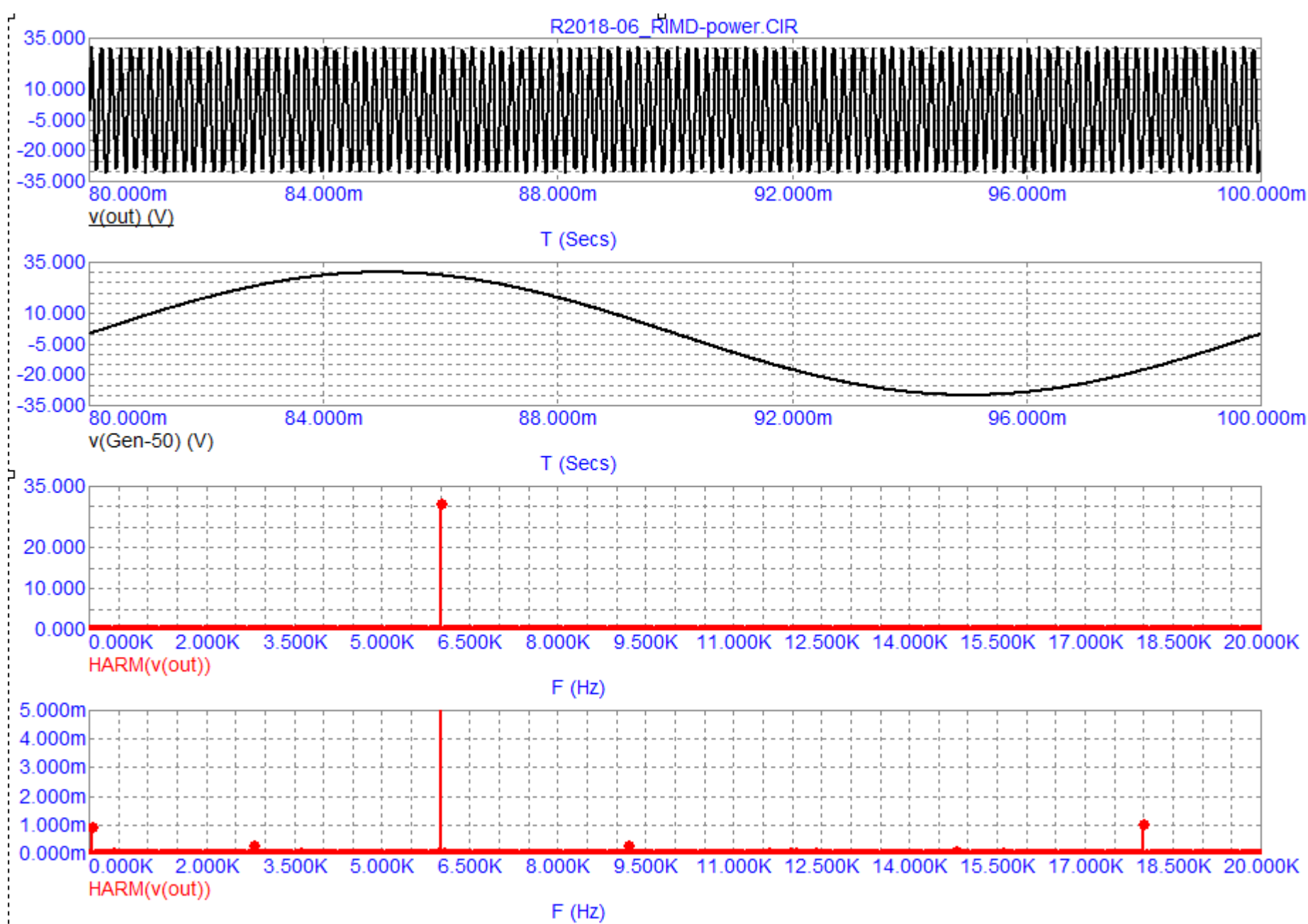


Рис. 14

Как видно из рис. 14 продукты обратной интермодуляции ничтожно малы и не превышают несколько десятых милливольт и нет шумовой подставки как в примерах 3, 4 и 5 из [15], рис. 15.

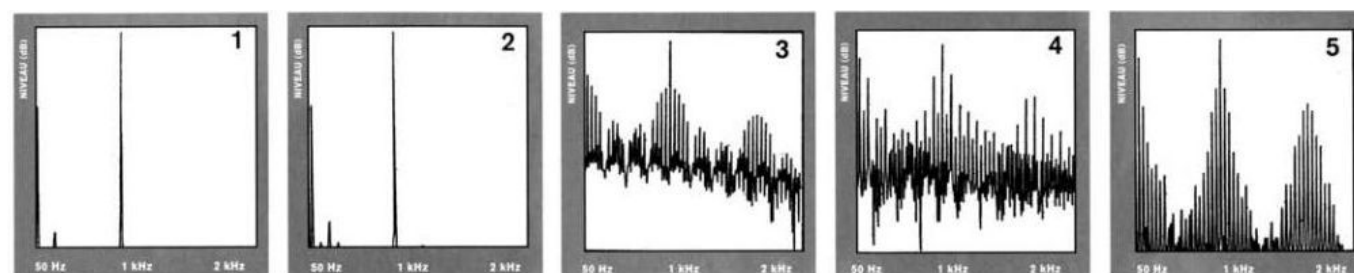


Рис. 15

На рис. 15 представлены следующие спектры

1. рис. 1 — спектр оригинального композитного сигнала;
2. рис. 2 — спектр на выходе хорошо звучащего усилителя;
3. рис. 3 — спектр на выходе плохо звучащего усилителя при половинной мощности имеющего паспортный $K_{\Gamma}=0,008\%$;
4. рис. 4 — спектр того же усилителя что и на рис. 3 только при номинальной мощности;
5. рис. 5 — спектр хорошо звучащего лампового усилителя с неглубокой ООС

<http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=86428&p=2704651&viewfull=1#post2704651>

Корень

ВКФ - взаимокорреляционная функция, есть в Микрокапе. Можно ей пользоваться как интегральной оценкой искажения усилителя во временной области: сдвигаете линией задержки вход относительно выхода, масштабируете также как вы сигналы, чтобы совпали и применяете ВКФ, нормируете на АКФ. Так можно оценивать даже нестационарные случайные сигналы, а детерминированные тем более. Но

метод, который вы описываете, из этой же области и вполне работоспособен и применим на практике.

В свое время мне было непонятно почему в одних усилителях послезвучия продолжительные, а в других они мгновенно «умирают», почему одни усилители работают с прекрасной прорисовкой мельчайших деталей звукового материала, а другие имеют «мертвый» звук, все «мажут». Надеюсь что теперь понятно, что за этот эффект отвечают векторные искажения.

Еще один вопрос, который часто вызывает споры это взаимодействие УМЗЧ-АС. Подавляющее большинство АС рассчитаны на низкий импеданс УМЗЧ с демпингфактором не менее 20. Хотя на самом деле для обеспечения АЧХ не хуже $\pm 0,5$ дБ достаточно иметь суммарное сопротивление импеданса УМЗЧ + сопротивление акустических проводов не выше 1/16 минимального значения импеданса АС.

Существует такое понятие как критический демпингфактор. Критическое сопротивление — critical damping-resistor (R_{cd}) необходимое для оптимального демпфирования ГГ состоит из суммы выходного сопротивления усилителя, сопротивления проводов и сопротивления катушки R_e . Если критическое сопротивление равно сопротивлению катушки R_e рулит усилитель с высоким ДФ. Если R_{cd} больше сопротивления катушки необходим усилитель с выходным сопротивлением $R_{out} = R_{cd} - R_e$, т.е. с положительным выходным сопротивлением. В том случае когда $R_{cd} < R_e$ лучше подойдет усилитель с отрицательным импедансом.

Есть немало публикаций для получения перестраиваемого выходного сопротивления. Все они основаны на использовании комбинированной ООС по напряжению и по току. Возможный вариант такого решения показан на рис. 16. С помощью контроллера ОС по току подается в точку суммирования в виде ООС либо ПОС.

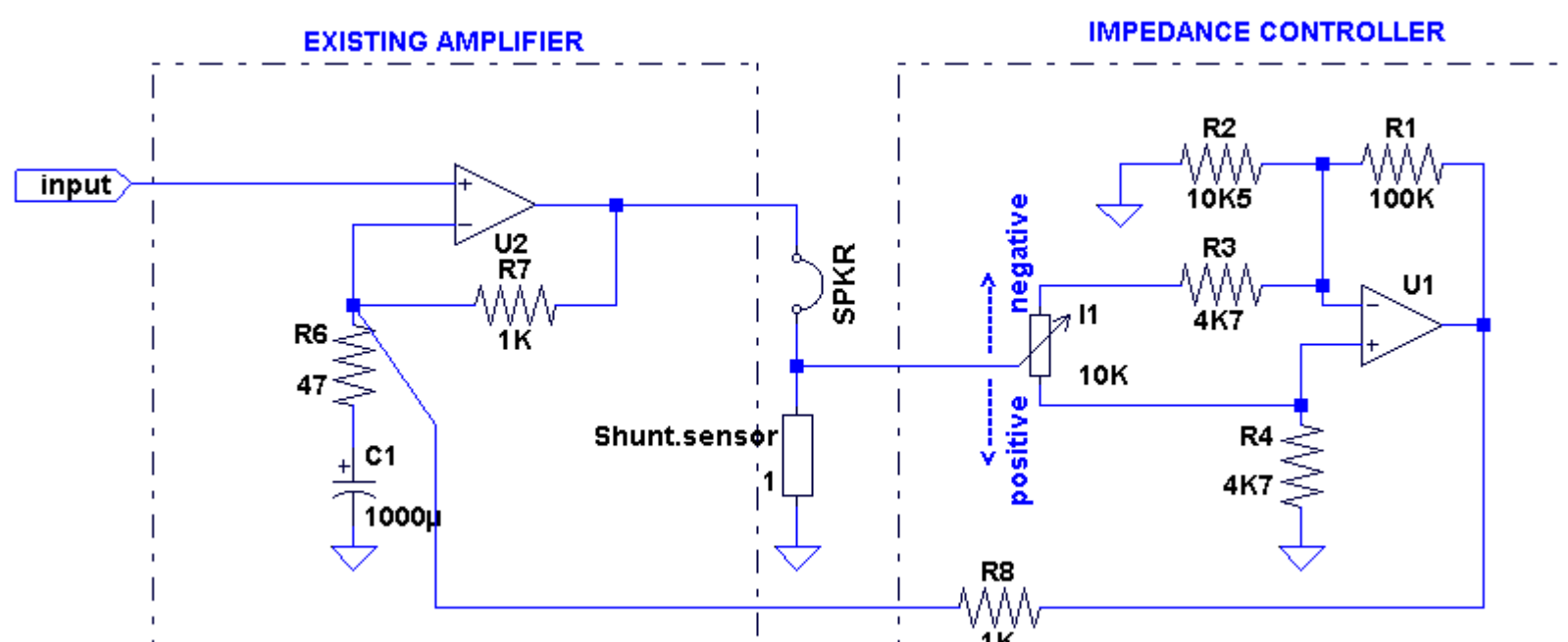


Рис. 16

Надеюсь что этот материал приоткрыл некоторые тайны звука.

Подводя черту необходимо напомнить что качество работы усилителя зависит не только от его схемотехники, но в значительной степени от комплектующих и от качества разводки печатной платы, качества электро монтажа.

Литература:

6. М.Чумаков, Как это звучит, <http://filigrane.ru/audition/>
7. Roederer, Juan G. "Introduction to the Physics and Phychophysics of Music" 2-nd Edition. 1979. Heidelberg Science Library, Springer-Verlag, Berlin Germany
8. В.Матюшкин, Сверхлинейный УМЗЧ класса High-End на транзисторах, Радиоаматор 1998 №8
9. И.Достал, Операционные усилители. — М, Мир, 1982.
10. Матти Отала и Ееро Лейнонен, Теория динамических интермодуляционных искажений, перевод статьи (<http://zverevaudio.narod.ru/articles/TIM/TIM.html>).
11. С.Агеев, Вопросы проектирования усилителей с общей ООС, Радио 2003 №4
12. P.J.Baxandall, Audible amplifier distortion is not a mystery, Wireless World, November 1977
13. К.Мусатов, Метод измерения реального разрешения усилителя, <http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=34487>
14. А.Петров, УМЗЧ с токовой обратной связью, Радио 2018, 06
15. J.Hiraga, The many faces of distortion, Glas Audio, may 2005

с уважением,
Александр Петров