

## Комплекс для измерения сверхнизких нелинейных искажений

Евгений Лукин, г. Донецк

В связи с развитием HI-FI и High-End техники весьма актуальным становится вопрос об измерении коэффициента нелинейных искажений, измеряемых тысячными и десятитысячными долями процента. Аппаратуры для измерения таких искажений у радиолюбителей, как правило, не имеется, поэтому приходится довольствоваться либо уже имеющейся, либо, что более часто встречается, полагаться на свой слух. Но у каждого человека слух имеет свои индивидуальные особенности, и далеко не каждый имеет хорошую долговременную слуховую память. В современной литературе, посвященной технике класса Hi-End, часто обращается внимание на подбор радиоэлементов по «музыкальности» звучания. Однако при этом в качестве измерителя используется ухо человека, что затрудняет подбор элементов, и не исключается субъективный фактор. Между тем, подбор элементов можно значительно ускорить, если предварительно измерить в них искажения - было бы чем измерить.

Для измерения Кни предлагается измерительный комплекс, состоящий из генератора со сверхнизким Кни (0,0004%) и собственно измерителя нелинейных искажений. Для измерения Кни с таким комплексом необходим милливольтметр (с нижним пределом 10 мВ) и осциллограф.

**Принципиальная схема** измерителя нелинейных искажений (ИНИ) приведена на *рис. 1*. Измеритель представляет собой два режекторных фильтра, включенных последовательно, причем один из них - перестраиваемый. Входной сигнал подается на аттенюатор R1-R7. Диапазон входных напряжений 1...30 В. Переключателем S1 можно ослабить входной сигнал на 10 и 20 дБ, что дает возможность измерять Кни мощных УМЗЧ. Сигнал с аттенюатора подается на перестраиваемый режекторный фильтр (частота настройки 1 кГц), выполненный по схеме 2Т-моста. Для повышения добротности применен ОУ DA2. Глубина режекции -30 дБ. Усилитель на DA3 компенсирует затухание, вносимое 2Т-мостом. Далее сигнал поступает на перестраиваемый режектор (центральная частота настройки 1 кГц), также собранный по схеме 2Т-моста. ОУ DA4 служит для повышения добротности режектора. Сигнал с выхода второго режектора подается на масштабный усилитель DA5 (коэффициент усиления 26 дБ), что дает возможность применить обычный осциллограф (С1-73, С1-94, С1-112 и т.д.) и вольтметр с нижним пределом измерения 10 мВ. Сигнал

на усилитель DA5 может подаваться через ФВЧ и/или ФНЧ, что облегчает измерения на уровне шумов и низкочастотных наводок от источников питания. Следует отметить, что выбор режекторной (а не компенсационной) схемы измерителя диктуется тем, что позволяет измерить искажения мощных УМЗЧ, у которых нагрузка не подключена к общему проводу. Это могут быть УМЗЧ с эмуляторами как положительного, так и отрицательного выходного сопротивления, с устройством компенсации соединительных проводов, мостовые. В этих случаях исключается применение компенсационного ИНИ.

Остановимся несколько подробнее на принципиальной схеме (*рис. 1*). Для снижения влияния шумов, вносимых DA2, входной сигнал берется с выхода 2Т-моста (а не с выхода DA2). В схеме масштабного усилителя DA3 для этой же цели служит С5. Наиболее ответственной частью схемы - это второй перестраиваемый режектор. Его частоту настройки можно изменять резисторами R18, R25 и R17, R26, соответственно - грубо и точно. Чтобы не создавалось путаницы в процессе настройки, R25, R26 названы регуляторами баланса, хотя они также влияют на частоту настройки. При макетировании 2Т-моста было выяснено, что частоту настройки можно изменять всего двумя резисторами, таким образом упростилась как сама принципиальная схема, так и процесс настройки. В верхнем положении S3.1 включается ФНЧ R16C6, снижающий влияние шумов. Для снижения влияния шумов, вносимых DA4, выходной сигнал также снимается с выхода 2Т-моста. В среднем положении S3 ФНЧ и ФВЧ выключены, и сигнал подается на масштабный усилитель DA5. В нижнем положении S3 в схему включается ФВЧ C11C12R29R30, отсекающий нижние частоты (менее 300 Гц), что снижает влияние низкочастотных наводок на результат измерения. В верхнем положении S3 включаются ФВЧ и ФНЧ. Добротность режекторов выбрана так, чтобы завал АЧХ на 2й гармонике (2 кГц) был в пределах 1,5...3 дБ.

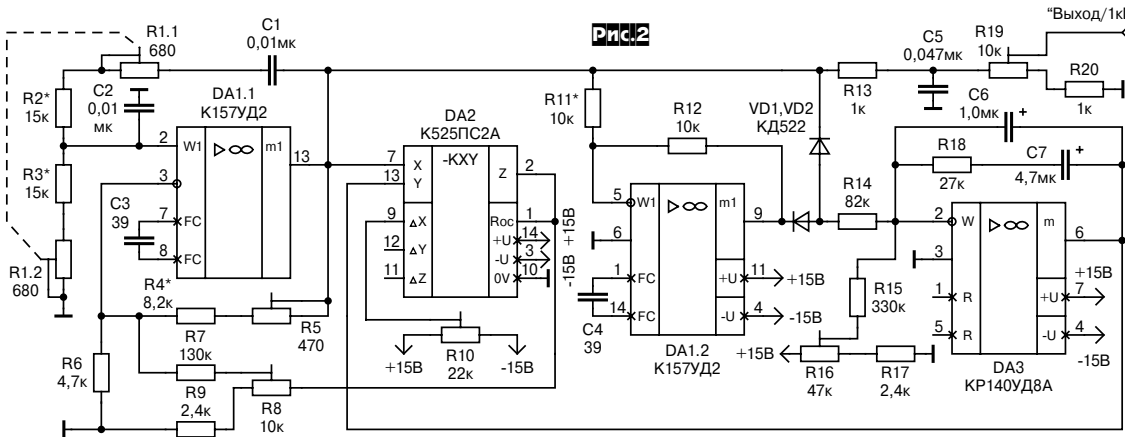
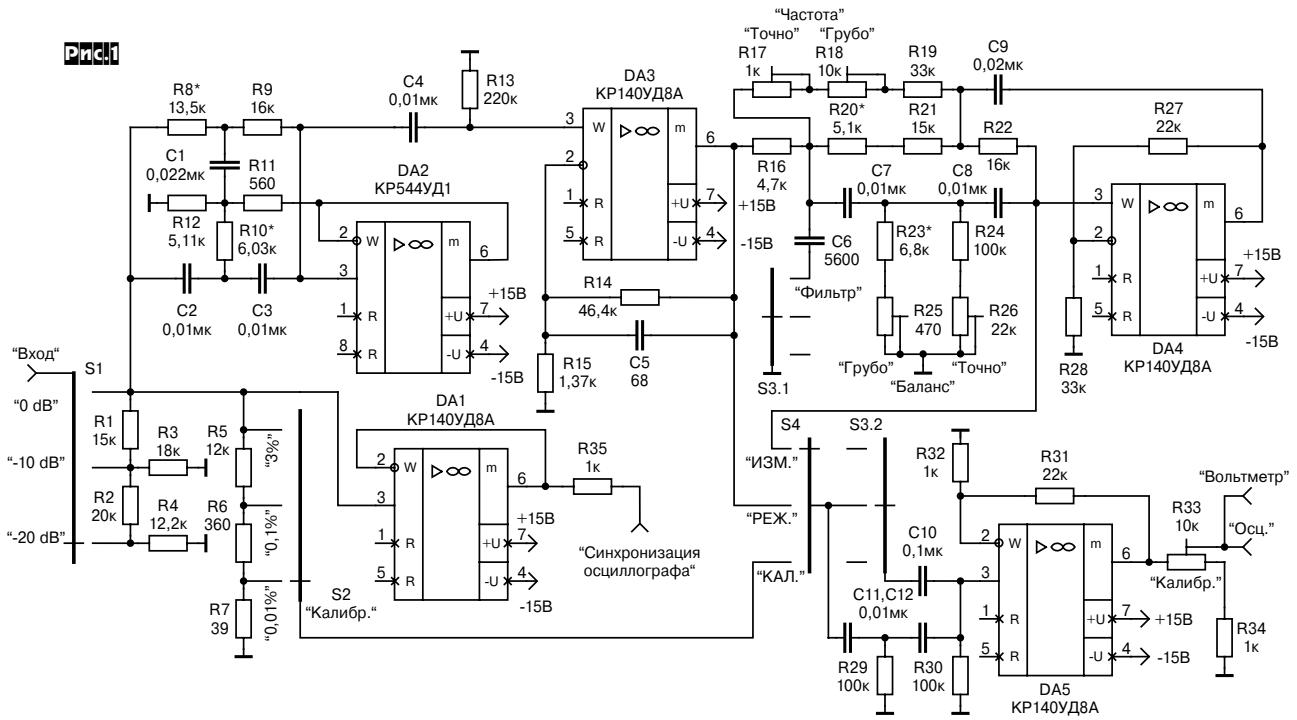
### Проведение измерений

Сигнал подается с источника (1 В, 1 кГц) на вход ИНИ. S1 в положении «0 дБ». В зависимости от ожидаемого Кни устанавливается переключатель S2 (например 0,01%). S4 ставится в положение «режекция». При этом сигнал на выход устройства подается с первого режектора. Изменяя частоту генератора в небольших пределах, добиваются минимума показаний вольтметра и/или осциллографа.

После этой операции перестраивать частоту генератора нельзя. Переводим переключатель в положение «калибровка». Резистором R33 устанавливаем стрелку вольтметра на отметку 100 мВ, что будет соответствовать  $K_{ни} = 0,01\%$ . Затем S4 переводим в положение «измерение». Переменными резисторами R18 и R25 добиваемся минимума показаний. Более точно добиваемся минимума резисторами R17 и R26. Если стрелка вольтметра будет показывать, например, 10 мВ, то измеряемый Кни будет равен 0,001%. При этом может потребоваться увеличить чувствительность вольтметра. Собственные шумы прибора находятся на уровне -112 дБ, что примерно соответствует 0,00025%. При включении ФНЧ показания должны несколько уменьшиться. Следует отметить, что включение фильтров несколько нарушает калибровку прибора, поэтому в этом случае его необходимо откалибровать заново. Совместно с вольтметром желательно использовать осциллограф. При этом можно будет наблюдать продукты искажений, которые могут быть (при точной балансировке и очень малых Кни) на уровне шумов. В осциллографе при измерениях используют внешнюю синхронизацию, для чего в ИНИ служит специальный выход (повторитель DA1).

**Детали** для частото задающих цепей 2Т-мостов должны быть высококачественными. Резисторы типа МЛТ-0,25. В первом режекторе допустимо применять конденсаторы К73-17. Во втором режекторе применены конденсаторы типа БМ, МБМ. Осистальные - КМ, К73-17.

**Настройку** ИНИ начинают с первого режектора. Подавая сигнал с генератора ЗЧ, измеряем частоту и глубину режекции. Сигнал можно контролировать на выходе DA3, отключив резистор R15 (в этом случае DA3 будет работать как повторитель). Подбором R8 и R10 добиваются частоты и глубины режекции 1 кГц и -30 дБ. После этого подбором R15 добиваются такого же напряжения на выходе DA3, как и на входе ИНИ (S1 в положении 0 дБ). После этого настраивается второй режектор. Не изменяя частоты генератора (после настройки первого режектора), R17, R18 и R25, R26 производится настройка второго режектора. Баланс должен наблюдаться примерно в среднем положении движков этих потенциометров. Если это не так, подбирают R23 и R20. Так как прибор можно откалибровать на каждом пределе, то подгонку R1-R7 можно не производить. От отношения R11/R12 и R27/R28 зави-



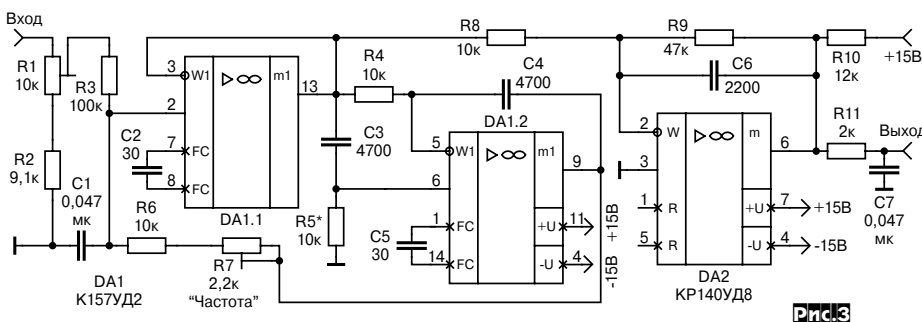
минимизируют Кни. При этом может понадобиться подбор R11, также по минимуму Кни. Перемножитель DA2 необходимо отобрать по минимуму шумов. Для этого он подключается к схеме через

сит добротность режекторов, поэтому ее можно скорректировать (при необходимости) в любую сторону, однако увлекаться этим не следует: при повышении добротности увеличивается точность измерения, если преобладает вторая гармоника, но повышаются требования к точности настройки второго режектора и к качеству деталей, и наоборот. Питание прибора может производиться от внутреннего источника питания (+15В/0,1А), при этом его необходи-

мо экранировать. Можно также применить и выносной блок питания.

Для измерения сверхнизких искажений требуется соответствующий генератор, схема которого изображена на рис.2. В основе его - генератор на мосте Вина, описанный в [Л]. Дальнейшее уменьшение искажений стало возможным благодаря использованию фиксированной частоты и более тщательной настройке схемы. Резистором R5 добиваются устойчивой генерации, а R8 и R10 -

14-ножечную панельку. Особое внимание надо уделить качеству R19 и C5. В качестве C5 (он служит для снижения шумов и высших гармоник) необходимо применять K73-9. При настройке генератора совместно с вышеописанным ИНИ (*High-End*щики, внимание!) можно воочию объективно убедиться, как тип конденсатора влияет на Кни, а также убедиться, что и R19 плохого качества может дать существенные искажения. Например, подключение параллельно C5 (K73-9,



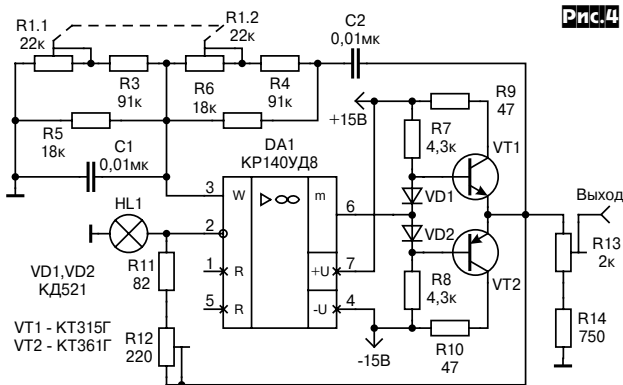
0,047 мкФ) импортного малогабаритного конденсатора емкостью 0,01 мкФ увеличивало Кни генератора на два порядка (!). Таким образом появляется возможность отбирать конденсаторы (0,01...2 мкФ) по минимуму искажений. При подключении малогабаритных конденсаторов (типа КМ) на большую емкость (0,1...2,2 мкФ) Кни также существенно возрастал. В отношении конденсаторов можно сделать однозначный вывод: чем больше

их удельная емкость, тем большие искажения они вносят. Хорошо настроенный генератор имеет  $K_{ни} = 0,0004...0,0005\%$ . Однако и это еще не предел (см. ниже). Для корректного измерения  $K_{ни}$  мощных УМЗЧ с незаземленной нагрузкой питание генератора должно быть гальванически развязано с питанием ИНИ. Поэтому генератор изготавливается в отдельном от ИНИ корпусе и имеет свое питание.

Получить сверхнизкий  $K_{ни}$  можно также с помощью устройства на **рис.3**, которое представляет собой **перестраиваемый избирательный фильтр**. При подаче на его вход сигнала 1 В с  $K_{ни} < 0,03\%$  получаем на его выходе сигнал 2 В с  $K_{ни} = 0,0003\%$ . Генераторы с  $K_{ни}$  на уровне 0,03% неоднократно описывались в различной литературе и наверняка имеются у многих радиолюбителей. Поэтому такое устройство является хорошей альтернативой генератору на **рис.2**. Добротность фильтра (**рис.3**), определяемая R3, выбрана равной 25 и не зависит от частоты настройки, определяемой резистором R7. Коэффициент передачи фильтра (DA1.1 и DA1.2) на частоте квазирезонанса не зависит от добротности и равен примерно 0,9. На ОУ DA2 собран масштабный усилитель с тем, чтобы скомпенсировать затухание, вносимое ФНЧ R11C7 и самого фильтра. R10 минимизирует возникающую в DA2 вторую гармонику. С6 и С7 служат для снижения шумов и высших гармоник (без С7  $K_{ни} = 0,00038\%$ , а без С6 и С7  $K_{ни} = 0,0008\%$ , кроме того, появляются шумы).

**Пользование фильтром** простое. Резистором R1 устанавливается напряжение на его движке 1 В (если в генераторе есть регулируемый выход, то R1 и R2 заменяются на один резистор 10...15 кОм). Частота генератора устанавливается 1 кГц, а резистором R7 фильтр настраивается в «резонанс». В процессе настройки может потребоваться небольшая коррекция R5. Для этого в схему впаивают подстроечный резистор (вместо R5) и добиваются самовозбуждения системы. Затем находится такое его положение, когда система находится на пороге генерации, при этом коэффициент передачи фильтра должен быть около 0,9. Измеряют полученное сопротивление и заменяют на постоянный ближайшего номинала. Требования к конденсаторам С1 и С7 те же, что и к С5 (**рис.2**).

**Простой генератор**, который мож-



но использовать совместно с фильтром, показан на **рис.4**. В нем для стабилизации амплитуды использована миниатюрная лампочка накаливания с сопротивлением нити в холодном состоянии 20 Ом. Настройка сводится к получению выходного напряжения 1В (при этом его  $K_{ни} = 0,0044\%$ ). Частота настройки может изменяться в небольших пределах резистором R1. Недостаток генератора - «дрожание» амплитуды после механического воздействия (легкий удар). Благодаря своей простоте и компактности такой генератор можно выполнить совместно с фильтром, предусмотрев переключатель входа фильтра для работы от внешнего генератора. Питание фильтра также осуществляется от отдельного БП. Совместное использование генератора и ИНИ позволяет измерить искажения, возникающие в ОУ. При этом испытываемый ОУ через панельку устанавливается на макетную плату, на которой собран какой-либо узел (повторитель, усилитель, инвертирующий усилитель) и оцениваются искажения, возникающие в нем. Можно проверить эффективность различных схем умощнения ОУ, всяких «примочек» на выходе ОУ для повышения его линейности, влияние сопротивления нагрузки на линейность усилителя. При этом могут быть получены парадоксальные результаты (например ОУ 140УД12, которым звуковики обычно пренебрегают, оказался очень даже неплохим). При проверке двоянных ОУ можно выявить «аномальную» микросхему (при этом в одном из каналов резко увеличены искажения, и это в непаянной микросхеме!). Может также оказаться, что, вопреки всеобщему мнению, инвертирующий усилитель дает большие искажения, чем не инвертирующий. Все, конечно, зависит от конкретной схемы и от конкретного экземпляра ОУ.

## ЛИТЕРАТУРА

Лукин Е. «Генераторы синусоидального напряжения со сверхнизким коэффициентом гармоник». // *Радиолюбитель-1999-№5*, стр. 40-43.



Кассетные магнитофоны Nakamichi по праву считаются одними из самых аудиофильских. Несмотря на значительный интерес к их «внутренностям», нам до последнего времени не удавалось найти ничего схемотехнического - фирма схемы к инструкциям пользователя не прилагает, да и все попытки найти хоть что-либо в ИНТЕРНЕТе успехом не увенчались. Но вот один из наших американских читателей прислал нам из дальних архивов схему двухголовочного Nakamichi BX-1 - одного из «младших» (\$299 для Nak-ов это почти даром), правда в практически нечитаемом виде. И только благодаря длительному и трудоемкому реставрационному труду, выполненному Константином Бобровым из Екатеринбург (которому мы выражаем искреннюю признательность), схему удалось в значительной степени восстановить.

Как видно из схемы каналов записи-воспроизведения (с. 43), в магнитофоне необычно много регулировочных элементов: регулирует практически всё, причем отдельно для правого и левого каналов. Именно тщательная регулировка наряду с высоким качеством магнитных головок обеспечивает неподражаемое звучание.

Вот кратко «по пунктам» фирменная методика регулировки. Подав в режиме записи на линейный вход (Line Input) синусоиду 400 Гц, регулятором уровня (Volume PCB) установить в контрольных точках TP101/TP201 напряжение 90 мВ (контроль внешним вольтметром), а резисторами VR108/VR208 выставить коэффициент усиления усилителей индикатора уровня (Q105Q106/Q205Q206 - правая верхняя часть схемы; ключи Q107,Q207 обеспечивают динамическую передачу напряжений обоих каналов по одному проводу), чтобы индикатор уровня (он выполнен на ИМС TA7612AP и линейке из 2x10 светодиодов; вместе с микроконтроллером управления режимами работы, сервоприводам и БП в целях экономии опущены) показывал 0 dB. Увеличить частоту до 19 кГц и сердечниками фильтров-пробок на входах ИМС Dolby (IC101, IC201) L104/L204 добиться ее подавления на выходах не менее, чем на 30 дБ.

Вопроизводя измерительную ленту 15 кГц, отрегулировать азимут универсальной головки по максимуму выхода обоих каналов. При воспроизведении ровневой изм. ленты (400 Гц) резисторами VR101/VR201 установить в TP101/TP201 напряжение 90 мВ. Подбирая С107/С207 на выходе предварительного УВ (Q101Q102/Q201Q202) в диапазоне от 0 до 220 пФ, добиться неравномерности по измерительной ленте АЧХ на частотах 10 кГц не более ±2 дБ, 15 кГц -2/+3 дБ, 20 кГц -2/+4 дБ.

На дополнительном резисторе 0,1 Ом в разрыве земляного провода головки стирания проконтролировать частоту 105 кГц (корректируют сердечником трансформатора ГСП Bias Osc.) и ток стирания (145-185 мА).

Затормозив ГСП (замкнуть Б-Э Q304 в цепи питания ГСП), сердечниками L102/L202 настроить контура коррекции УЗ на частоту 21 кГц (контроль в точках TP102/TP202), после чего, восстановив генерацию ГСП, подстроечными L103/L203 Т-образных фильтров-пробок добиваются минимума проникания подмагничивания в точки TP103/TP203.

Резисторами регулировки тока подмагничивания VR105/VR205 методом пробных записей на ленту типа ZX (фирменное название Metal) частот 400 Гц и 17 кГц при уровне -20 дБ добиться равенства уровня их последующего воспроизведения. Путем пробных записей частоты 400 Гц при уровне 0 дБ резисторами VR102/VR202 (ток записи) добиться уровня их последующего воспроизведения 0 дБ. Аналогичные процедуры выполнять для лент SX (Cr) тримерами VR106/VR206, VR103/VR203 и лент EX (Fe) - VR107/VR207, VR104/VR204.