

# Гибридный усилитель напряжения на линейризированной лампе

А.КОПЫСОВ,  
д.Климушкино  
Костромской обл.

В звуковой ламповой схемотехнике крайне редко подают входной сигнал в катод лампы, обычно туда замыкают цепь ООС. В Интернете удалось найти схему преобразователя ток-напряжение (рис.1) [1], в котором интегратором на ОУ задается напряжение смещения на сетке и поддерживается нулевой потенциал на ка-

тоде, куда и подается входной ток. Применительно к усилителю напряжения (УН) подобная схема показана на рис.2. Уровень гармонических искажений (рис.3) на частоте 20 кГц при входном напряжении амплитудой 2 В соответствует таковому при включении лампы с общим катодом и резистивной нагрузкой, поэтому ника-

кого выигрыша от использования ОУ в данной схеме нет.

Но стоит убрать конденсатор обратной связи из интегратора, как схема преобразуется (рис.4), что видно в резком улучшении линейности УН при одновременном увеличении выходного напряжения (рис.5). Если интегратор поддержи-

Рис. 1

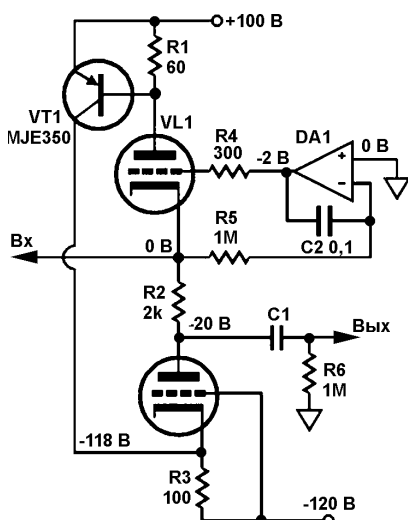


Рис. 2

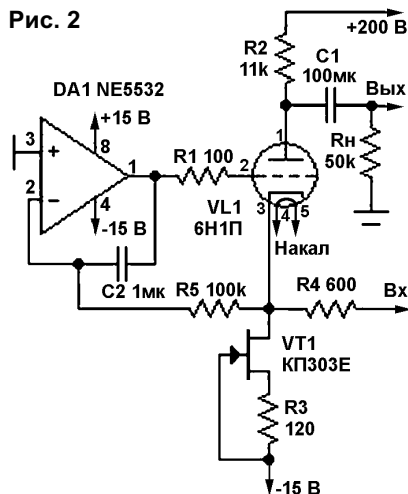


Рис. 3

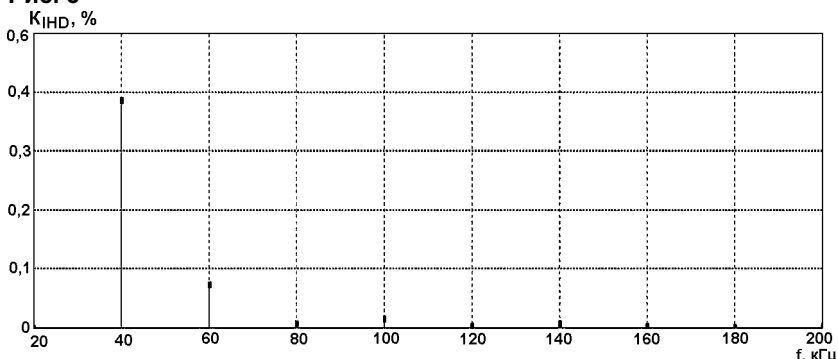


Рис. 4

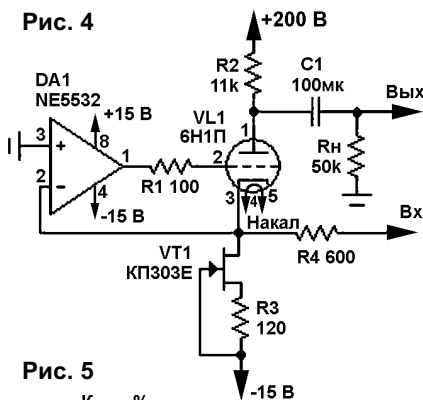
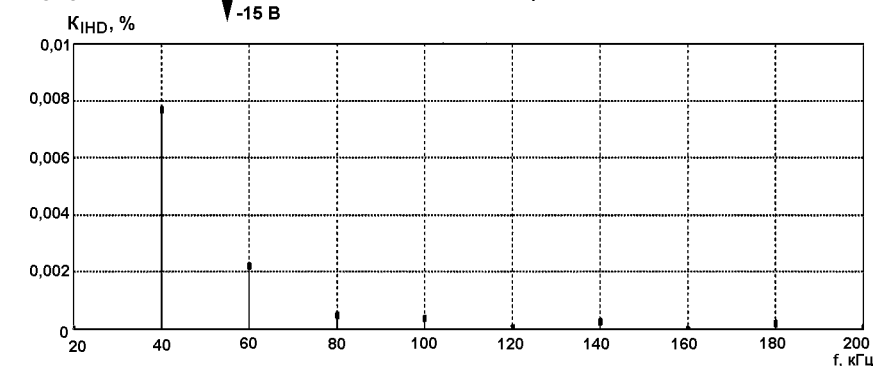
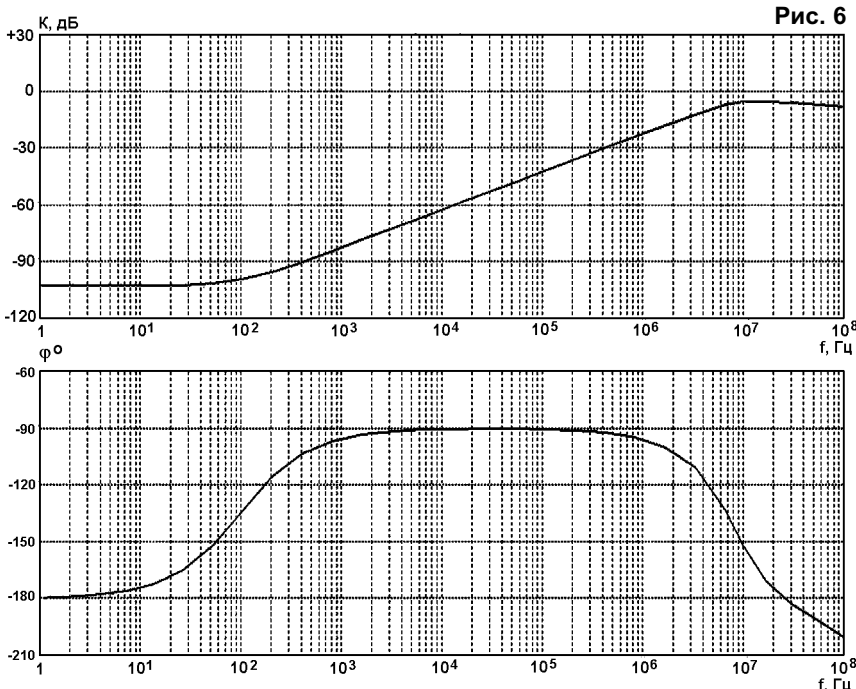


Рис. 5



вает нулевой потенциал катода с периодичностью, соответствующей постоянной времени интегрирования (обычно составляет единицы герц), то в отсутствие конденсатора ОУ контролирует ноль во всей своей полосе рабочих частот. А так как компенсирующее воздействие на потенциал катода осуществляется через сетку, то одновременно со стабилизацией нуля происходит линейризация лампы.

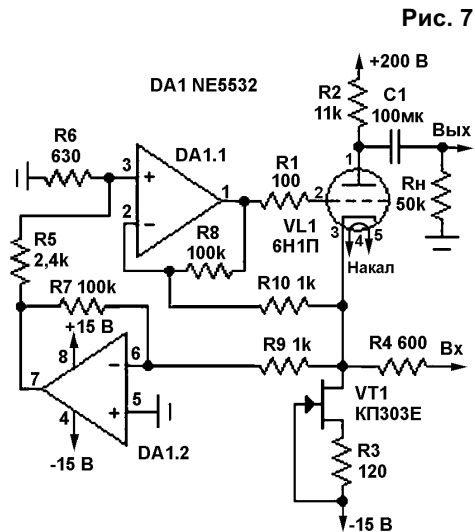
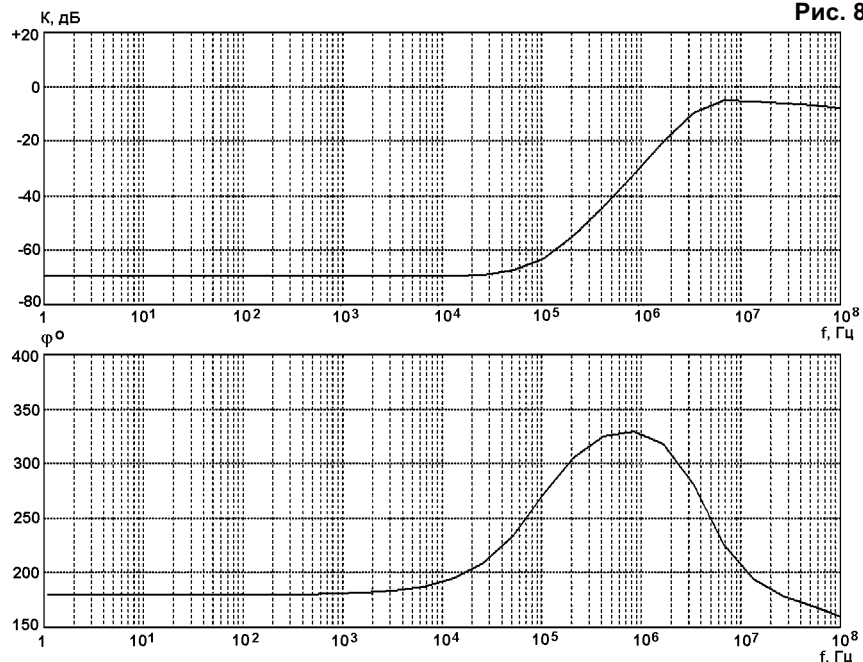


Чем точнее поддерживается ноль на катоде, тем точнее происходит преобразование входного напряжения в ток на резисторе R4 и дальнейшее транслирование его линейризованной лампой в анод, где на нагрузочном резисторе R2 происходит обратное преобразование тока в выходное напряжение. Усиление каскада определяется отношением анодного сопротивления и сопротивления нагрузки R2 и Rн, включенных параллельно (R2||Rн), к входному сопротивлению R4:

$$K_u = \frac{R2||R_n}{R4}$$

Причем это отношение не должно превышать коэффициента усиления лампы. Некоторым недостатком данной схемы является зависимость искажений от частоты, что обусловлено спадом усиления ОУ с ростом частоты. Это видно на АЧХ сигнала в катоде (рис.6), где максимальная точность поддержания нуля наблюдается до частоты первого полюса ОУ NE5532 (около 100 Гц), а дальше происходит монотонный рост сигнала ошибки в катоде.

Возрастание искажений с частотой приводит к тому, что при горизонтальной АЧХ на выходе УН при прослушивании создается впечатление некоторого подъема высоких частот (ВЧ) и спада низких (НЧ). Но это не мешает мне использовать такой УН в ВЧ-канале (выше 4 кГц) двухполос-



ного УМЗЧ. А для исключения этого недостатка необходимо стабилизировать усиление ОУ NE5532 в диапазоне звуковых частот, что возможно в инвертирующем усилителе с ООС при K<sub>у</sub>=100. Чтобы сохранить высокое усиление, можно использовать современные быстродействующие ОУ, например, AD825 с частотой первого полюса около 10 кГц или использовать два ОУ, включенных каскадом для увеличения усиления, как это сделано в схеме на рис.7.

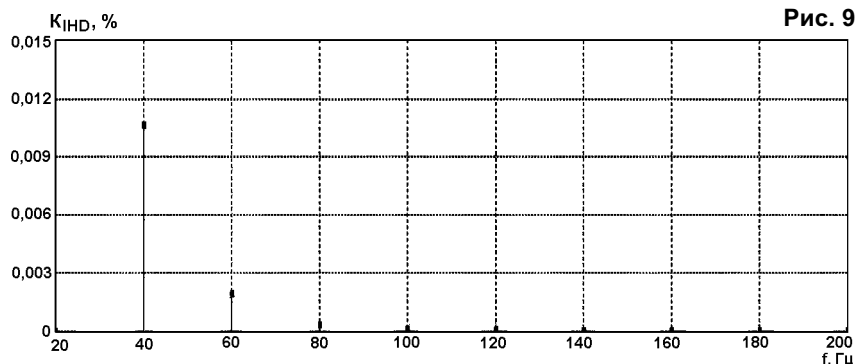


Рис. 9

По АЧХ сигнала на катоде (рис.8) видно, что глубина подавления ошибки одинакова во всем звуковом диапазоне и составляет -70 дБ. Это подтверждается и равенством искажений выходного сигнала на частотах 20 Гц и 20 кГц (рис.9 и 10).

Еще одним "бонусом" приведенной схемы УН является воплощение мечты многих разработчиков звуковых усилителей: *иметь регулятор искажений, существенно не меняющий уровень выходного сигнала*. Это позволяет прослушать усилитель при разных уровнях искажений и выбрать наилучшее звучание или оперативно регулировать искажения под различные жанры музыки или по настроению. Для этого достаточно в УН (рис.7) резистор R8 заменить на подстроечный или переменный. Какие при этом происходят изменения выходного напряжения и коэффициента второй гармоники, видно из табл.1.

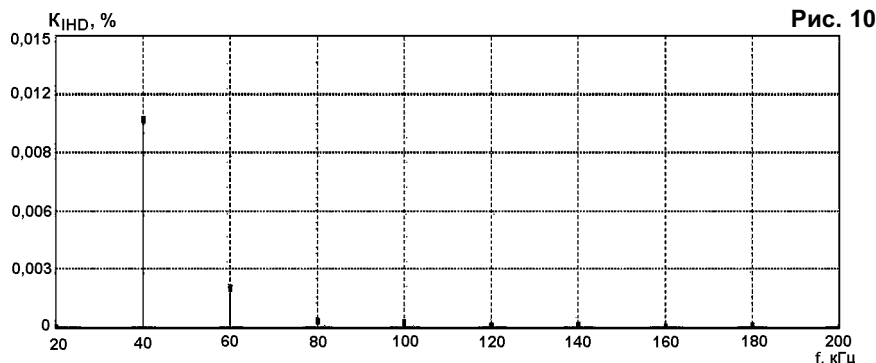


Рис. 10

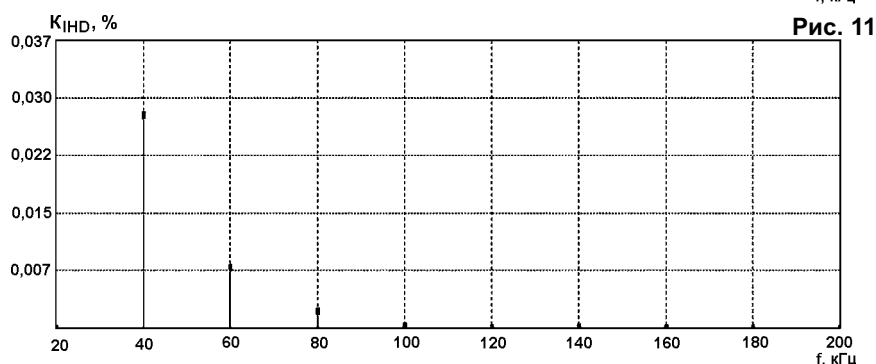


Рис. 11

Таким образом, с помощью одного переменного резистора можно получить изменение уровня искажений от обычных "ламповых" (примерно 0,4%) до почти транзисторных (0,01%). При этом в спектре искажений во всем диапазоне не наблюдается более 3-4 гармоник.

В обычном ламповом каскаде с общим катодом возникает ограничение по амплитуде входного сигнала, которое определяется напряжением смещения сетки. При превышении этого напряжения возникают сеточные токи, приводящие к значительному росту искажений.

В предлагаемой схеме УН таких ограничений нет. На вход можно подать сигнал амплитудой 4 В и получить на выходе синусоиду с размахом 120 В. При этом рост искажений (рис.11) почти пропорционален увеличению амплитуды. Компенсирующее напряжение на сетке близко к входному (рис.12), положительная полуволна его явно выше потенциала катода, которому соответствует нулевой уровень, но, в то же время, сеточный ток очень незначительный. По падению напряжения (рис.13) на сеточном ре-

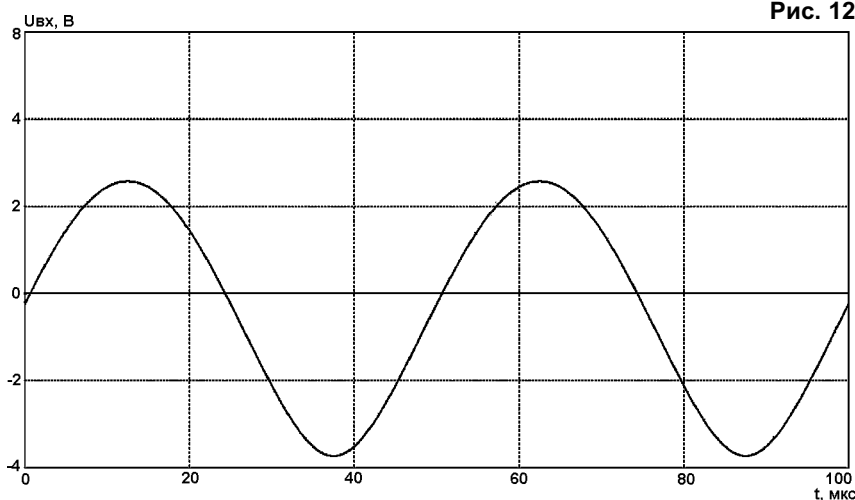
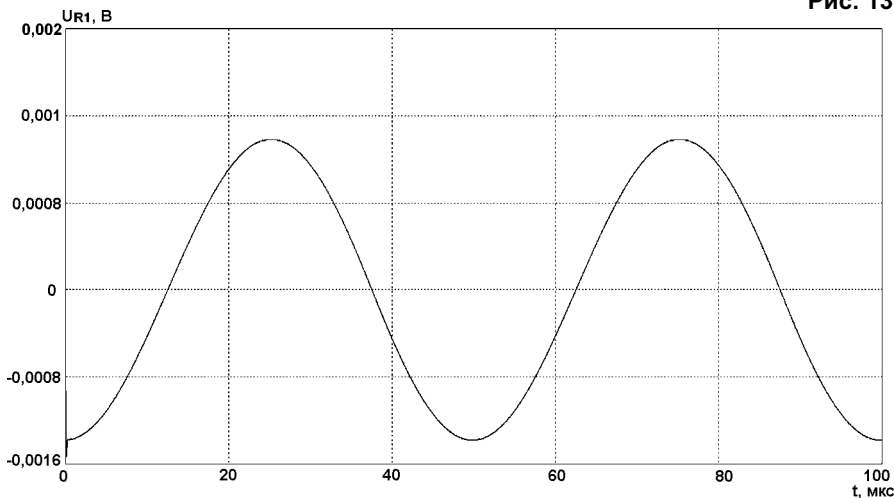


Рис. 12

Табл. 1

R8, кОм	0	1	2	4	10	20	50	100
U <sub>Вых1</sub> , В	20	24	25	27	28	29	30	30
K <sub>r2</sub> , %	0,4	0,31	0,25	0,17	0,088	0,048	0,02	0,011

Рис. 13



зисторе R1 (рис.7) сопротивлением 100 Ом можно рассчитать амплитуду сеточного тока, которая не превышает 12 мкА и расходует, в основном, на перезаряд входной емкости.

Таким образом, используя на входе предусилитель с усилением всего в 2-3 раза, можно получить на выходе лампы амплитуду сигнала, до-

статочную для раскачки любых выходных каскадов.

Печатная плата для УН не разрабатывалась. Он смонтирован на макетной плате. Схема оказалась очень устойчивой, не критичной к монтажу и не требующей специальной наладки и подбора компонентов. Задается только начальный ток лампы (6...8 мА

в зависимости от ее типа) подбором R3 в истоке полевого транзистора VT1 (можно установить "подстроечник" сопротивлением 470 Ом). В качестве VT1 я использовал КП303Е.

Входной сигнал в УН может подаваться непосредственно с буфера источника сигнала, если он способен обеспечить сигнальный ток лампы (в таком включении лампа по току не усиливает) и не имеет постоянной составляющей. В моем усилителе на входе стоит дополнительный буфер на ОУ NE5532, но он может быть заменен на любой другой с малыми искажениями. В качестве выходного каскада я использую усилитель тока из [2, рис.2].

Звучание УН сравнивалось с каскадом с общим катодом (с резистором в аноде), а также с SRPP на лампе 6Н1П и с тем же выходным УТ. Гибридный УН показал наилучшее звучание с хорошей макро- и микродинамикой, очень чистое и "прозрачное". Замена лампы на 6Н8С и 6Н23П хорошо заметна на слух, что говорит о том, что значительное снижение искажений происходит без изменения спектрального состава гармоник.

**(Окончание следует)**

# Гибридный усилитель напряжения на линейаризированной лампе

А.КОПЫСОВ,  
д.Климушино  
Костромской обл.

(Окончание. Начало в №1/14)

Хорошие результаты по линейаризации лампы, полученные в ре-

зультате экспериментов, захотелось попробовать и на транзисторах. При включении биполярного транзистора 2SC3515 в схему с одним ОУ (рис.14) полу-

чены относительно малые искажения на частоте 20 кГц (рис.15). Но добавление второго ОУ никак не повлияло на линейность транзистора. Проблема оказалась в том,

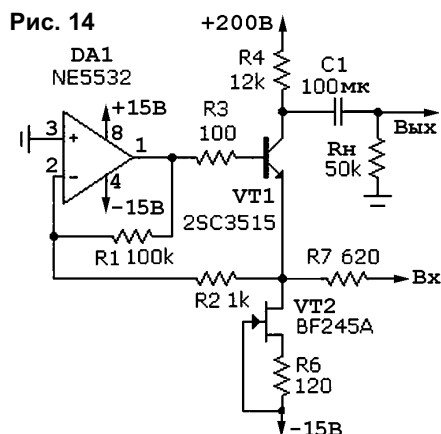
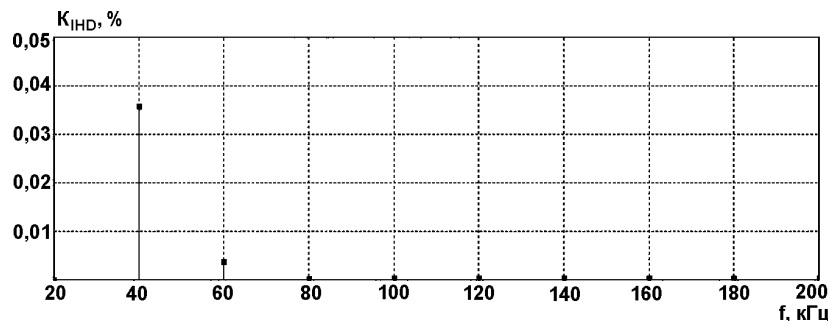


Рис. 15



что линейризация тока эмиттера не приводит к автоматической линейризации тока коллектора из-за наличия тока базы.

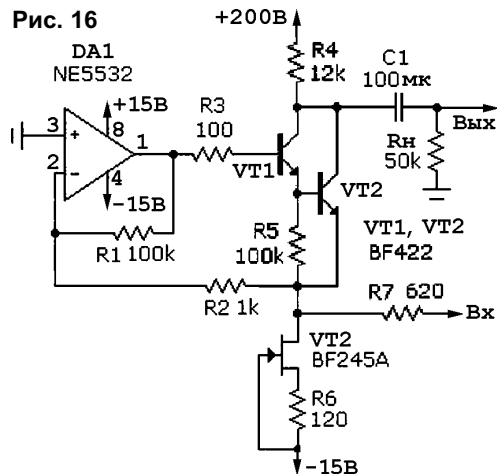
Если из линейного тока эмиттера вычесть нелинейный ток базы, то в результате получится, что ток коллектора всегда будет нелинейным. Для улучшения ситуации (понятно, ток базы устранить нельзя) необходимо этот ток базы передать в коллектор. Проще всего это сделать с помощью дополнительного маломощного транзистора, способного обеспечить ток базы, если его включить по схеме Дарлингтона (рис.16). Вот теперь искажения снизились до уровня лампового УН (рис.17), причем даже с одним ОУ.

Сравнительное прослушивание транзисторного и лампового УН показало, что “звучание транзистора” КТ940А наиболее близко к лампе 6Н23П, но еще более “звонкое”. Как известно, “окрашивание” звука происходит на малоуровневых сигналах, поэтому я проверил, как лампа и транзистор воспроизводят такие входные сигналы на частоте 20 кГц. Результаты сведены в табл.2.

Напомню, что все замеры искажений проведены во время первого периода синусоидального сигнала, т.е. с учетом переходных процессов, которые возникают в УН при воспроизведении каждой ноты в реальной музыке. Если те же замеры провести по типовой методике Micro Cap, т.е. во время пятого периода синуса, то такой разницы в результатах уже не будет. Более того, параметры транзистора окажутся лучшими, что не соответствует слуховому восприятию.

Из табл.2 видно, как лампа “переигрывает” транзистор на малых сигналах. Наименее “окрашенный” звук получен с лампой 6Н8С, что лишний раз подтверждает общепризнанное мнение о ней, как о самом линейном “советском” триоде. Кстати, и замена транзистора КТ940А на 2SC3502 также изменя-

Рис. 16



ет качество звука, делая его “ярче”.

Полевые транзисторы по своим свойствам ближе к лампам, они так-

емкостями. Даже включение на входе биполярного транзистора BF422 по схеме Дарлингтона не всегда помогает. Лучшие результаты в этом варианте получены с n-канальным полевым транзистором вертикальной структуры типа BSP130 (рис.18). Искажения схемы на частоте 20 кГц приведены на рис.19. Суммарный коэффициент гармоник для малоуровневых сигналов на этой частоте представлен в табл.3.

Рискну предположить, что не менее хорошие результаты могут получиться и с транзистором BSP129, который запирается, как и лампа, отрицательным отно-

Рис. 17

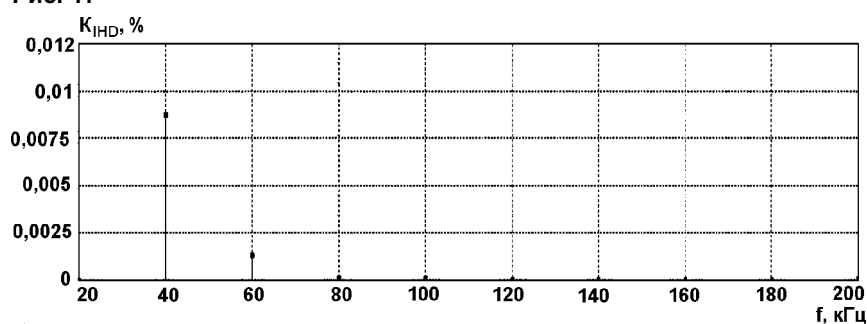


Табл. 2

U <sub>Вых</sub> , В	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2,0
K <sub>ГД</sub> , % (2SC3515)	0,75	0,225	0,075	0,022	0,0075	0,0025
K <sub>ГД</sub> , % (6Н1П)	0,0009	0,0007	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008

же управляются напряжением, а не током, и вроде бы должны хорошо проявить себя на месте лампы в УН. На симуляторе я опробовал много полевых транзисторов (IRF510, IRF610, IRF710, IRF830, 2SK384, 2SK375, 2SK1530, BUZ41, BSP126, BSP130 и др.). К сожалению, почти все эти транзисторы в УН ведут себя совсем не так как лампы, что, видимо, связано с их большими входными и проходными

Рис. 18

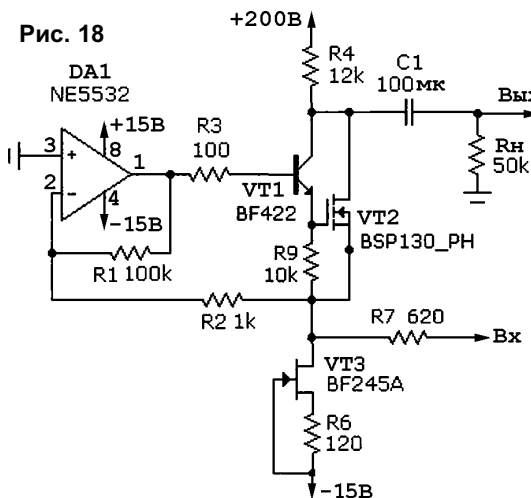


Рис. 19

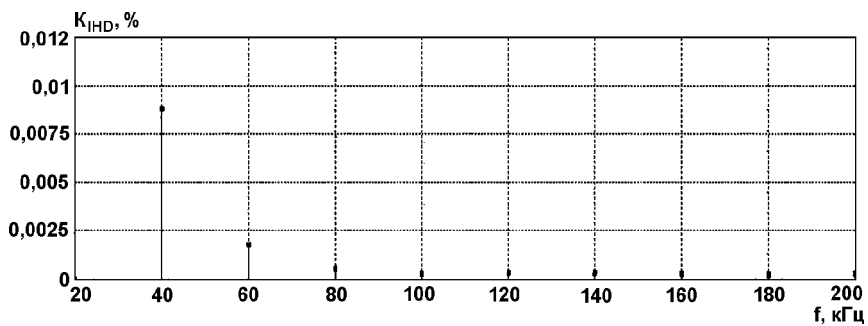


Табл. 3

$U_{\text{Вых}}, \text{В}$	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2,0
$K_r, \%$	0,0012	0,0010	0,0013	0,0014	0,0015	0,0015

сительно истока напряжением, но, к сожалению, у меня нет ни его, ни даже модели в симуляторе.

Вот такая, на мой взгляд, интересная история получилась из одной маленькой идеи: что будет, если удалить конденсатор из интегратора?

#### Источники информации

1. [www.tubecad.com/2010/06/blog0188.htm](http://www.tubecad.com/2010/06/blog0188.htm)

2. А.Копысов. Селектор искажений для компенсации нелинейности УМЗЧ. — Радиомир, 2012, №3, С.7.