

Неискажающие усилители звуковой частоты без обратной связи

Геннадий Прищепов, г. Таганрог

Методом Акулиничева исследованы искажения сигналов, возникающие в усилителях по причине нелинейности вольтамперных характеристик (ВАХ) радиоламп или транзисторов. Показано, что искажения компенсируются, если вольтамперные характеристики ламп или транзисторов подобны ВАХ нагрузок каскадов. Найдены условия, при которых выполняется компенсация искажений, перекомпенсация или недокомпенсация. Таким образом, появляется возможность влиять на форму усиливаемых сигналов всего диапазона частот.

Неискажающие усилители, или иначе усилители с линейной амплитудной характеристикой в широком диапазоне частот, необходимы для измерительной техники, аналого-цифровых преобразователей, High-End аппаратуры. В работе рассмотрен метод компенсации искажений сигналов, пригодный как для ламповых, так и для транзисторных усилителей.

Почему искажает транзисторный усилитель? Как уничтожить искажения?

На рис. 1 показаны транзисторные каскады без цепей смещения. В первом варианте (рис. 1a) коллекторная нагрузка каскада - резистор R_K . Во втором варианте (рис. 1б) нагрузка R_K

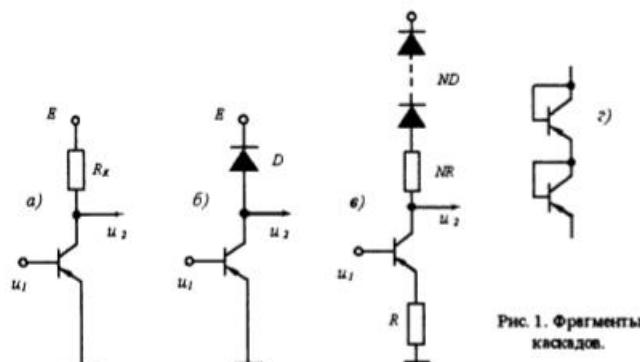


Рис. 1. Фрагменты каскадов.

заменена полупроводниковым диодом D. Функции, описывающие вольтамперные характеристики (ВАХ) перехода БЭ и диода-нагрузки, одинаковы, обе эти функции - экспоненты типа e^{bu} . Картина усиления сигнала представлена на рис. 2. Здесь обозначены: 1 - испытательный входной сигнал u_1 - пилообразное напряжение; 2 - вольтамперная характеристика перехода БЭ при $\alpha = I_K / I_3 = 1$; 3 - линия нагрузки, вольтамперная характеристика (ВАХ) диода-нагрузки, она растянута по горизонтальной оси; 4 - выходное напряжение u_2 , полученное методом проекций (отмечена последовательность проекций: 1-2-3-4); 5 - семейство выходных ВАХ транзистора.

Видно, как транзисторный каскад с резистивной нагрузкой R_K искажает входной сигнал: монотонно растущее напряжение $u_1(t)$ превращено в экспоненциальную «пилу», отмеченную *. При этом говорят, что система «транзистор + R_K », если это усилитель звуковых частот, не имеет звукового равновесия и «всегда будет звучать плохо» [1]. Здесь термин «звуковое равновесие» означает точное соответствие форм входного и выходного сигналов. Рисунки 1б, 1в, 1г и рис. 2 (его график 3) показывают, как можно ком-

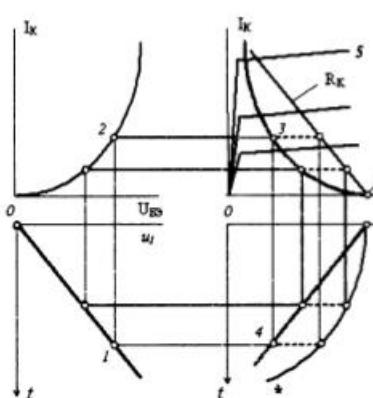


Рис. 2. Компенсация нелинейных искажений.

пенсировать искажения: надо изменить ВАХ резистора R_K , сделать её подобной ВАХ перехода БЭ транзистора, т.е. вместо R_K применить диод D. Но вначале о модном, общепринятом приёме борьбы с искажениями.

Приём № 1 уменьшения искажений - отрицательная обратная связь. Для уменьшения искажений Гарольд Блэк в 1927 году применяет в усилителе автоматическое регулирование - следящую отрицательную обратную связь (ООС) - рис. 3, [2]. Теперь усилитель усиливает не всё входное напряжение $U_{\text{вх}}$,

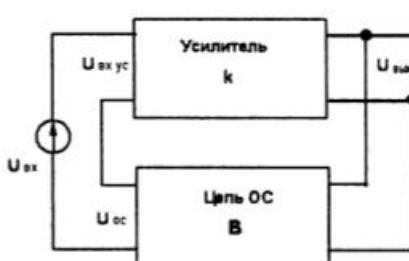


Рис. 3. Усилитель с ООС.

а лишь его малую часть ($U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}}$), и это напряжение проецируется на малый отрезок ВАХ транзистора. Для создания ООС часть выходного напряжения в противофазе передаётся на вход через цепь ОС с

коэффициентом передачи «B». Искажений становится тем меньше, чем больше петлевое усиление kB в системе [«усилитель = k и «цепь ОС = B»]. При этом коэффициент $\eta = (1 + kB)$ показывает, во сколько раз снижаются искажения, улучшается стабильность коэффициента усиления и т. д. [3]. Но вопрос о необходимости восстановления усиления, подавленного ООС, как второе условие метода ООС, просто не обсуждается.

Приём № 2. Неискажающие усилители с компенсацией искажений без ООС. В 1927 году, конечно, была известна формула усиления напряжения для каскада $K = S \cdot R_K$. Здесь S - крутизна вольтамперной характеристики триода в выбранной рабочей точке [mA/B]; R_K - коллекторная (анодная) нагрузка усилителя. Однако, понятие «дифференциальное сопротивление эмиттера (катода) $r_3 = 1/S$ » ещё не стало популярным. В современные варианты формулы «K» введём $Z(i)$ - вольтамперные характеристики элементов и получим:

$$K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = S \cdot R_K; K = R_K/r_3; K = Z_K(i)/Z_3(i); \text{ если } Z_K(i) = N Z_3(i), \text{ то } K = N \quad (1)$$

Здесь N - количество элементов в коллекторной нагрузке.

Теперь выявляется принцип компенсации нелинейных искажений без следящей ООС и без потерь усиления: искажения исчезают, компенсируются, если вольтамперная характеристика нагрузки $Z_K(i)$ подобна $Z_3(i)$ управляющей цепи БЭ.



Рис. 4. TND-усилитель

Особо отметим, что усиление равно целому числу N , если $Z_k(i) = N Z_3(i)$. Такой усилитель линеен, стабилен, не зависит от дестабилизирующих факторов, теплового гистерезиса и прочих возмущающих причин.

В результате появляются схемы неискажающих усилителей без ООС, о которых не мог и помыслить Блэк, поскольку в 1927 году ещё не было ни двойных триодов типа 6Н1П, ни микросхем типа 2ТС613 (четыре одинаковых транзистора в общем корпусе). Покажем, что физика процессов в таких устройствах никак не связана с передачей энергии с выхода на вход и выражение «неискажающие усилители без ООС» соответствует истинному положению дел.

Неискажающий TND-усилитель без ООС, состоящий из одинаковых транзисторов [4], показан на **рис.4**. Приведенный рисунок - копия с монитора программы MICROCAP (MC). Здесь элемент $Z_3(i)$ - последовательная цепь, состоящая из «диода БЭ» и $R = 100 \Omega$. Элемент $Z_k(i)$ представлен тремя такими же элементами. Усиление напряжения $K = N = 3$. В качестве тест-сигнала использовано пилообразное напряжение. Искажения сигнала оцениваются по методу Акулиничева [5]. Это прямой метод индикации искажений в любые моменты времени, на любой частоте, при любой амплитуде. Метод пригоден и для одиночных сигналов. Как известно, спектры конечных сигналов имеют бесконечное количество гармоник, и понятие «стандартный коэффициент гармоник, коэффициент нелинейных искажений» для них теряет смысл.

На **рис.4** пилообразное напряжение обеспечивает генератор V_2 . При натурных измерениях с помощью двухлучевого осциллографа сравнивают сигнал $U_{\text{вых}}$, ослабленный в k раз делителем напряжения, с сигналом $U_{\text{вх}}$, сдвинутым на 180° фазовращателем [5, 4]. Для программы MC достаточно записать эти процедуры в меню Transient-analysis.

Результаты испытаний показаны на **рис.5а, б, в**. Напряжение КЭ установлено 8,17 В, что на 20 мВ меньше потенциала узла 1. Это сделано для того, чтобы раздвинуть график « $U_{\text{вых}}$ » от графика « $-3U_{\text{вх}}$ » и убедиться в точном воспроизведении входного сигнала. Отметим, что искажения уничтожаются, компенсируются как при $RE = 100$, $RK = 300 \Omega$, либо при $RE = 1 \Omega$, $RK = 3 \text{ к}\Omega$ и т.п., так и при $RE = RK = 0 \Omega$. Каскад, состоящий из одного транзистора (T) и N штук диодов (ND) логично назвать «TND-усилителем» [4].

На **рис.5** показана возможность изменения формы сигнала. Выпуклая форма выходного сигнала получена при добавлении в эмиттер транзистора сопротивления $RE = 300 \Omega$. Вогнутая форма - при $RK = 10 \Omega$. Таким образом, возможны варианты: компенсация искажений сигнала (а); перекомпен-

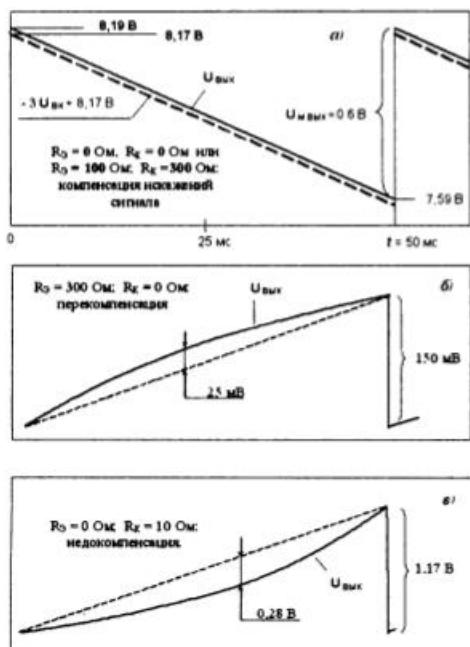


Рис. 5. Исследование TND-усилителя.

сация (б); недокомпенсация (в). Можно получить любые деформации сигналов, в том числе добиться т.н. «звукового равновесия» при воспроизведении аудио-сигналов или выполнить межкаскадную компенсацию искажений и т.д.

Неискажающий усилитель с динамической анодной нагрузкой без ООС состоит из одинаковых триодов [6, 7] - **рис.6**. В катодах триодов включены одинаковые резисторы: $R_1 = R_2 = R$. Вольтамперные характеристики триодов (с учетом R) тоже одинаковы (рис.7). Приращения токов, напряжений для последовательной цепи рис.6: $\Delta I_{k1} = \Delta I_{k2} = \Delta I$; $\Delta U_{ck1} = \Delta U_{ck2} = \Delta I R$.

Но приращение напряжения сетка-катод второй лампы (ΔU_{ck2}) не может изменить ток лампы 2, поскольку ток I_{k2} задан триодом 1. В такой ситуации ΔU_{ck2} может только изменять внутреннее сопротивление анод-катод (R_{ak}) триода 2. Сопротивление R_{ak} лампы отображает треугольник ОАВ при $U_{ck} = -1$ В. Если изменять U_{ck2} от -1 до -3 В при фиксированном токе, то R_{ak} рас-

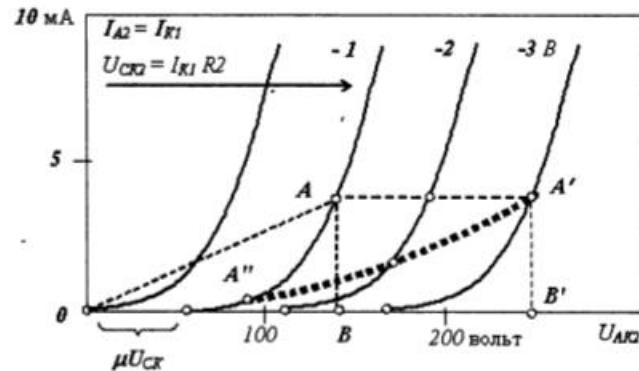


Рис. 6. Каскад с динамической анодной нагрузкой

тёт линейно - треугольник ОА'В'. В семействе выходных вольтамперных характеристик графики $[I_A = \phi(U_{ak})]$ при $U_{ck} = \text{const}$] **рис.7** разнесены на интервалы (μU_{ck}). Конструктивный коэффициент лампы μ зависит от расстояний сетка-анод и сетка-катод: $\mu = d_{ak}/d_{ck}$ [8]. При работе каскада **рис.6** $\Delta U_{\text{вх}}$ создает ΔI_{k1} в соответствии с проходной ВАХ лампы 1. Далее возникает $\Delta U_{ck2} = R_2 \Delta I_{k1}$, которое пытается запереть лампу 2. В результате линия AA' искривляется до A'A'' - **рис.7**. Пунктирная кривая A'A'', связывающая I_{A2} с напряжением U_{ck2} , теперь приобретает вид, подобный проходной ВАХ лампы 1, причём кривая (A'A'') растянута вдоль оси U_{ak} в μ раз относительно проходной ВАХ лампы 1. И форма сигнала, искаженного участком «сетка 1 - земля», исправляется далее лампой 2. Усиление напряжения в μ раз ($K = \mu$) оправдывает одно из названий описанного каскада «мю-усилитель».

Каскады с динамической анодной нагрузкой были предложены С. В. Свечниковым в начале 60-х годов прошлого века с целью получения высокого входного сопротивления широкополосных усилителей [6], затем подробно исследованы Я. Т. Загорским в 70-х годах [9]. Но искажениям сигналов в этих работах не уделялось внимания. Поэтому в 90-х годах каскад был «открыт» заново, он стал «неискажающим SRPP-усилителем Аллана Киммела» [7].

Каскад с динамической нагрузкой на биполярном транзисторе (рис.8) используется режим усиления класса А. Источник V_2 (2,5 В) задает эмиттеру 1 ток величиной 3,7 мА. Потенциал базы 2 приходится фиксировать делителем $R_3 = R_4 = 20 \text{ к}\Omega$. Приращение напряжения ($\Delta I_{k1} \cdot R_2$) передаётся на зажимы 52-Э2 через конденсатор $C_1 = 10 \text{ мкФ}$. При этом низкочастотная частота среза АЧХ усилителя равна 27 Гц, коэффициент усиления напряжения 25 дБ. Чтобы измерить вы-

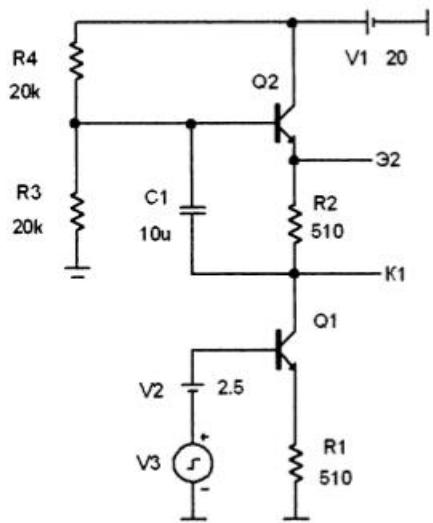


Рис. 8. Биполярный транзистор-нагрузка.

ходное сопротивление каскада при съёме напряжения с Э2, надо подключить генератор V3 к Э2 через емкость C2 = 10 мкФ, V2 - заземлить. В строке «Y Expression» программы МС следует указать: $v(4)/(i(C2))$. В этом примере узел 4 есть Э2. Для схемы рис.8 выходные сопротивления со стороны Э2 равно 250 Ом, а К1 - 9,7 кОм.

Каскад, имеющий динамическую нагрузку в виде полевого транзистора с

управляющим рп-переходом, показан на рис.9. Это усилитель класса А: ток истока транзистора 1 равен 2,1 мА. Внешняя нагрузка ($R_3 = 10 \text{ к}\Omega$) подключена к источникам питания V_1, V_2 . Так обеспечено равномерное распределение напряжений исток-сток между транзисторами. Каскад имеет усиление напряжения 25 дБ, не требует конденсаторов, является усилителем постоянного тока. Однако, его выходное сопротивление по истоку 2 высокое - 28 кОм, а по стоку 1 оно ещё больше, - 60 кОм.

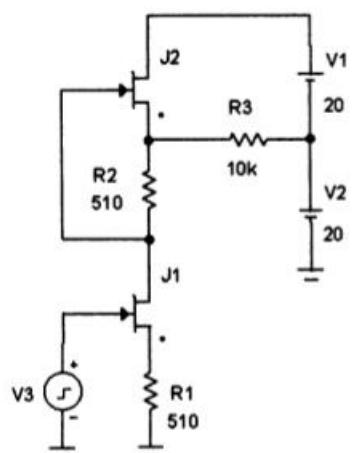


Рис. 9. Полевой транзистор-нагрузка.

Неискажающий усилитель на радиолампе с индуктивной нагрузкой. Принцип компенсации искажений сигналов остаётся прежним: если известна ВАХ нагрузки, то для компенсации искажений следует выбрать усилительный элемент с проходной вольтамперной характеристикой, подобной ВАХ нагрузки. Если усилитель собран на электронной лампе и анодной нагрузкой служит обмотка трансформатора, её индуктивность L_A (рис. 10), то вольтамперная характеристика такой нагрузки определяется кривой намагничивания электротехнической стали [10], рис. 11а. С другой стороны, графики ВАХ электронных ламп (рис. 11б) зависят от вариации шага сетки-спи-

рали, намотанной вдоль длины стержня-катода. Классический пример на эту тему представляет нам варимю-пентод 6K4, разработанный для радиоприемников с автоматической регулировкой усиления [8, с.232]. Разработчики High-End усилителей случайно или в порядке «ноу-хау» пользуются принципом компенсации искажений [1]. Они подбирают такой тип элект-

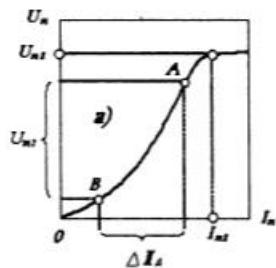
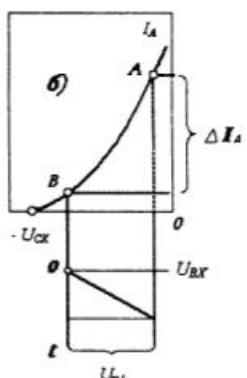


Рис. 11. Условие компенсации искажений.



ронной лампы, чтобы её ВАХ соответствовала нагрузочной характеристике анодного трансформатора. Так они достигают звукового равновесия при воспроизведении аудио-сигналов.

Этот процесс показан на рис. 11. Кривая намагничивания стали (рис. 11а) построена в системе координат: амплитуда U_m переменного напряжения частоты f и амплитуда I_m переменного тока. В справочниках часто применяют другие координаты: амплитуда магнитной индукции $B_m = U/4,44nSf$ и напряженность поля $H = nI/l$. Здесь U, I - эффективные (среднеквадратичные) значения переменного напряжения и тока, измеренные для катушки индуктивности; n, S, l - число витков, сечение и длина средней линии катушки. Пересчет выполняется по формулам $U_m = 1,41U$; $I_m = 1,41I$. Задача конструктора неискажающего усилителя - согласовать величины токов, напряжений рисунков 11а, 11б. Так, если мы желаем получить амплитуду выходного сигнала U_{m2} за счет приращения тока катушки, перемещения точки В на уровень А (рис. 11а), то приращение тока анода должно быть равно ΔI_A . В соответствии с ВАХ лампы (рис. 11б), найденный ΔI_A должна обеспечить амплитуду входного сигнала U_{m1} . Математические функции для участков АВ на рисунках 11а и 11б должны соответствовать друг другу. Кроме того, U_{m2} не должно превышать напряжение насыщения сердечника U_{m5} и т. д.

Следует подчеркнуть, что кривая рис. 11а изображена для одной частоты и не учитывает ширину петли гистерезиса. Понятно, что компенсацию искажений удается осуществить для небольшого участка кривой намагничивания. Поэтому обычно делают запас усиления по мощности, но не используют всю мощность усилителя.

Литература

1. Интервью с Питером Квортрупом. <http://www.Hi-Fi.Ru>.
2. Black H.S. Inventing the negative feedback amplifier. IEEE Spectrum 1977, №12.
3. Цыкин Г. С. Усилительные устройства. М.: Связь, 1971.
4. Прищепов Г.Ф. Линейные широкополосные TND-усилители и повторители. Схемотехника № 9 2006, с. 25–28.
5. Акулиничев И. Т. Приставка к осциллографу для оценки качества усилителей. Радио, 1980. №4, с. 40
6. Свечников С. В. Основы технической электроники. Часть II. Усилительные и генераторные цепи. Киев: ГИТЛ УССР, 1963, с. 290, 319.
7. Торопкин М. В. Ламповый Hi-Fi усилитель своими руками. СПб: Наука и техника, 2006.
8. Власов В. Ф. Электронные и ионные приборы. М.: 1960.
9. Загорский Я. Т. и др. Измерительные усилители на транзисторах. М., Энергия, 1971.
10. Электротехнический справочник. Том 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы.
11. Амелина М. А. Описание MC8. В пакете <http://guapsoft.spb.ru/mc8/setup.exe>

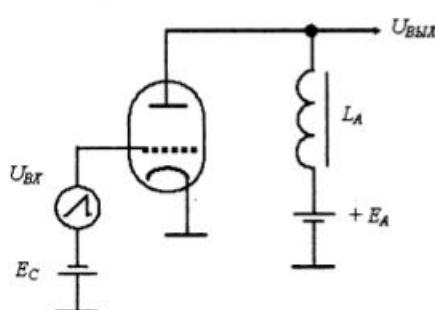


Рис. 10. Ламповый усилитель с катушкой индуктивности.