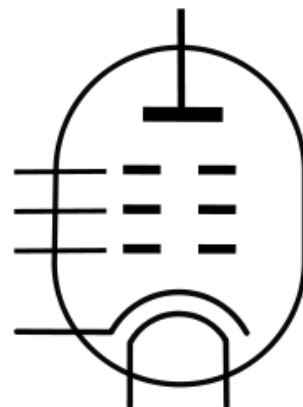


# Пентод

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

**Пенто́д** (от др.-греч. πέντε *пять*, по числу электродов) — вакуумная электронная лампа с экранирующей сеткой, в которой между экранирующей сеткой и анодом размещена третья (защитная или антидинатронная) сетка, подавляющая динатронный эффект. Как правило, в лампах прямого накала третья сетка соединяется со средней точкой катода, в лампах косвенного накала — с любой точкой катода<sup>[1][note 1]</sup>. В большинстве пентодов третья сетка и катод соединены внутри баллона, поэтому у них всего четыре сигнальных вывода. В исторической литературе пентодами в строгом смысле именовались именно такие, четырёхвыводные лампы, а пентоды с отдельным выводом третьей сетки именовались «трёхсеточными лампами»<sup>[2]</sup>. По конструкции и назначению пентоды делятся на четыре основных типа: маломощные усилители высоких частот, выходные пентоды для видеоусилителей, выходные пентоды усилителей низких частот, и мощные генераторные пентоды<sup>[3]</sup>.

Экранированные лампы, — тетрод и пентод, — ввиду меньшей проходной емкости превосходят триод на высоких частотах. Верхняя рабочая частота пентодного усилителя может достигать 1 ГГц<sup>[3][note 2]</sup>. Пентод выгодно отличается от тетрода отсутствием ниспадающего участка вольт-амперной характеристики, устойчивостью к самовозбуждению и меньшими нелинейными искажениями<sup>[4]</sup>. Пентодам свойственно высокое выходное сопротивление — в большей части рабочих анодных напряжений пентоды эквивалентны управляемым источникам тока. Коэффициент полезного действия усилителя мощности на пентодах (около 35 %<sup>[5]</sup>) существенно выше, чем у усилителя на триодах (15—25 %<sup>[5]</sup>)<sup>[note 3]</sup>, но несколько ниже, чем у усилителя на лучевых тетродах<sup>[note 4]</sup>.



Условное графическое обозначение пентода косвенного накала. Сверху вниз:

- анод,
- антидинатронная сетка,
- экранирующая сетка,
- управляющая сетка,
- катод и
- подогреватель (два вывода).



влияла на первичный поток электронов от катода к аноду, но эффективно блокировала ток вторичных электронов от анода к экранирующей сетке. Раунд пришёл к той же идее в том же 1926 году, но первенство уже принадлежало Теллегену, а патент на изобретение — [Philips](#)<sup>[14]</sup>.

Philips лицензировал производство пентодов по всему миру и вступил в стратегическое партнёрство с [Bell Labs](#)<sup>[16]</sup>. В 1931 году серийный выпуск низкочастотных пентодов начали [RCA](#) в США и [KO Vacuum Tube](#) в Японии<sup>[17]</sup>. В 1932 году RCA выпустила первые радиочастотные пентоды тип 57 и тип 58<sup>[14]</sup>. Уже в начале 1932 в США массово публиковались любительские конструкции на пентодах<sup>[18]</sup>. ЕМІ (Великобритания) не пожелала покупать патент Теллегена, считавшийся одной из самых ценных разработок [Philips](#)<sup>[19]</sup>, и взамен создала альтернативу пентоду — [лучевой тетрод](#)<sup>[20][21]</sup>. Развитие мощных ламп разделилось на две ветви — [лучевой тетрод](#) в США и Великобритании, пентод в континентальной Европе<sup>[22]</sup>.

Схожесть электрических свойств лучевых тетродов и мощных усилительных пентодов привела к смешению этих терминов в литературе. Одна и та же лампа может именоваться и лучевым тетродом, и пентодом — несмотря на принципиальные различия во внутреннем устройстве этих типов ламп<sup>[23]</sup>. Так, в справочнике Кацнельсона и Ларионова 1968 года лучевой тетрод 6П1П назван *пентодом*, при том, что на прилагаемом рисунке показываються несвойственные пентоду лучеобразующие пластины<sup>[24]</sup>. В справочнике Госэнергоиздата 1955 года 6П1П названа *лучевым тетродом*<sup>[25]</sup>. То же происходило и в англоязычной литературе: комбинированная лампа PCL82 (советский аналог — 6Ф3П)<sup>[26]</sup> в технической документации Thorn-EMІ классифицируется как «триод — лучевой тетрод», в документации [Mullard](#) как «триод — пентод»<sup>[23]</sup>.

Пик инноваций в электровакуумной технике пришёлся на 1934 год — в этом году производители выбросили на рынок максимальное количество новых разработок<sup>[8]</sup>, в том числе первые радиочастотные пентоды-жёлуди тип 954 и тип 956<sup>[27]</sup>. Наметился переход стационарной аппаратуры с напряжений накала 2.5 В и 4 В на напряжение 6.3 В<sup>[28][29]</sup>. Продолжилось и развитие многоэлектродных и комбинированных ламп — RCA вывело на рынок [гептод](#) (пентагрид), [Telefunken](#) выпустил [октод](#) и [триод-гексод](#)<sup>[28]</sup>.

В послевоенные годы пентоды развивались эволюционно. В 1950—1952 начался переход от [октальных ламп](#) к миниатюрным «пальчиковым» лампам с девятью штырьками<sup>[30][31][note 8]</sup>. В 1953 они стали стандартом НАТО, к 1958 году практически вся<sup>[note 9]</sup> номенклатура массовых приёмно-усилительных ламп была выпущена в новом конструктиве<sup>[30]</sup>, к 1960 доля [металлических ламп](#) с октальным цоколем в СССР снизилась до 20 % от общего выпуска<sup>[32]</sup>. Новые разработки оптимизировались на достижение максимального КПД, иногда в ущерб линейности (пример — [EL84](#), проигрывавший в линейности своим предшественникам)<sup>[33]</sup>.

Последнее поколение радиоламп, сверхминиатюрные [нувисторы](#), было выпущено RCA в 1960 году<sup>[34]</sup>, но не нашло массового применения за пределами ВПК. В американской нувисторной серии пентодов не было<sup>[35]</sup>, а в СССР был выпущен пентод-нувистор 6Ж54Н. Был разработан в СССР и свой, уникальный<sup>[36]</sup> класс ламп — сверхминиатюрные [стержневые лампы](#) конструкции [В. Н. Авдеева](#), в которых вместо традиционных витых сеток использовались жёсткие стержни, ориентированные вдоль катодов<sup>[37]</sup>.

## Области применения

В зависимости от выполняемых функций, пентоды широкого применения можно разделить на четыре типа, а внутри самого многочисленного типа (высокочастотные маломощные пентоды) выделить особые подтипы по функциям<sup>[3]</sup>. Каждая сфера применения ставила перед конструкторами особые приоритеты, и для их реализации каждый тип пентодов обрёл свои конструктивные особенности.



Миниатюризация пентодов. Слева направо:

\* KF4 (Германия, 1935)<sup>[11]</sup>

\* R207 (США, 1935)<sup>[12]</sup>

\* 1Т4 (США, 1939)<sup>[13]</sup>

\* 1Ж18Б (СССР, 1950-е — стержневая лампа, не имеющая аналогов на Западе)

\* Справа, для наглядности — транзистор в корпусе [ТО92](#).

N	Тип	Применение	Критерий разработки	Особенности конструкции	Примеры
1А	Маломощные высокочастотные, узкополосные пентоды	Усиление напряжения в резонансных каскадах с узкой полосой пропускания <sup>[38]</sup> , например, каскады ПЧ супергетеродинов	Минимально возможная проходная ёмкость при (желательно) высокой крутизне характеристики <sup>[38]</sup> (от 2 до 10 мА/В)	Густая экранирующая сетка. Тщательная экранировка выводов (уменьшение межэлектродных ёмкостей). Подавление краевого поля анода <sup>[39]</sup>	6Ж1П (фото), 6Ж45Б <sup>[39]</sup>
1Б	Маломощные высокочастотные, широкополосные пентоды	Усиление напряжения в низкочастотных каскадах с широкой полосой пропускания (телевидение, радиорелейная связь) <sup>[39]</sup>	Максимально высокая крутизна характеристики <sup>[40]</sup> (от 10 до 30 мА/В)	Минимально возможное расстояния от катода до первой сетки, густая навивка первой сетки (6Ж9П — шаг намотки 17 витков/мм) на рамочном каркасе, золочение первой сетки. Пониженная рабочая температура катода, особые гладкие покрытия катода <sup>[41]</sup> . Как следствие — наибольшая стоимость среди всех типов пентодов <sup>[42]</sup>	6Ж9П, 6Ж11П <sup>[42]</sup>
1В	Маломощные высокочастотные пентоды переменной кривизны (вари-мю, пентоды с удлинённой характеристикой <sup>[43]</sup> , пентоды с удалённой отсечкой <sup>[note 10]</sup> )	Схемы автоматического регулирования усиления <sup>[42]</sup>	Нелинейная крутизна анодно-сеточной характеристики (АСХ растянута в область отрицательных напряжений). Умеренные требования к полосе пропускания <sup>[42]</sup> .	Переменный шаг витков первой сетки <sup>[44]</sup> . Как следствие — повышенные нелинейные искажения <sup>[45]</sup> .	6К4П, 6К13П <sup>[44]</sup>
1Г	Маломощные пентоды с двойным управлением	Преобразователи частоты, смесители сигналов <sup>[46]</sup>	Эффективное управление током анода по третьей сетке <sup>[46]</sup>	Умеренно густая навивка третьей сетки, отдельный вывод третьей сетки <sup>[46]</sup>	6Ж46Б <sup>[47]</sup>
2	Видеочастотные пентоды	Усиление напряжения и мощности видеосигнала (от десятков Гц до нескольких МГц) при работе на активную нагрузку <sup>[48]</sup>	Максимальный размах выходного напряжения при заданном режиме питания. Высокая крутизна характеристика при относительно высоких (десятки мА) рабочих токах <sup>[48]</sup>	Аналогично широкополосным ВЧ пентодам, с поправкой на большую рассеиваемую мощность <sup>[49]</sup>	6П15П <sup>[49]</sup>
3	Выходные низкочастотные (звуковые) пентоды	Выходные каскады усилителей звуковых частот, работающие без сеточных токов <sup>[49]</sup>	Малые нелинейные искажения при большой выходной мощности, сдвиг анодно-сеточной характеристики влево, оптимизация работы при больших напряжениях на экранирующей сетке <sup>[49]</sup> .	 <p>Относительно редкие сетки-спирали низкочастотного пентода EL84 — не целенаправленное решение, а следствие разумной экономии: высокая крутизна характеристики в УНЧ не нужна<sup>[50]</sup>.</p> <p>Редкая навивка управляющей сетки, ещё менее плотная навивка второй и третьей сетки. Мощные катод, анод и несущая внутривлампная арматура<sup>[50]</sup>. Как следствие, относительно низкое выходное сопротивление и плавная, широкая зона перехода из режима возврата в режим перехвата<sup>[51]</sup>.</p>	6П33П <sup>[51]</sup> EL84 (6П14П)
4	Мощные высокочастотные	Генераторные лампы мощных	Максимальный КПД генератора	Эффективный теплоотвод, в особенности — с сеток. При работе однополосной модуляцией —	Гу-81 <sup>[52]</sup> (фото)

(генераторные) пентоды	радиопередатчиков (до нескольких сотен кВт) <sup>[52]</sup>	при стабильном тепловом режиме <sup>[52]</sup>	малые искажения сигнала <sup>[52]</sup> .
------------------------	---	--	---

## Физические свойства

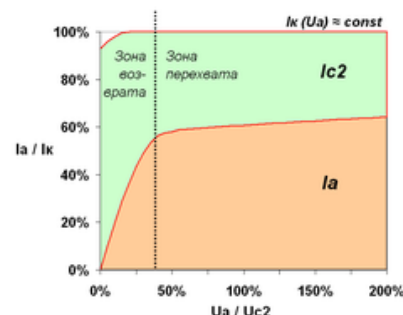
### Распределение токов

В нормальном рабочем режиме третья сетка пентода соединена с катодом, на первую (управляющую) сетку подаётся постоянное отрицательное напряжение смещения  $U_{C1}$ , на вторую (экранирующую) сетку — постоянное положительное напряжение  $U_{C2}$ , равное или меньшее напряжению питания каскада. У электронов, эмитированных катодом (ток катода  $I_K$ ), в этом режиме есть только два пути — с катода на экранирующую сетку (ток экрана  $I_{C2}$ ), и с катода на анод (ток анода  $I_a$ ). Ток катода практически *не зависит от анодного напряжения*  $U_a$ : он определяется только напряжениями на управляющей и экранирующей сетках<sup>[53]</sup>. Предельно упрощённая формула тока катода сводится к ВАХ эквивалентного диода по закону Чайлда-Ленгмюира<sup>[note 11]</sup>:

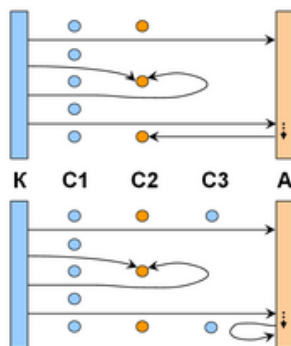
$$I_K \sim (U_{C1} + D U_{C2})^{3/2} [54],$$

где  $D$  — относительная проницаемость (мера эффективности управления по первой сетке).

Реальные пентоды могут иметь более острую зависимость  $I_K$  от управляющих напряжений (степень более  $3/2$ )<sup>[54]</sup> и небольшой завал в области особо малых  $U_a$ . На практике большее значение имеет распределение тока катода между экраном и анодом (доля катодного тока, достигающая анода) при постоянном  $U_{C2}$ . График этого распределения имеет два примерно линейных участка разной крутизны, разделённые явно наблюдаемым переломом<sup>[55]</sup>:



Нормализованное распределение токов в пентоде (вольт-амперная характеристика  $I_K = I_a + I_{C2}$ ).



В тетроде (сверху) вторичные электроны, выбитые из анода, притягиваются к экранной сетке, уменьшая ток анода. В пентоде (снизу) они возвращаются на анод.

- Режим перехвата.** При достаточно больших анодных напряжениях (не менее 10 ... 50 %  $U_{C2}$  в зависимости от типа ламп) часть электронов, эмитированных катодом (обычно  $1/5$  —  $1/6$  от  $I_K$ <sup>[56]</sup>), перехватывается экранирующей сеткой «на лету», формируя ток экрана  $I_{C2}$ <sup>[55]</sup>. Не перехваченные экраном электроны продолжают движение к аноду и формируют его ток  $I_a$ <sup>[55]</sup>. Доля анодного тока в токе катода и коэффициент распределения  $I_a/I_{C2}$  (обычно равный 4...5<sup>[57]</sup>) медленно растут по мере роста отношения  $U_a/U_{C2}$ <sup>[55]</sup>. Важно именно соотношение двух напряжений, а не их абсолютные значения<sup>[55]</sup>. Например, в триодном включении пентода  $U_a$  точно равно  $U_{C2}$ , поэтому соотношение  $I_a/I_{C2}$  постоянно практически во всей рабочей области. При фиксированном  $U_{C2}$  зависимость  $I_a$  от  $U_a$  близка к линейной, что эквивалентно практически постоянному, и при этом весьма высокому внутреннему сопротивлению. Чем слабее зависимость токораспределения от  $U_a/U_{C2}$ , тем выше внутреннее сопротивление. Крутизна управления по первой сетке в режиме перехвата зависит от  $U_a$  очень слабо: её определяют в первую очередь  $U_{C1}$  и  $U_{C2}$  (см. формулу для  $I_K$ )<sup>[58]</sup>.
- Режим возврата.** При снижении анодного напряжения до порога в 10 ... 50 %  $U_{C2}$  часть электронов, ранее достигавших анода, оказывается не в состоянии преодолеть его тормозящее поле ( $U_a \ll U_{C2}$ !), которое отбрасывает их назад на экранирующую сетку. На анодной ВАХ возникает перелом. С дальнейшим снижением  $U_a$  ток анода резко падает, а ток экрана так же резко растёт<sup>[59]</sup>. В предельном случае, когда  $U_a$  опускается до нуля, весь ток катода замыкается на экранирующую сетку. Нелинейность и нестабильность параметров в режиме возврата запретительно велики, поэтому рабочая точка пентода выбирается так, чтобы при всех возможных мгновенных значениях  $U_a$  лампа оставалась бы в режиме перехвата.

Так же как и в тетроде, бомбардировка анода электронами с энергией более 10...15 эВ порождает вторичную эмиссию с анода<sup>[60]</sup>. В *тетроде* в режиме возврата вторичные электроны беспрепятственно движутся к экранирующей сетке, *уменьшая* ток анода. В ранних тетродах ток анода мог даже менять направление (обратный ток вторичных электронов превосходил прямой ток)<sup>[61]</sup>. В пентоде на пути от анода к экрану поставлено препятствие — третья сетка. Она не способна задержать быстрые первичные электроны, но

эффективно препятствует обратному току медленных вторичных электронов<sup>[4]</sup>. Свойственный тетродам динактронный эффект в пентодах подавлен: с ростом  $U_a$  вольт-амперные характеристики пентодов возрастают монотонно<sup>[4]</sup>.

### Частотные свойства

На низких частотах ( $f \ll F_{зр}$ ) коэффициент усиления пентода с активной анодной нагрузкой определяется крутизной лампы  $S$  и сопротивлением нагрузки  $R_H$ :

$$K = SR_H^{[62]}$$

Та же формула применима и к реактивной нагрузке. При сопоставимых величинах сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления пентода  $R_a$  в формулу следует подставлять эквивалентное сопротивление генератора  $R_{экв} = R_a R_H / (R_a + R_H)^{[63]}$

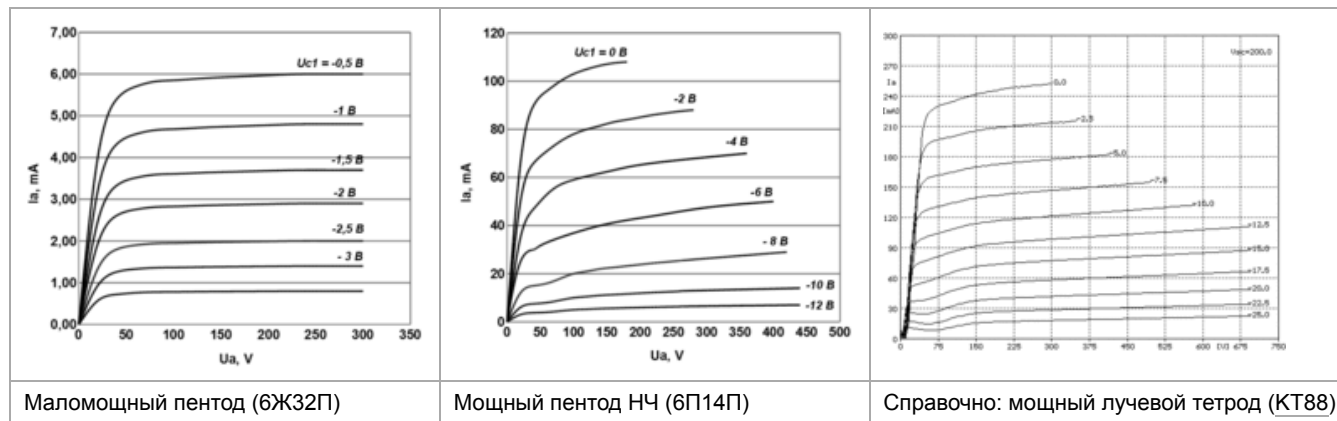
В области верхних частот пентод с активной нагрузкой<sup>[64]</sup> характеризуется показателем *коэффициента широкополосности* ( $\gamma$ ) — произведением частоты на коэффициент усиления, достижимый на этой частоте. Коэффициент широкополосности не зависит от активного сопротивления нагрузки, но убывает с ростом её ёмкости  $C_H$ :

$$\gamma = K \Delta f = S / (2\pi (C_{вых} + C_{вх} + C_H))^{[40][65]}$$

Коэффициент широкополосности массовых серий пентодов лежит в диапазоне от 50 до 200 МГц<sup>[66]</sup>. Табличные значения коэффициента указываются либо для идеального случая  $C_H=0$ , либо для некоторого стандартного  $C_H$ . Для пальчиковых ламп принимается  $C_H=5.5$  пФ, поэтому справочные значения коэффициента различаются несущественно<sup>[67]</sup>. Для октальных ламп принимается  $C_H=10$  пФ, поэтому их коэффициент широкополосности под нагрузкой примерно в полтора раза ниже «безнагрузочного» коэффициента<sup>[68][69]</sup>.

В пентодных усилителях без частотной коррекции коэффициент широкополосности должен превосходить верхнюю границу усиливаемых частот в 5...10 раз, в усилителях с частотной коррекцией — в 2.5...4 раза<sup>[70]</sup>. Эта граница для самых совершенных цокольных пентодов не превышает 200 МГц<sup>[71]</sup>. Замена активной нагрузки на узкополосный резонансный контур позволяет довести верхнюю рабочую частоту пентодов-желудей (1Ж1Ж) и отдельных пальчиковых ламп (6К1П) до 500 МГц<sup>[72]</sup>. Дальнейшее повышение рабочей частоты *одиночного каскада* невозможно из-за неприемлемо высоких шумов пентодов<sup>[72]</sup>. Рабочую частоту *широкополосного каскада* можно повысить в несколько раз, распараллелив каскад усиления и нагрузив его аноды на линию бегущей волны. Такой каскад с бегущей волной (иначе, *каскад распределённого усиления*) на  $n$  ламп имеет граничную частоту, в  $n$  раз превосходящую граничную частоту одиночного пентода<sup>[73]</sup>. (в пределе до 1 ГГц). Число ламп в каскаде на практике было ограничено шестью-восемью<sup>[74]</sup>. Ламповые каскады бегущей волны были дороги, требовали точной настройки, и потому были полностью вытеснены твердотельными усилителями СВЧ.

### Вольт-амперные характеристики



Анодные вольт-амперные характеристики (ВАХ) маломощных пентодов близки к идеальным: резкий переход из режима возврата в режим перехвата происходит при относительно низких  $U_a$ ; плоские «полки» ВАХ свидетельствуют о высоком выходном сопротивлении (6Ж32П — 2.5 МОм в номинальном режиме<sup>[75]</sup>). Это позволяет строить на пентодах почти совершенные дифференциальные каскады<sup>[76]</sup> и активные нагрузки

(стабильные источники тока)<sup>[77]</sup>. В мощных пентодах выходное сопротивление относительно низкое, а переход в зону перехвата растянут. При малых анодных напряжениях и большом отрицательном смещении управляющей сетки наблюдается «тетродная» нелинейность полки ВАХ.

Качественный анализ ВАХ пентодов показывает, что

- Выходное сопротивление пентода (в том числе мощного низкочастотного) на практике можно считать бесконечно большим<sup>[20]</sup>.
- Расчётный коэффициент усиления пентода по напряжению весьма велик (до 5000<sup>[78]</sup>) — настолько, что его точное значение теряет практический смысл и редко нормируется производителем. Усиление каскада на НЧ определяется не этим коэффициентом, а произведением крутизны лампы на сопротивление нагрузки<sup>[78]</sup>.
- Мгновенные значения напряжения на аноде пентода может опускаться до значений, намного меньших, чем в триодном каскаде. Поэтому при равном напряжении питания размах напряжения на выходе пентода может быть больше, чем у триода<sup>[79]</sup>. (но меньше чем у лучевого тетрода).
- Спектр гармоник пентода содержит бо́льшую, чем в спектре триода, долю нечётных гармоник, и бо́льшую долю высших гармоник. В спектре гармоник триода доминирует вторая гармоника, а доля высших гармоник (шестой и выше) пренебрежительно мала<sup>[80]</sup>.

## Нелинейные искажения

Ухо человека терпимо к чётным гармоникам, но весьма чувствительно к призвукам нечётных гармоник, которые преобладают в спектре искажений пентода<sup>[79]</sup>. Усилители мощности НЧ на пентодах могут достигнуть приемлемого уровня *слышимых* искажений только при весьма низком *измеряемом*  $K_{НИ}$ , который достигим только при охвате усилителя глубокой *отрицательной обратной связью* (ООС)<sup>[79]</sup>. Усилители на триодах, напротив, обеспечивают приемлемое качество звучания без использования общей обратной связи. Лучевые тетроды занимают промежуточное положение: им также необходима ООС, но их спектр искажений ближе к триодному<sup>[81]</sup>.

В современных ламповых УНЧ начального уровня широко используются пентоды послевоенной разработки **EL34** и **EL84** (аналог — **6П14П**<sup>[82]</sup>). Однако в качественных музыкальных УНЧ предпочтительны довоенные триоды прямого накала, в гитарных УНЧ — довоенные же лучевые тетроды. Последнее, вероятно, — следствие исторического разделения рынка на «европейские пентоды» и «американские лучевые тетроды»<sup>[83]</sup>. Мнение о лучшей линейности ламп довоенной разработки объясняется тем, что они были оптимизированы под низкие искажения — настолько низкие, насколько позволяла технология<sup>[84]</sup>. «Усиление было дорого» (Morgan Jones), поэтому лампы и усилители тех лет проектировались так, чтобы дать приемлемый уровень искажений минимальным числом ламп *без использования обратной связи*<sup>[85]</sup>. Да и сама теория обратной связи только-только создавалась. Удешевление ламп в 1940-е годы изменило конструкторский подход: с использованием глубокой ООС линейность лампы отошла на второй план<sup>[84][33]</sup>. Поэтому, например, классический послевоенный пальчиковый пентод EL84 (6П14П) проигрывает по искажениям довоенному лучевому тетроду **6V6**<sup>[33]</sup> (аналог — **6П6С**)<sup>[26]</sup>, хотя и превосходит его по другим параметрам, в частности, крутизне характеристики, выходной мощности. Лампы *локтальной серии* 1940-х годов, за исключением триода **7AF7**<sup>[86]</sup>, весьма линейны — они имеют и «довоенную» конструкцию электродов, и все преимущества цельностеклянных ламп<sup>[87]</sup>.

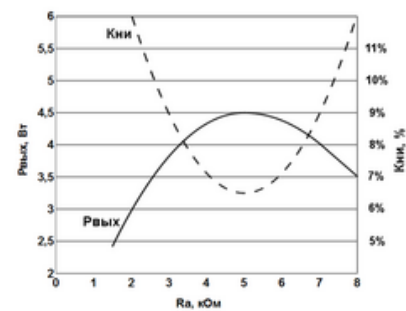
Пентоды и лучевые тетроды, предназначенные для работы в ключевом режиме, в число которых входят лампы для **ЭВМ первого поколения** (например, **6Ж22П**), лампы для узлов *строчной развёртки* телевизоров (**6ПЗ6С**), выходные лампы для радиопередатчиков (**ГУ-50**) имеют высокий уровень нелинейных искажений. При разработке этих ламп ставились иные приоритеты. В цифровой технике линейность не играла никакой роли, в производстве телевизоров линейность развёртки настраивалась на конвейере индивидуально для каждого аппарата, а в радиопередатчиках применяется выходной *колебательный контур*, подавляющий излучение на гармониках. Несовершенство производства «строчных» ламп ранних серий порождало большой разброс коэффициента нелинейных искажений, поэтому *отдельные* лампы этих серий могут быть весьма линейными. С ростом культуры производства разброс параметров уменьшился — лампы позднейших «строчных» серий имеют стабильно высокие искажения<sup>[88]</sup>.

## Требования к согласованию с нагрузкой

Из-за нелинейности характеристик и высокого выходного сопротивления мощные экранированные лампы чувствительны к выбору сопротивления нагрузки. Оптимальное сопротивление нагрузки, при котором коэффициент нелинейных искажений  $K_{НИ}$  достигает минимума, должно лежать в диапазоне от 1/10 до 1/8 внутреннего сопротивления пентода<sup>[49]</sup>. Как правило, тот же уровень соответствует максимальной выходной мощности. При неоптимальном выборе нагрузки максимальная выходная мощность резко падает, а

искажения на этой мощности — растут. На малых выходных мощностях  $K_{ни}$  также весьма высок: для EL34 в оптимальном однотактном включении он достигает 2 % уже при  $P_{вых}=1$  Вт, и далее растёт почти линейно до 10 % при  $P_{вых. макс}=8$  Вт<sup>[89]</sup>. В однотактном триодном включении та же EL34 имеет  $K_{ни}=8$  % при  $P_{вых. макс}=6$  Вт<sup>[90]</sup>. В двухтактном включении происходит взаимное вычитание чётных гармоник двух плеч схемы, поэтому максимальный  $K_{ни}$  падает до 5 %<sup>[91]</sup>, — но при этом почти все эти 5 % представляют собой неблагоприятные нечётные гармоники.

В усилителях мощности на экранированных лампах также возможны искажения на краях полосы пропускания, связанные с недостаточностью полосы пропускания выходного трансформатора. Высокое выходное сопротивление не позволяет пентоду или тетроду демпфировать неоднородности АФЧХ нагрузки, поэтому *при равной расчётной полосе пропускания* «пентодные» трансформаторы должны иметь большую индуктивность первичной обмотки, чем «триодные», и меньшую индуктивность рассеяния<sup>[92]</sup>. Как следствие, качественные трансформаторы для экранированных ламп тяжелее и дороже «триодных».



Зависимость выходной мощности и коэффициента нелинейных искажений от сопротивления нагрузки (6П14П,  $U_a=U_{c2}=250$  В,  $U_{c1}=-6$  В).

## Шумы пентодов



УНЧ Quad II (1958) — пример малошумящей конструкции на экранированных лампах. На переднем плане слева — балансный входной каскад на паре EF86<sup>[93]</sup>.

Пентоды всех типов имеют более высокий уровень внутриламповых шумов, чем сопоставимые по мощности и крутизне характеристики триоды<sup>[94]</sup>. В дополнение к «триодным» шумам, всем экранированным лампам свойственны шумы токораспределения (англ. *partition noise*), превосходящие дробовые шумы в 1.5…5 раз. Все «малошумящие» пентоды являются таковыми только в сравнении с обычными пентодами<sup>[95][96]</sup>.

Внутри типа широкополосных пентодов можно выделить круг малошумящих ламп, предназначенных для входных каскадов усилительных схем (6Ж39Г, 6Ж43П). Им свойственны высокая крутизна (до 30 мА/В в номинальном режиме) и стабильное распределения токов между анодом и экранирующей сеткой<sup>[97]</sup>.

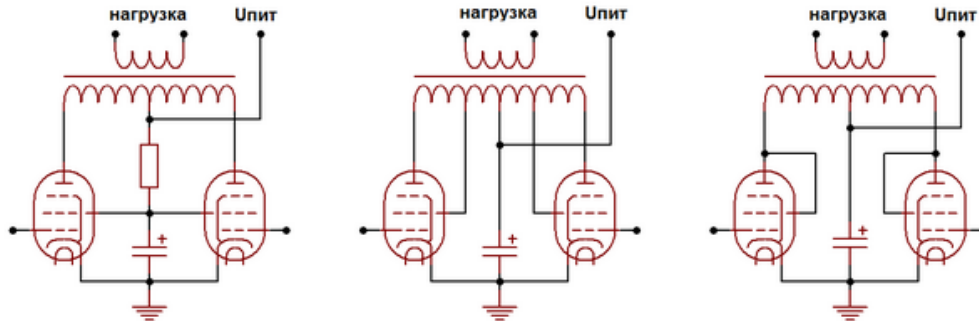
Группа малошумящих низкочастотных пентодов ограничена распространённой лампой EF86 (аналог — 6Ж32П<sup>[98]</sup>), менее известными E80F, EF804, EF806, 5879<sup>[99]</sup> и редкими немецкими лампами «почтового» семейства C3<sup>[note 12]</sup>. На низких частотах шум пентода усугубляется шумами мерцания катодного тока и помехами гудения, наводимыми подогревателем в цепь катода. Поэтому для низкочастотных малошумящих ламп главным является качество изготовления катода и подогревателя<sup>[100]</sup>, механическая жёсткость внутриламповой арматуры и общая культура сборки катодно-сеточного узла<sup>[101]</sup>. В усилителях малых сигналов минимум шумов достигается при определённом сочетании  $U_{c1}$  и  $U_{c2}$ , при номинальном или повышенном напряжении накала<sup>[97]</sup>. В усилителях мощности НЧ важны не собственные шумы ламп, а тщательная проработка конструкции. Например, УНЧ Quad II (первый каскад — пентоды EF86, второй — лучевые тетроды KT66) уступал по отношению сигнал/шум только усилителю Вильямсона с первым каскадом на триоде<sup>[93]</sup>. Классический Mullard 5-10 с той же EF86, напротив, отличается высоким шумом<sup>[102]</sup>.

## Требования к фильтрации питания

Сопротивление нагрузки усилительного каскада на пентоде  $R_H$ , как правило, во много раз меньше внутреннего сопротивления лампы  $R_a$  ( $R_H \ll R_a$ ).  $R_H$  и  $R_a$  образуют делитель напряжения, через который замыкается на землю помеха, приходящая по цепям питания. В усилителях ВЧ эта помеха не имеет значения — её эффективно блокируют разделительные межкаскадные ёмкости. В усилителях НЧ сетевая помеха свободно проходит через межкаскадные ёмкости или трансформаторы. При ёмкостной связи каскадов на вход следующего каскада передаётся большая часть напряжения помехи, падающая на нижнее плечо делителя. При трансформаторной связи следующему каскаду передаётся меньшая часть напряжения помехи, падающая на верхнее плечо делителя (на первичную обмотку трансформатора). Поэтому применение трансформаторной связи в усилителях на пентодах *смягчает* требования к фильтрации помех по цепям питания. В усилителях на триодах, наоборот,  $R_H \gg R_a$ , поэтому применение трансформаторной связи *ужесточает* требования к фильтрации<sup>[103]</sup>.

Пентоды весьма чувствительны к помехам по экранирующей сетке<sup>[104]</sup>, поэтому обычно она питается от отдельного RC-фильтра (ещё лучше — от LC-фильтра) с большой постоянной времени. Можно поступить наоборот и подать на экранирующую сетку дозированное напряжение сетевой помехи, компенсирующее влияние помех «обычных»<sup>[105]</sup>. Требуемые для этого сопротивления в цепи экрана подбираются опытным путём. Точный расчёт схемы на практике не возможен, так как производители не нормировали и не документировали характеристики управления по экранирующей сетке. Однажды скомпенсированная помеха может вернуться по мере старения ламп или при их замене<sup>[105]</sup>.

## Нестандартные включения пентодов



Обычное (пентодное), ультралинейное и триодное включение пентода в двухтактном усилителе мощности.

Цепи питания показаны упрощённо, цепи смещения не показаны.

### Триодное включение

При подключении экранирующей сетки к аноду пентод вырождается в двуханодный триод с практически постоянным распределением тока между экраном и анодом. Так как ток экранирующей сетки в триодном включении полностью проходит через нагрузку, то крутизна такого «триода» несколько выше, чем справочная крутизна пентода<sup>[57][note 13]</sup>.

Weber утверждает, что обычный пентод в триодном включении должен сравниваться не с триодом, а с *тетродом*, так как его антидинатронная сетка остаётся замкнутой на катод. По Weber, говорить о триодном включении можно только тогда, когда с анодом соединяется не только экранирующая, но и антидинатронная сетки<sup>[106]</sup>. На практике, влиянием антидинатронной сетки в триодном включении можно пренебречь. Режим работы пентода в триодном включении полностью эквивалентен «настоящим» триодам, с двумя особенностями:

- К обычным «триодным» ограничениям по напряжениям и токам добавляется ограничение на максимально допустимые  $U_{c2}$  и  $I_{c2}$ . Например, пентод 6П33П (аналог EL36<sup>[107]</sup>) допускает до 250 В на аноде, но только 200 В на экранирующей сетке<sup>[108]</sup>. Однако для большого количества ламп предельное напряжение не экранной сетке обусловлено не электрической прочностью, а иными причинами (чаще всего — подавлением динатронного эффекта, что в триодном включении не актуально). На это в частности указывает Н. Трошкин в своей статье «Триод из подручных материалов»<sup>[109]</sup>.
- В триодном включении исчезает основной компонент низкочастотного шума пентода — шум токораспределения. Поэтому уровень шума пентода в триодном включении на 6…14 дБ ниже шума той же лампы в пентодном включении<sup>[110]</sup>.

### Ультралинейное включение

В 1951 году Дэвид Хафлер и Харберт Керос предложили подключать экранирующие сетки выходных ламп усилителя НЧ<sup>[note 14]</sup> к отводам от первичной обмотки выходного трансформатора<sup>[111]</sup>. Вольт-амперные характеристики пентода в таком включении представляют нечто среднее между триодом и пентодом. Хафлер и Керос утверждали, что возможно подобрать такую точку отвода, при котором усилитель ещё сохраняет высокий КПД, близкий к тетродному, но его выходное сопротивление уже падает до значений, близких к триодному<sup>[111]</sup>. Благодаря обратной связи по экранирующей сетке, ультралинейный каскад способен совмещать лучшие свойства как триода, так и экранированной лампы<sup>[112]</sup>.

Ультралинейное включение наиболее выгодно в классе В, и применялось в основном в усилителях класса В<sup>[113]</sup>. В СССР ультралинейная схема использовалась как в двухтактных усилителях классов В и АВ (например, в радиолах «Симфония» и магнитофонах «Днепр-11», «Днепр-12»), так и в *однотактных* усилителях класса А

(радиолы «ВЭФ-Радио», «Рига-6», «Ригонды» однотактных серий и др.)<sup>[114]</sup>.

Для удачной реализации ультралинейного УНЧ необходимы качественные, широкополосные выходные трансформаторы с особо низкими индуктивностями рассеяния между *всеми* обмотками<sup>[112]</sup>. Например, в схеме Хафлера-Кероса 1951 года использовался трансформатор с полосой пропускания 10 Гц — 100 кГц при неравномерности АЧХ не более ± 1 дБ<sup>[111]</sup>.

Ультралинейный каскад также требователен к фильтрации *постоянной составляющей* напряжения на экранирующих сетках. В обычном ультралинейном каскаде на экранирующие сетки проходят все пульсации анодного напряжения (в том числе провалы напряжения при скачках выходной мощности). Кроме того, режим питания  $U_{c2}=U_a$  невыгодно ограничивает возможности повышения анодного напряжения<sup>[note 15]</sup>. Ван дер Вин предложил подключать экраны не к отводам от первичных (анодных) обмоток, а к изолированным обмоткам, подключённым к отдельному фильтру питания<sup>[115]</sup>. Данная схема, наряду с классической, нашла широкое применение в отечественной любительской усилительной технике последних лет.<sup>[116], [117], [118], [119], [120]</sup>.

## Комментарии

1. В лампах, предназначенных для работы с схемах с общей сеткой или в каскадах преобразования частоты, где катод не соединен по переменному току с общим проводом, третья сетка имеет отдельный вывод и в *штатном (паспортном) режиме* должна соединяться с общим проводом (например, 6П15П, 6Ж2П).
2. Обычные пентодные усилители с резистивной нагрузкой и ВЧ-коррекцией работоспособны на частотах до 200 МГц. В диапазоне 100 МГц — 1 ГГц применяются особые усилители с бегущей волной (Цыкин, с. 210).
3. В разных источниках называются разные цифры КПД. Одни авторы включают в знаменатель формулы КПД только мощности, непосредственно рассеиваемые на аноде лампы, другие учитывают мощности, рассеиваемые на экранирующих сетках, мощности накала и т. д. Во всех случаях КПД экранированной лампы выше КПД триода.
4. Последнее объясняется тем, что у лучевого тетрода существенно меньше потери на ток экранирующей сетки и несколько выше предельный размах анодного напряжения — см. Рейх, с. 97-99. Следует помнить, что расчётный КПД описывает режим максимальной выходной мощности, и не применим к работе в менее напряжённых режимах.
5. В том же 1913 году тридцатичетырёхлетний Либен умер, и на этом закончилась австрийская ветвь радиотехники.
6. Современная (послевоенная) трактовка вывода из закона Чайлда-Ленгмюира. Вывод формулы — см. Батушев, с. 105; толкование применительно к пентоду — см. Батушев, с. 127.
7. Отрицательный наклон ВАХ был устранён в *лучевом тетроде*, который появился только в 1932 году и фактически представлял собой эволюцию пентода, а не тетрода.
8. Семиштырьковые стеклянные лампы диаметром 19 мм появились ещё в конце 1930-х годов. Семь выводов были достаточны для «упаковки» пентода, но двойные триоды и многоэлементные лампы (гептоды и т. п.) требовали как минимум восьми выводов. Поэтому для массовой замены октальных ламп был выбран именно девятиштырьковый конструктив.
9. За исключением мощных ламп нового поколения, например, разработанной в 1949 году EL34. Эти лампы были несколько меньше своих предшественников, но всё же слишком велики для миниатюрного цоколя.
10. Устарелый термин — буквальная калька с англ. *remote cutoff pentode* — см. Рейх, с. 87-88.
11. Вывод формулы и обсуждение её применимости к реальным лампам — см. Батушев, с. 131—134.
12. С3 (*цэ-три*) — последнее поколение маломощных пентодов с низкими нелинейными искажениями, разработанное в 1960-х годах АЕГ (преемником Telefunken) по заказу Deutsche Post. Предназначены для работы в необслуживаемых усилителях дальних телефонных линий. Подробно см.: *Jac van de Walle. Information about C3g, C3m, C3o* (<http://www.jacmusic.com/nos/C3g-C3m-info.html>) (англ.). JAC Music (30 июня 2011). Дата обращения: 23 февраля 2012. Архивировано (<https://www.webcitation.org/68hATeYDF?url=http://www.jacmusic.com/nos/C3g-C3m-info.html>) 25 июня 2012 года.
13. И наоборот, крутизна пентода несколько ниже, чем крутизна *настоящего* триода, имеющего идентичный катодно-сеточный узел. Унификация катодно-сеточных узлов и анодов внутри одной серии (одного поколения) ламп разных типов была весьма распространена — ср. арматуру триода 6С3П и пентода 6Ж9П.
14. Хафлер и Керос использовали лучевые тетроды 6L6.
15. Максимально допустимое напряжение на экранирующей сетке, как правило, ниже, чем максимально допустимое напряжение анода.

## Примечания

1. [Гинкин, 1948, с. 413.](#)

2. Гинкин, 1948, с. 413: «Следует иметь в виду, что практически *пентодами* называются только те трёхсеточные лампы, у которых защитная сетка внутри самой колбы соединена с катодом. В настоящее время часто выпускаются трёхсеточные лампы, имеющие самостоятельный вывод для третьей защитной сетки. Являясь формально (по стандарту) пентодами, эти лампы могут иметь другие характеристики, поэтому их принято называть *трёхсеточными* лампами, а не пентодами».
3. Батушев, 1969, с. 149.
4. Батушев, 1969, с. 130. Говорить о полной нейтрализации динаatronного эффекта нельзя, так как он всё-таки наблюдается в области малых токов и больших смещений на первой сетке..
5. Цыкин, 1963, с. 230.
6. Okamura, 1994, p. 97.
7. Okamura, 1994, p. 100.
8. Okamura, 1994, p. 101.
9. Рейх, 1948, pp. 57,61.
10. Okamura, 1994, p. 107.
11. Датировка по radiomuseum.org ([http://www.radiomuseum.org/tubes/tube\\_kf4.html](http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_kf4.html)) Архивная копия ([https://web.archive.org/web/20111014104923/http://www.radiomuseum.org/tubes/tube\\_kf4.html](https://web.archive.org/web/20111014104923/http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_kf4.html)) от 14 октября 2011 на Wayback Machine.
12. Датировка по radiomuseum.org ([http://www.radiomuseum.org/tubes/tube\\_r207.html](http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_r207.html)) Архивная копия ([https://web.archive.org/web/20160304195011/http://www.radiomuseum.org/tubes/tube\\_r207.html](https://web.archive.org/web/20160304195011/http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_r207.html)) от 4 марта 2016 на Wayback Machine.
13. Датировка по radiomuseum.org ([http://www.radiomuseum.org/tubes/tube\\_1t4.html](http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_1t4.html)) Архивная копия ([https://web.archive.org/web/20111209180038/http://www.radiomuseum.org/tubes/tube\\_1t4.html](https://web.archive.org/web/20111209180038/http://www.radiomuseum.org/tubes/tube_1t4.html)) от 9 декабря 2011 на Wayback Machine.
14. Okamura, 1994, p. 108.
15. De Vries, Boersma, 2005, p. 37.
16. De Vries, Boersma, 2005, p. 38.
17. Okamura, 1994, p. 109.
18. Pentode amplifier without altering old sets (<https://books.google.ru/books?id=4-EDAAAAMBAJ>) Архивная копия (<https://web.archive.org/web/20180522112131/https://books.google.ru/books?id=4-EDAAAAMBAJ>) от 22 мая 2018 на Wayback Machine. Popular Mechanics, vol. 57, no. 2 (февраль 1932), с. 293. Описывается одноламповый УНЧ радиоприёмника на низкочастотном пентоде.
19. De Vries, Boersma, 2005, p. 38: «The Pentode patent was to be one of the most important patents in pre-WWII Nat. Lab. history period.»
20. Jones, 2011, p. 89.
21. Duncan, Ben. High performance audio power amplifiers (<https://books.google.ru/books?id=Ma7qKuwH-nIC>). — Oxford: Newnes, 1996. — P. 402. — 463 p. — (Electronics & Electrical Referex Engineering). — ISBN 9780750626293.
22. Hood, 2006, p. 51.
23. Jones, 2011, p. 89.
24. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 409.
25. Электровакuumные приборы. Справочник. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — С. 131. — 422 с. — 50 000 экз.
26. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 12.
27. Okamura, 1994, p. 112.
28. Okamura, 1994, pp. 110—111.
29. Рейх, 1948, с. 71: «Примерно с 1930 по 1935 основным стандартом напряжения накала катодов, как подогревных, так и прямого накала, были 4 В. Однако за последние годы этот стандарт почти целиком и повсеместно вытесняется стандартом 6.3 В для подогревных катодов и 2 В для катодов прямого накала.» Перевод издания 1944 года..
30. Grund, Eike. Radios der 50er Jahre: Restauration, Wiederinbetriebnahme und Reparatur (<https://books.google.ru/books?id=-nmAXg2UXFUC>). — Norderstedt: BoD – Books on Demand, 2004. — P. 95. — 216 p. — ISBN 9783833003578.
31. Иориш и др, 1961, с. 20—21.
32. Иориш и др, 1961, с. 49.
33. Weber, 1994, p. 96.
34. White, Glenn D.; Louie, Gary J. The Audio Dictionary (<https://books.google.ru/books?id=L38MrvScG3gC>). — Seattle: University of Washington Press, 2005. — P. 294. — 504 p. — ISBN 9780295984988.
35. RCA Nuvistor Tubes for Military and Industrial Applications (каталог) ([http://frank.pocnet.net/other/RCA/RCA\\_Nuvistor\\_Tubes.pdf](http://frank.pocnet.net/other/RCA/RCA_Nuvistor_Tubes.pdf)) . RCA (1 июня 1963). Дата обращения: 23 февраля 2012. Архивировано ([http://www.webcitation.org/68hARWS4V?url=http://frank.pocnet.net/other/RCA/RCA\\_Nuvistor\\_Tubes.pdf](http://www.webcitation.org/68hARWS4V?url=http://frank.pocnet.net/other/RCA/RCA_Nuvistor_Tubes.pdf)) 25 июня 2012 года.
36. Sousa, Joe. Russian Subminiature Tubes ([http://www.radiomuseum.org/forum/russian\\_subminiature\\_tubes.html?thread\\_id=200277](http://www.radiomuseum.org/forum/russian_subminiature_tubes.html?thread_id=200277)) (англ.) // Tube Collector. — 2009. — Vol. 11, no. 3. Архивировано ([https://web.archive.org/web/20120301163210/http://www.radiomuseum.org/forum/russian\\_subminiature\\_tubes.html?thread\\_id=200277](https://web.archive.org/web/20120301163210/http://www.radiomuseum.org/forum/russian_subminiature_tubes.html?thread_id=200277)) 1 марта 2012 года.: «Russian Subminiature Tubes are constructed entirely differently from other subminiature tubes.»
37. Батушев, 1969, с. 170—171.
38. Батушев, 1969, с. 151.
39. Батушев, 1969, с. 152.
40. Батушев, 1969, с. 153.
41. Батушев, 1969, с. 154.
42. Батушев, 1969, с. 155.
43. В терминологии ГОСТ 5461-50.
44. Батушев, 1969, с. 156.
45. Jones, 2011, p. 317.
46. Батушев, 1969, с. 164—165.
47. Батушев, 1969, с. 165.
48. Батушев, 1969, с. 157.
49. Батушев, 1969, с. 158.
50. Батушев, 1969, с. 158—159.
51. Батушев, 1969, с. 159.
52. Батушев, 1969, с. 160.
53. Батушев, 1969, с. 132.
54. Батушев, 1969, с. 133.
55. Батушев, 1969, с. 134.
56. Батушев, 1969, с. 134. При неоптимальном выборе рабочей точки доля перехваченных электронов может быть больше, а коэффициент токораспределения — меньше.
57. Батушев, 1969, с. 143.

58. Батушев, 1969, с. 144.
59. Батушев, 1969, с. 135.
60. Батушев, 1969, с. 128, 130.
61. Рейх, 1948, с. 90-91, анализирует поведение тетрода 24А разработки 1929 года. При  $U_{c2}=90$  В,  $U_{c1}=0$  В и  $U_a=20\dots70$  В ток анода принимал отрицательное значение (в пределе  $I_a=-2.5$  мА,  $I_{c2}=10.5$  мА,  $I_k=8$  мА).
62. Батушев, 1969, с. 146.
63. Цыкин, 1963, с. 117.
64. Коэффициент широкополосности применим к любому широкополосному каскаду, — наиболее распространённым его случаем и является каскад на сопротивлениях.
65. Цыкин, 1963, с. 176.
66. Цыкин, 1963, с. 177.
67. Цыкин, 1963, с. 176—177. Например, коэффициент широкополосности 6Ж9П без учёта внешней ёмкости — 175 МГц (Батушев, с. 155), а с учётом Сн — 159 МГц (Цыкин, с. 177)..
68. Цыкин, 1963, с. 177.
69. *Бонч-Бруевич, А. М.* Применение электронных ламп в экспериментальной физике. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. — С. 125. — 656 с. — 15,000 экз.
70. Цыкин, 1963, с. 178.
71. Цыкин, 1963, с. 210.
72. *Сифоров, В. И.* Радиоприёмные устройства. — М.: Военное издательство Министерства Обороны СССР, 1953. — С. 304—305. — 804 с.
73. Цыкин, 1963, с. 211—212.
74. Цыкин, 1963, с. 212.
75. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 334.
76. Jones, 2011, p. 455.
77. Jones, 2011, p. 111.
78. Hood, 2006, p. 50.
79. Jones, 2011, p. 90.
80. Jones, 2011, pp. 90—91.
81. Hood, 2006, pp. 64—65, 98, 115.
82. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 422.
83. Hood, 2006, p. 51, 106.
84. Jones, 2011, p. 197.
85. Jones, 2011, p. 197, отмечает, что низкий уровень искажений был наиболее критичен не в усилителях звука, а в усилителях частотно-уплотнённых телефонных линий. В этих усилителях неприемлемы были не сами искажения, а проникновение гармоник из одного частотного канала в другой..
86. Jones, 2011, pp. 205—206.
87. Jones, 2011, p. 328.
88. Jones, 2011, p. 198.
89. EL34. 25-W-Endpentode (справочный листок) (<http://www.drtube.com/datasheets/el34-telefunken1955.pdf>) . Telefunken (1955). Дата обращения: 23 февраля 2012. Архивировано (<https://www.webcitation.org/68hASJz3F?url=http://www.drtube.com/datasheets/el34-telefunken1955.pdf>) 25 июня 2012 года., с.2, рис. 5.
90. EL34. 25-W-Endpentode (справочный листок) (<http://www.drtube.com/datasheets/el34-telefunken1955.pdf>) . Telefunken (1955). Дата обращения: 23 февраля 2012. Архивировано (<https://www.webcitation.org/68hASJz3F?url=http://www.drtube.com/datasheets/el34-telefunken1955.pdf>) 25 июня 2012 года., с.4, рис. 12.
91. EL34. 25-W-Endpentode (справочный листок) (<http://www.drtube.com/datasheets/el34-telefunken1955.pdf>) . Telefunken (1955). Дата обращения: 23 февраля 2012. Архивировано (<https://www.webcitation.org/68hASJz3F?url=http://www.drtube.com/datasheets/el34-telefunken1955.pdf>) 25 июня 2012 года., с.3, рис.9, 10, 11.
92. Hood, 2006, p. 67.
93. Jones, 2011, pp. 478—479.
94. Батушев, 1969, с. 198: «основной способ уменьшения шумового сопротивления триода — это повышение его крутизны».
95. Батушев, 1969, с. 198—199.
96. Jones, 2011, pp. 93—94.
97. Батушев, 1969, с. 199.
98. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 333. Полный список советских ламп — аналогов зарубежных разработок см. там же, с. 10-12.
99. EF86/6267 low-noise pentode family and 5879 comparison (<http://oldtube.com/EF86-5879.htm>) (англ.). oldtube.com (11 марта 2008). Дата обращения: 23 февраля 2012. Архивировано (<https://www.webcitation.org/68hAT1ZMg?url=http://oldtube.com/EF86-5879.htm>) 25 июня 2012 года.
100. Батушев, 1969, с. 200.
101. Батушев, 1969, с. 200: «Если подогреватель уложен внутри катода неравномерно, то неравномерна и электрическая проводимость в зазоре подогреватель-катод, а это непосредственно порождает шум гудения»..
102. Jones, 2011, p. 472: «The input stage is the EF86 pentode which is responsible for the high sensitivity but poor noise performance of these amplifiers».
103. Broskie, John. *Lowering the Single Ended Amplifier's Output Noise* (<http://www.tubecad.com/april99/page2.html>) *Архивная копия* (<https://web.archive.org/web/20120109100013/http://www.tubecad.com/april99/page2.html>) от 9 января 2012 на Wayback Machine. Tube CAD Journal, vol. 1 no. 2 (April 1999), p. 2; vol. 1. no. 3 (May 1999), p. 3.
104. Jones, с. 479.
105. Jones, 2011, p. 394.
106. Weber, 1994, pp. 227—228.
107. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 447.
108. Кацнельсон и Ларионов, 1968, с. 449.
109. *Никита Трошкин.* Триод из подручных материалов // Class A. — 1997. — Октябрь.
110. Jones, 2011, p. 94.
111. *Hafler, D. and Keroes, H.* An Ultra-Linear Amplifier (<http://www.aikenamps.com/UL.pdf>) (англ.) // Audio Engineering. — 1951. — No. 11. — P. 15—17. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20120127093343/http://www.aikenamps.com/UL.pdf>) 27 января 2012 года.
112. Цыкин, 1963, p. 272—273.
113. Цыкин, 1963, p. 273.

114. *Рехвиашвили, Ю. Г., Бачинский, А. А.* Радиоприёмники, радиолы, магнитофоны, радиогаммофоны. — М.: «Связь», 1967. — С. 37, 43, 138-142, 148, 275-276. — 330 с. — 70 000 экз.
115. *Van der Veen, Menno.* Modern high-end valve amplifiers based on toroidal output transformers (<http://books.google.ru/books?id=n7fXk2bWadwC>). — Elektor International Media, 1999. — P. 96—98, fig. 8.6. — 250 p. — ISBN 9780905705637.
116. *Савченко Андрей.* Пара слов о 6-пэ-тройке (<https://obiratel-sxem.ru/para-slov/>) (рус.). *Схемы на все случаи жизни.* Савченко Андрей (апрель 2016). Дата обращения: 28 июля 2020. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20200727232006/https://sobiratel-sxem.ru/para-slov/>) 27 июля 2020 года.
117. Ламповые УНЧ на трансформаторах ТАН (<http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan3.html>). www.radiostation.ru. Дата обращения: 6 апреля 2016. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20160525083859/http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan3.html>) 25 мая 2016 года.
118. Ламповые УНЧ на трансформаторах ТАН (<http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan2a.html>). www.radiostation.ru. Дата обращения: 6 апреля 2016. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20160525063823/http://radiostation.ru/home/usilitel-tan2a.html>) 25 мая 2016 года.
119. Ламповые УНЧ на трансформаторах ТАН (<http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan2.html>). www.radiostation.ru. Дата обращения: 6 апреля 2016. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20160303092818/http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan2.html>) 3 марта 2016 года.
120. Ламповые УНЧ на трансформаторах ТАН (<http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan4.html>). www.radiostation.ru. Дата обращения: 6 апреля 2016. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20160330081557/http://www.radiostation.ru/home/usilitel-tan4.html>) 30 марта 2016 года.

## Литература

### на русском языке

- *Батушев, В. А.* Электронные приборы. — М.: Высшая школа, 1969. — 608 с. — 90,000 экз.
- *Гинкин, Г. Г.* Справочник по радиотехнике. — 4-е изд. — Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 816 с. — 100,000 экз.
- *Иориш, А. Е., Кацман, Я. А., Птицын, С. В.* Основы технологии производства электровакуумных приборов. — М. - Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 516 с. — 14,000 экз.
- *Кацнельсон, Б. В., Ларионов, А. С.* Отечественные приёмно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги. — М.: Энергия, 1968. — 544 с. — 60,000 экз.
- *Рейх, Г. Дж.* Теория и применение электронных приборов. — Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 940 с. — 7,000 экз.
  - перевод с *Reich, Herbert J.* Theory and applications of electron tubes (<https://books.google.ru/books?id=likhAААМАААJ>). — 2-nd ed. — McGraw-Hill Book Company, inc, 1944. — 716 с.
- *Цыкин, Г. С.* Электронные усилители. — 2-е изд. — М.: Связьиздат, 1963. — 512 с. — 21,000 экз.

### на английском языке

- *De Vries, Marc; Boersma, Kees.* 80 years of research at the Philips Natuurkundig Laboratorium (1914-1994): the role of the Nat.Lab. at Philips (<https://books.google.ru/books?id=VIZBPZuMqwwC>). — Amsterdam University Press, 2005. — 325 p. — ISBN 9789085550518.
- *Hood, J. L.* Valve and Transistor Audio Amplifiers ([https://books.google.ru/books?id=mcUiQCBXh\\_YC](https://books.google.ru/books?id=mcUiQCBXh_YC)). — Oxford: Newnes / Elsevier, 2006. — 250 p. — ISBN 9780080520414.
- *Jones, Morgan.* Valve Amplifiers ([https://books.google.ru/books?id=Z1bSQ8YE\\_K8C](https://books.google.ru/books?id=Z1bSQ8YE_K8C)). — 4th ed. — Oxford: Newnes / Elsevier, 2011. — 700 p. — ISBN 9780080966410.
- *Sōgo Okamura.* History of electron tubes (<https://books.google.ru/books?id=VHFyngmO95YC>). — Tokyo: Ohmsha Ltd. / IOS Press, 1994. — 233 p. — ISBN 9789051991451.
- *Weber, Gerald.* A Desktop Reference of Hip Vintage Guitar Amps (<https://books.google.ru/books?id=fvUVBP3wW1gC>). — Kempner, Texas: Kendrick Books / Hal Leonard Corporation, 1994. — 512 p. — ISBN 9780964106000.

Источник — <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Пентод&oldid=133679961>

Эта страница в последний раз была отредактирована 19 октября 2023 в 02:31.

Текст доступен по лицензии Creative Commons «С указанием авторства — С сохранением условий» (CC BY-SA); в отдельных случаях могут действовать дополнительные условия.

Wikipedia® — зарегистрированный товарный знак некоммерческой организации Фонд Викимедиа (Wikimedia Foundation, Inc.)