

3.29. Полупроводниковые приемники неизменяющегося тока для дифференциальной пары

Дифференциальной паре необходимы приемники неизменяющегося тока, но хороший приемник неизменяющегося тока на пентоде является неэкономным по энергопотреблению. Более того, дифференциальной паре с сетками, имеющими нулевой потенциал относительно земли, потребовался бы дополнительный источник отрицательного смещения для приемника неизменяющегося тока — 100 В. Это зачастую нежелательное, поэтому желателен поиск других решений.

В отличие от первых разработчиков, использующих исключительно электронные лампы, современные разработчики находятся в более выгодном положении так как есть возможность использовать транзисторы, и даже операционные усилители, если в этом возникает необходимость. Рассматриваемый случай как раз является наглядным примером, где транзисторы могут быть очень полезны.

Простейшая форма приемника неизменяющегося тока на транзисторе (см. левую схему на рис. 3.43) очень похожа на аналогичный каскад на лампе триоде. Красный светодиод устанавливает неизменяемый потенциал $\approx 1,7$ В на базе транзистора. Напряжение между базой и эмиттером транзистора V_{03} равно $\approx 0,7$ В, таким образом, на резисторе в цепи эмиттера падает 1 В. Если нужен приемник неизменяющегося тока на 5 мА, следует использовать резистор-датчик на 200 Ом. Эквивалентное сопротивление по переменному току в коллекторной цепи будет равно:

$$r_{\text{вых}} = R_3 + \frac{1}{hfe} + \frac{1}{hoe}.$$

При используемом в этом примере транзисторе типа BC549 ($hfe \approx 400$, $1/hoe \approx 12$ кОм) расчет дает $r_{\text{вых}} \approx 92$ кОм. Заметим, что для подачи смещения на светодиод требуется дорогостоящий резистор с допустимой мощностью рассеяния 2 Вт требуется.

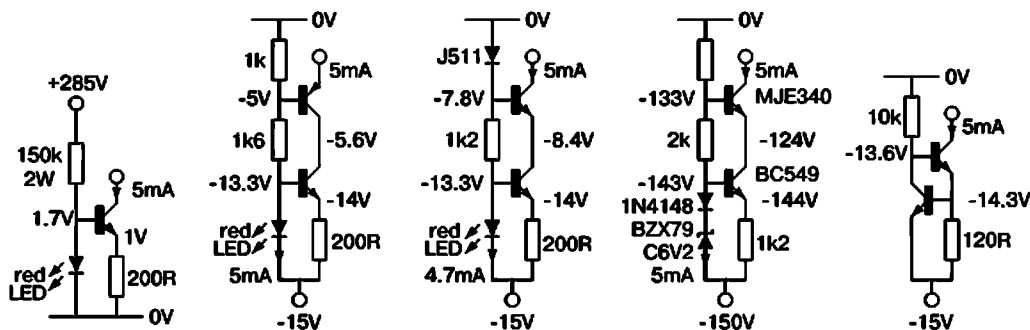


Рис. 3.43 Полупроводниковые приемники неизменяющегося тока

Простая схема может быть легко улучшена, путем увеличения числа транзисторов. Поскольку ныне кремниевые транзисторы относительно дешевы, такое усложнение

вполне оправдано. Нужно решить две проблемы. Во-первых, транзистору требуется напряжение $V_{КЭ} > 0,5 \text{ В}$, чтобы он работал как приемник неизменяющегося тока, что совсем удобно, поскольку близко по величине к напряжению смещения для электронных ламп с высоким μ , например, ЕСС83. Во-вторых, выходное сопротивление 92 кОм не особенно большое, и его можно сделать намного лучше.

Одним из вариантов является каскодная схема. Транзисторная каскодная схема (см. вторую слева схему на рис. 3.43) в общих чертах аналогична пентодной, но на практике такая схема требует отрицательного питания, что неудобно. Тем не менее, эта проблема может быть легко разрешима, поскольку для питания каскадов усилителя мощности, часто имеется отрицательное питание смещения для выходных ламп, получаемое от специальной обмотки силового трансформатора и дополнительного выпрямителя. Хотя обмотка смещения силовых трансформаторов обычно обеспечивает ток $< 1 \text{ мА}$, провод, рассчитанный на ток 1 мА, очень хрупкий. По этой причине изготовители трансформаторов обычно используют более толстый провод, с допускаемым током 10 мА, и увеличение общей нагрузки трансформатора при использовании этой обмотки для питания дополнительных устройств обычно незначительно.

Каскодная схема приемника неизменяющегося тока имеет более высокое выходное сопротивление, чем приемник неизменяющегося тока с одним транзистором:

$$r_{\text{вых}} = RЭ \times hfe_{(\text{верхний})} \times hfe_{(\text{нижний})} + 1/hoe_{(\text{верхний})}$$

Выходное сопротивление переменному току исходной схемы умножается на hfe второго транзистора, что улучшает его с $\approx 92 \text{ кОм}$ до $\approx 32 \text{ МОм}$, таким образом, величина $1/hoe$ является незначительной и не принимается в расчет. Тем не менее, большим практическим преимуществом является то, что отрицательное питание позволяет снижать выходной сигнал вплоть до 0 В без проблем с линейностью. Устойчивость каскада является превосходной, в том числе и на высоких частотах.

Как показано, каскодная схема источника тока является сравнительно чувствительной к помехам от источника промышленной частоты и шумам отрицательного питания, потому что ток меняется из-за изменения напряжения источника опорного напряжения. Эта чувствительность может быть значительно уменьшена путем модификации схемы — включив диод, регулирующий ток, в цепь, которая питает источники опорных напряжений (рис. 3.43).

Каскодный приемник неизменяющегося тока может быть адаптирован на большее напряжение простой заменой того из транзисторов, который питает нагрузку, на транзистор, предназначенный для высоковольтных устройств. Это немного снижает hfe , потому что такой транзистор обычно имеет более низкий hfe , но так как теперь имеется запас по напряжению, большая часть этого снижения может быть восстановлена установкой более высокого значения напряжения источника опорного напряжения, позволяя иметь большую величину $RЭ$. К сожалению, если требуется мощный транзистор, его большая выходная емкость ухудшает характеристики каскада на высоких частотах. Такой каскад показан на второй справа схеме рис. 3.43. Диод

1N4148 в этом примере компенсирует температурную нестабильность управляющего напряжения $V_{бэ}$ нижнего транзистора, но его установка требует перерасчета значений всех элементов схемы.

Так называемое «двойное кольцо» на транзисторах (правая схема на рис. 3.43) поддерживает напряжение 0,7 В, используя резистор-датчик 120 Ом. Если это напряжение повышается, из-за увеличения тока через резистор, то транзистор Т1 открывается сильнее, что вызывает понижение напряжения на базе. Транзистор Т2 начинает закрываться и ток через резистор 120 Ом падает, и, следовательно, ток такого каскада — приемника, поддерживается неизменным. Так как в этой схеме используется обратная связь приложенная к двум транзисторам, то не исключена возможность самовозбуждения на высоких частотах из-за наличия паразитной емкости.

3.30. Использование транзисторов в качестве активной нагрузки для электронных ламп

Во всех рассмотренных выше схемах приемников неизменяющегося тока можно изменить полярность напряжения на противоположную с одновременной заменой р-п-р транзисторов на п-р-п. Если эти каскады-приемник подключить в цепь напряжения питания в качестве активной нагрузки лампы, они становятся источниками неизменяющегося тока, позволяя усилительному каскаду на триоде достичь коэффициента усиления $A_v = \mu$. Очень важным свойством усилительного каскада с полупроводниковой активной нагрузкой является то, что возможно достичь низкого уровня искажений при низком напряжении питания.

Например, для каскада на триоде типа ЕСС83 требуется достаточно высокое питающее напряжение $V_{дэ}$, для обеспечения режима с нулевым сеточным током. Для маломощных электронных ламп с большим μ , напряжение между анодом и катодом в номинальном режиме часто выбирают равным 150 В. Для выбора R_n также существует общее практическое правило — $R_n > 2r_a$, и так как для ЕСС83 $r_a \approx 75$ кОм, можно использовать $R_n = 150$ кОм. Если $I_a = 0,7$ мА, получим падение напряжения 105 В на R_n , поэтому потребуется напряжение питания 255 В. Но маломощные каскады зачастую предназначены для усиления малых сигналов, например, для обеспечения на выходе амплитуды напряжения 5 В, поэтому коэффициент использования по питающему напряжению и КПД такого каскада оказываются очень низкими. Если заменить резистор 150 кОм источником неизменяющегося тока, то электронная лампа обеспечивает намного более высокое значение R_n , и можно установить напряжение питания независимо, чтобы обеспечивать максимальное значение требуемого размаха выходного напряжения.

На рис. 3.44 представлен очень наглядный пример использования электронной лампы с большим μ с низким напряжением питания. В этом примере требовался большой коэффициент усиления дифференциальной пары на лампе ЕСС83 с $\mu = 100$, при пониженном напряжении анодного питания 150 В. Заметим, что для схем активной

нагрузки лампы необходимы высоковольтные транзисторы, способные выдержать необходимый размах анодного напряжения.

Присутствующие в схеме стабилитроны обычно шунтируют, чтобы уменьшить шум. Однако шум, создаваемый двумя стабилитронами, является синфазным, и, следовательно, может быть подавлен следующим дифференциальным каскадом.

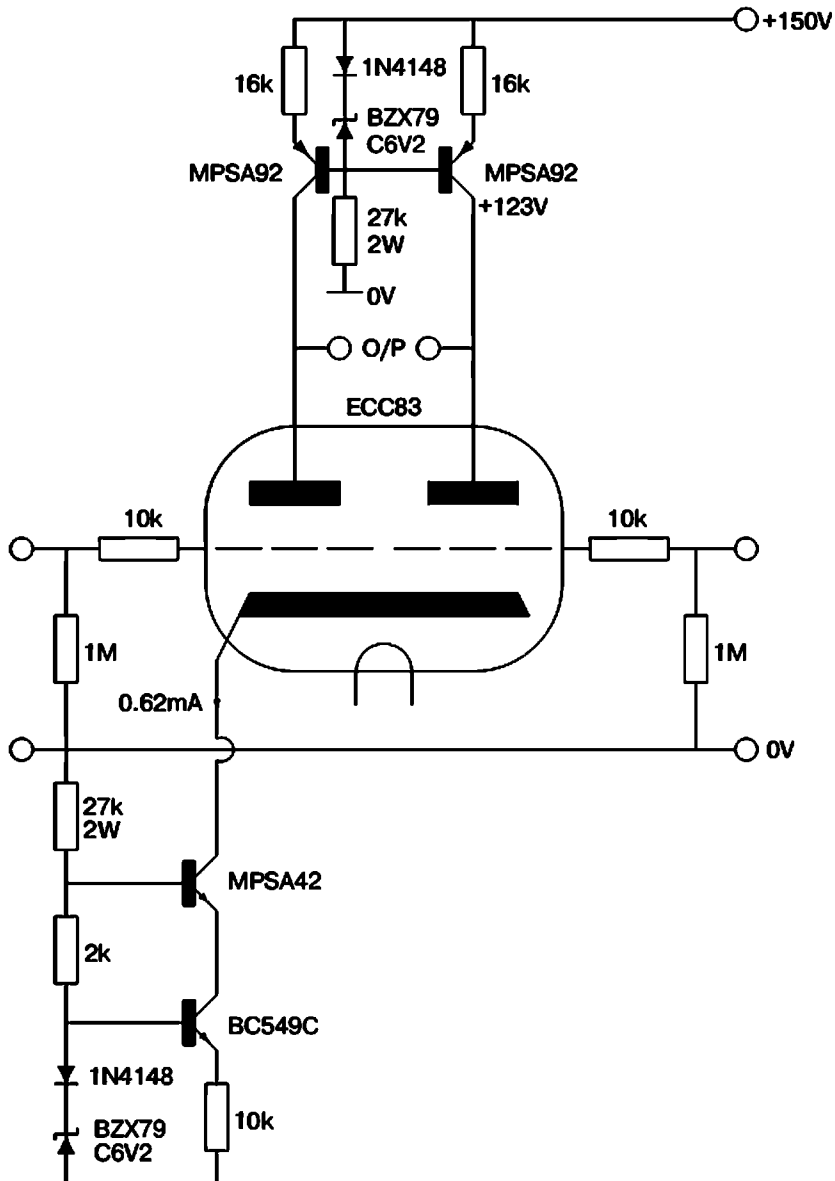


Рис. 3.44 Дифференциальная пара с полупроводниковой анодной нагрузкой

При тестировании в этой схеме был достигнут требуемый дифференциальный размах 7 В амплитуды выходного напряжения на частоте 1 кГц, с нелинейными искажениями всего 0,04%.

Выше уже обсуждалось, что каскодная схема значительно увеличивает $r_{\text{вых}}$, сглаживает нагрузочную линию, и уменьшает искажения, возникающие в электронной лампе. Если требуется максимизировать выходное напряжение и минимизировать

искажения, можно использовать, например, лампово-полупроводниковый каскад на триоде 7N7 (аналог 6SN7) с каскодной нагрузкой, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.51. Каскад желательно рассчитать на анодный ток $I_a = 8$ мА, поскольку внутренний коэффициент усиления μ для этих ламп более стабилен при $I_a > 6$ мА. Предполагая, что каскодная схема будет обеспечивать горизонтальную нагрузочную линию, начертим ее на уровне анодного тока 8 мА (рис. 3.45).

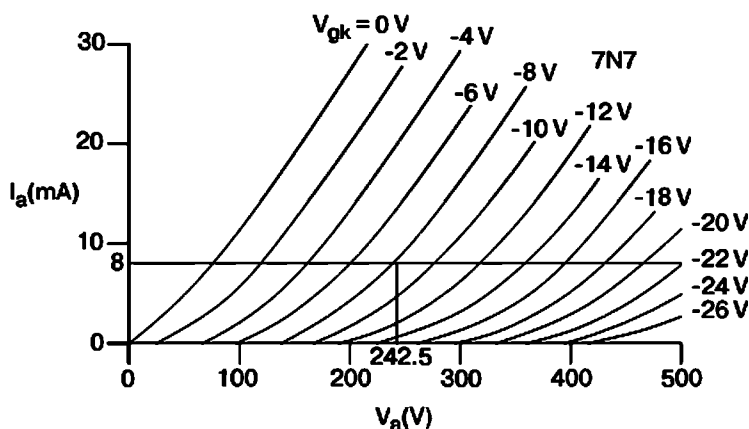


Рис. 3.45 Нагрузочная линия лампы 7N7 при работе с неизменяющимся током 8 мА

Обычно при возрастании V_a мы должны учитывать ограничение статических характеристик в области отсечки анодного тока. Поскольку ток I_a в рассматриваемом каскаде неизменный, единственное, что влияет на размах выходного напряжения — это то, что каскодная схема требует достаточного напряжения питания для правильной работы. В каскодной схеме вполне реально добиться падения напряжения 15, поэтому напряжение питания 400 В позволит обеспечить размах выходного напряжения вплоть до 385 В. Двигаясь в противоположном направлении вдоль нагрузочной линии 8 мА, отметим точку ее пересечения с характеристикой, соответствующей нулевому сеточному напряжению. Левее этой точки при ≈ 100 В появится сеточный ток и будут возрастать искажения. С учетом этого, максимальное значение возможного размаха выходного напряжения равно $385 \text{ В} - 100 \text{ В} = 285 \text{ В}$ в амплитудных значениях, что эквивалентно $\approx 100 \text{ В}$ действующего значения напряжения.

Хотя ток анода каскодной схемы выставлен на $I_a = 8$ мА, требуется обязательно отрегулировать смещение лампы, чтобы добиться требуемого V_a . Чтобы обеспечить максимальный неискаженный размах выходного напряжения, нужно ни при положительном, ни при отрицательном полупериоде усиливаемого колебания не попадать в область искажений. Таким образом, рабочую точку нужно установить посередине между минимальным и максимальным анодными напряжениями, за пределами которых будут появляться значительные искажения:

$$V_a = \frac{V_{\text{макс}} + V_{\text{мин}}}{2} = \frac{385 + 100}{2} = 242,5 \text{ В.}$$

Зная величину анодного напряжения в точке покоя, по статическим характеристикам легко определить требуемое напряжения смещения $V_{ск} \approx 8 \text{ В}$, которое легко может быть обеспечено, например установкой в катодную цепь стабилитрона на 8,2 В (рис. 3.46). Поскольку каскад, рассматриваемый в данном примере, предназначен для работы с большим размахом выходного напряжения, шумы стабилитрона не является значительной проблемой, поэтому в этой схеме не обязательно шунтировать стабилитрон конденсатором.

Если на электронной лампе падает 242,5 В, то на нижнем транзисторе упадет 147,5 В, таким образом он должен рассеивать 1,18 Вт в режиме покоя при заданном токе. Когда размах анодного напряжения V_a достигает 100 В, транзистор должен выдержать напряжения 285 В при токе 8 мА, рассеивая в этот момент времени 2,28 Вт мощности. На практике, транзисторы следуют выбирать с небольшим запасом по мощности, чтобы избежать их пробоя в следствие кратковременных перегрузок. При этом, на втором транзисторе падает существенно меньшее напряжение, и он может быть выбран менее мощный, нежели первый.

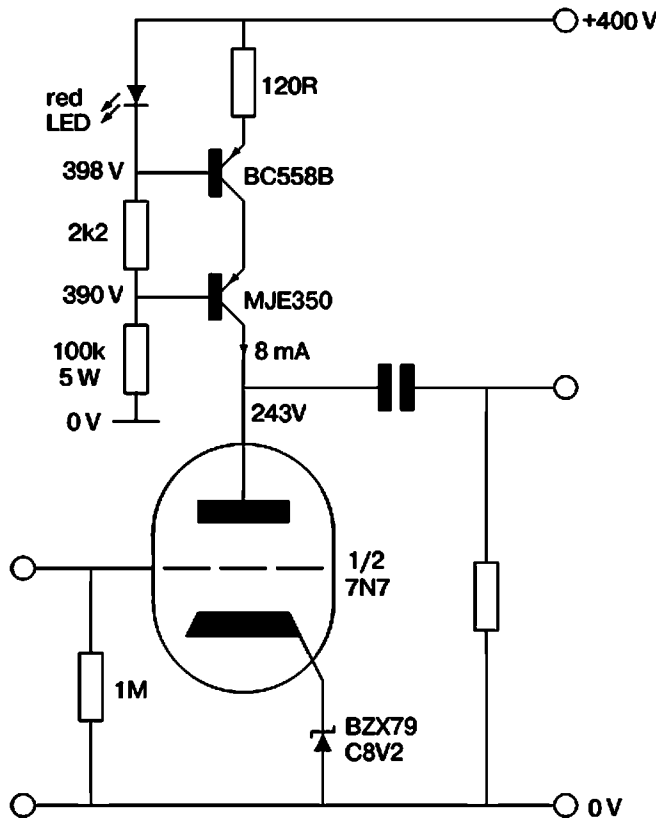


Рис. 3.46 Полупроводниковая каскодная анодная нагрузка

Обратимся теперь к критериям выбора транзисторов с точки зрения возможной оптимизации $r_{вых}$. В таблице 3.3 сравниваются транзисторы, которые могут быть полезны во вспомогательных схемах усилительных каскадов на электронных лампах. Выходное сопротивление на низких частотах частично определяется параметром $1/h_{oe}$, но определяющий вклад вносит параметр h_{fe} , поскольку любое сопротивление

в цепи эмиттера умножается на h_{fe} . Выходное сопротивление на высоких частотах шунтируется паразитной емкостью между коллектором и эмиттером транзистора, которая частично определяется паразитными емкостями монтажа, а также емкостями самого транзистора. Обычно все мощные высоковольтные транзисторы имеют достаточно большую площадь кремниевого кристалла, и относительно большие паразитные емкости, что отражается на их граничной частоте f_T . Кроме того, f_T существенно изменяется с изменением коллекторного тока I_K , и использование транзистора с I_K ниже рекомендуемого номинального значения может уменьшить f_T вплоть до нескольких раз.

Как следствие из этих соображений, в каскодном приемнике неизменяющегося тока маломощного каскада целесообразным было бы использование двух транзисторов типа BC549 или, если требуется низкая выходящая емкость ($\approx 0,5$ пФ, исключая паразитные емкости) и достаточно высокое напряжение, то, например, трех транзисторов типа BFR90.

Таблица 3.3

		$V_{КЭ(МАКС)}$	$I_{К(МАКС)}$	$P_{МАКС}$	f_T	$h_{FE(МИН)}$	$1/h_{oe(тип)}$
BFR90	n-p-n	15 В	25 мА	300 мВт	5 ГГц	40	5 кОм
BC549	n-p-n	30 В	100 мА	500 мВт	300 МГц	200	12 кОм
BC558B	p-n-p				200 МГц	220	6 кОм
2N3904	n-p-n	40 В	200 мА	500 мВт	250 МГц	100	15 кОм
2N3906	p-n-p			625 мВт			5 кОм
MPSA42	n-p-n	300 В	500 мА	625 мВт	50 МГц	40	50 кОм
MPSA92	p-n-p						35 кОм
MJE340	n-p-n	300 В	500 мА	20 Вт	10 МГц	30	150 кОм
MJE350	p-n-p				4 МГц		50 кОм

Для получения полного перечня технических характеристик транзисторов очень удобно воспользоваться Интернетом — практически все изготовители полупроводников имеют превосходные Web-сайты.

Ниже приведен перечень наиболее важных параметров транзистора, которые необходимо учитывать при его выборе.

$V_{КЭ(МАКС)}$: максимальное допустимое напряжение между коллектором и эмиттером. (Имеются разнообразные способы определения этого предела, но пока вы не знаете точных режимов схемы, разумно не превышать 2/3 рекомендуемого $V_{КЭ}$.)

$I_{К(МАКС)}$ максимально допустимый ток коллектора.

$P_{МАКС}$ максимальное значение допустимой мощности рассеяния прибора ($P = I_K \times V_{КЭ}$).

f_T граничная частота, при которой коэффициент усиления по переменному току равен единице. На этой и более высоких частотах, транзистор теряет свои усилительные свойства.

$h_{FE(МИН)}$ минимальный коэффициент усиления по постоянному току в схеме включения транзистора с общим эмиттером. Опытным путем автором этой книги установлено, что необходимый h_{fe} транзистора обычно требуется равным удвоенному минимальному току лампы, в цепи которой будет установлен транзистор.

$1/h_{oe(тип)}$: это типовое значения выходного сопротивление транзистора по переменному току (эквивалент R_o) в схеме с общим эмиттером (то есть выходное коллекторное сопротивление). Оно редко указывается изготовителями, потому на практике его часто приходится измерять характериографом. Как правило р-п-р транзисторы имеют напряжение Эрла ниже, чем п-р-п транзисторы, по этой причине их $1/h_{oe}$ ниже и быстрее понижается при увеличении тока.

Любой биполярный транзистор должен иметь минимальное напряжение между коллектором и эмиттером ВКЭ, чтобы работать в линейной области. Для транзисторов низкого напряжения при токах < 30 мА, напряжение ≈ 1 В является достаточным, но при более высоких токах может потребоваться и около 2 В (рис. 3.47).

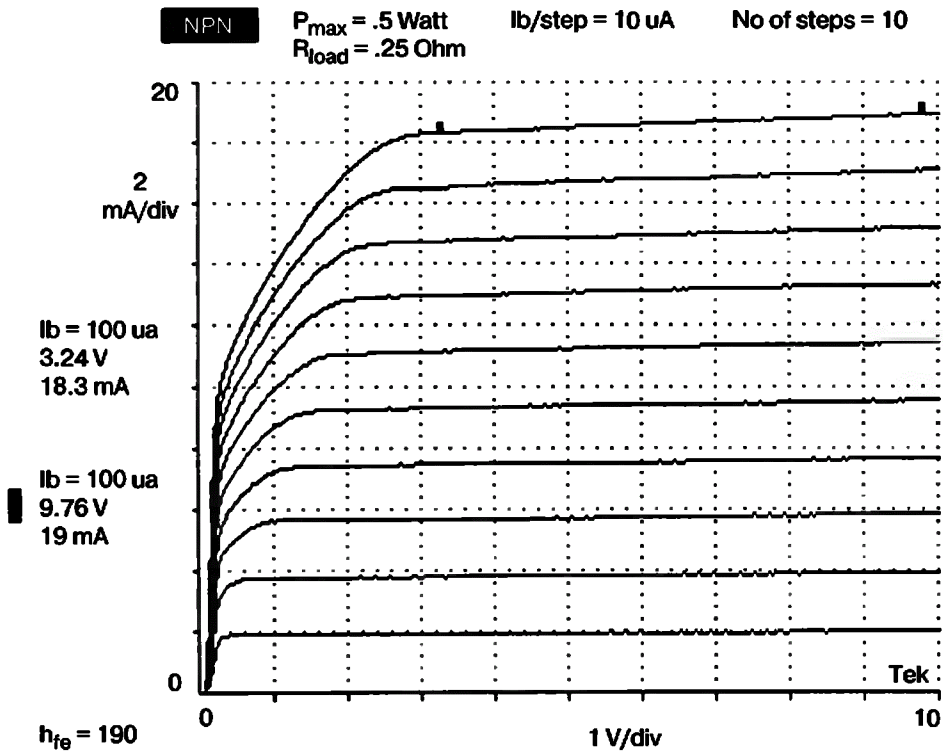


Рис. 3.47 I_c в зависимости от $V_{кэ}$ для транзистора 2N3904, показывает минимальное требуемое напряжение $V_{кэ}$

Высоковольтным транзисторам, таким как MPSA42 или MJE340 может потребоваться ВКЭ > 2 В. Приемник неизменяющегося тока в дифференциальной паре, работающей в качестве фазорасщепителя, просаживает на себе половину входного сигнала, поэтому этот пункт может оказаться существенным. В каскодной схеме приемника неизменяющегося тока на нижний транзистор не поступают сигналы переменного тока, поэтому он может быть выбран исходя из падения напряжения около 2 В постоянного тока. На верхнем транзисторе при этом будет падать более высокое напряжение.

3.31. Приемник неизменяющегося тока на интегральной схеме

Кроме приемников неизменяющегося тока на лампах или транзисторах, есть и другая возможность — применение для приемника неизменяющегося тока специально разработанной интегральной схемы: программируемого приемника неизменяющегося тока, например, LM334Z. Этому прибору не требуются дополнительные источники питания. Такая микросхема неплохо работает только при падении на ней 1,2 В и при токе $I_{(\text{макс})} = 10 \text{ мА}$. Типовое применение этого прибора — катодная цепь дифференциальной пары. В то же время в области высоких частот могут возникать проблемы с устойчивостью из-за самовозбуждения внутреннего операционного усилителя интегральной схемы.

Список используемой литературы

1. Mullard (1969) Book 2 part 1: Receiving valves and television picture tubes, General Operational Recommendations, стр. 17.
2. Gewartowski, J. W. and Watson, H. A. (1965) Principles of Electron Tubes. Van Nostrand, стр. 112, 121.
3. British Patent No. 145,421 (1921) Improved vacuum electric discharge apparatus having an incandescent cathode. Siemens & Halske Aktiengesellschaft.
4. British Patent No. 287,958 (1928) Improvements in or relating to circuit arrangements and discharge tubes for amplifying electric oscillations. N V Philips' Gloeilampenfabrieken.
5. British Patent No. 448,421 (1934) Improvements in and relating to thermionic valve circuits. Alan Dower Blumlein.
6. Puckle, O. S. (1943) Time Bases, 1st ed. Chapman & Hall, стр. 92.
7. British Patent No. 564,250 (1940) Improvements in or relating to thermionic valve amplifier circuit arrangements. Eric White.
8. Amos, S. W. and Birkinshaw, D. C. (1958) Television Engineering: Principles and Practice. Volume 4: General Circuit Techniques. Iliffe, стр. 264.
9. Kimmel, Alan (1993) The mu stage, Glass Audio, Vol. 5, No. 2, стр. 12.
10. US Patent No. 2,310,342 (1943) Balanced direct and alternating current amplifiers, Radio Corporation of America.
11. Cooper, V. J. (1951) Shunt-regulated amplifiers, Wireless Engineer, May, стр. 132–145.
12. Amos, S. W. and Birkinshaw, D. C. (1958) Television Engineering: Principles and Practice. Volume 4: General Circuit Techniques. Iliffe, стр. 250.
13. Vila, Ignacio (1998) The beta follower amplifier, Glass Audio, Vol. 10, No. 4, стр. 1.
14. British Patent No. 482,740 (1936) Improvements in or relating to thermionic valve amplifying circuit arrangements. Alan Dower Blumlein.

Литература для углубленного изучения

1. Agger, L. T. (1955) Principles of Electronics, 2nd ed. Macmillan.

2. Alexander Robert Charles (1999) *The Inventor of Stereo: The Life and Works of Alan Dower Blumlein*. Focal.
3. Amos, S. W. and Birkinshaw, D. C. (1956) *Television Engineering: Principles and Practice. Volume 2: Video-frequency Amplification*. Iliffe & Sons.
4. British Standard Code of Practice CP1005 (1962) *The use of electronic Valves*.
5. Burns, Russell (2000) *The Life and Times of A. D. Blumlein. The Institution of Electrical Engineers*.
6. Chaffee, E. Leon (1933) *Theory of Thermionic Vacuum Tubes*. McGraw-Hill.
7. Eastman, A. V. (1949) *Fundamentals of Vacuum Tubes*, 3rd ed. McGraw-Hill.
8. Langford-Smith (1953) *Radio Designers Handbook*, 4th ed. Iliffe. reprinted (192. 99).
9. Radio Society of Great Britain (1976) *Radio Communications Handbook*, 5th ed.
10. Reich, Herbert J. (1939) *Theory and Applications of Electron Tubes*. McGraw-Hill.
11. Reich, Herbert J. (1941) *Principles of Electron Tubes*. Now reprinted by Audio Amateur Press (1995).
12. Ryder, J. D. (1964) *Electronic Fundamentals and Applications*, 3rd ed. Prentice-Hall.
13. Terman, F. E. (1955) *Electronic and Radio Engineering*, 4th ed. McGraw-Hill.
14. Valley and Wallman (1948) *Vacuum Tube Amplifiers*. McGraw-Hill. Now reprinted by Audio Amateur Press (2000).