

Несмотря на то, что коэффициент фазоинверсного каскада на сопротивлениях с симметричным выходом меньше 1, данное схемотехническое решение довольно часто применяется в высококачественных широкополосных усилителях низкой частоты. Это объясняется тем, что по сравнению с другими фазоинверсными устройствами данная схема обеспечивает лучшую частотную характеристику.

Помимо схем одноктактных фазоинверсных схем с разделенной анодной нагрузкой в ламповых УНЧ широкое применение получили двухтактные самобалансирующиеся инверсные схемы. В этих схемах используется два триода, один из которых обеспечивает изменение фазы сигнала на 180° . Поскольку на практике в таких каскадах обычно применяются двойные триоды, рассматриваемая схема часто называется фазоинверсным каскадом на двойном триоде. Существенным отличием фазоинверсного каскада на двойном триоде от каскада на сопротивлениях с симметричным выходом является то, что его коэффициент усиления K больше единицы. При этом можно получить такое же значение коэффициента K , как и в реостатном усилителе, однако за счет использования второго триода. Упрощенная принципиальная схема такого усилителя приведена на рис. 3.43.

В рассматриваемой схеме первый триод лампы ($Л1_A$) работает как обычный усилительный каскад. При этом на

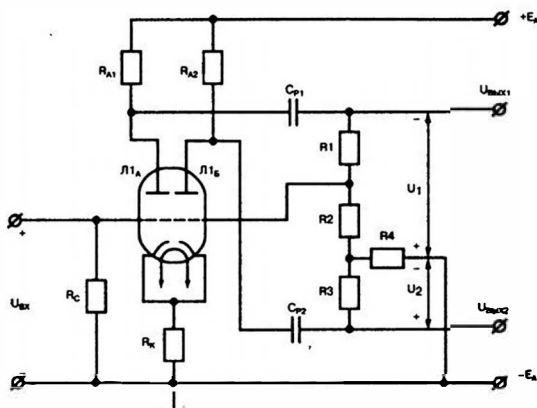


Рис. 3.43. Упрощенная принципиальная схема фазоинверсного каскада на двойном триоде

резисторе R_{A1} формируется напряжение U_1 , которое в K раз больше, чем входное напряжение $U_{вх}$. Напряжение U_1 через конденсатор C_{p1} подается на управляющую сетку лампы одного из плеч двухтактного каскада и одновременно на управляющую сетку второго триода ($Л1_Б$) лампы фазоинверсного каскада.

Напряжение U_2 , противоположное напряжению U_1 по фазе, формируется с помощью второго триода лампы ($Л1_Б$). Параметры этого триода, режимы его работы и величина сопротивления нагрузки (резистор R_{A2}) выбраны такими же, как и для первого триода. Поэтому каскад на триоде $Л1_Б$ имеет тот же коэффициент усиления K . Однако напряжение, подаваемое на управляющую сетку триода $Л1_Б$, будет в K раз больше, чем напряжение $U_{вх}$, подаваемое на управляющую сетку триода $Л1_А$. С учетом этого обстоятельства для того, чтобы получить на выходе лампы напряжение U_2 , равное по амплитуде напряжению U_1 , на сетку триода $Л1_Б$ необходимо подать напряжение, в K раз меньшее, чем напряжение U_1 . Это напряжение снимается с резистора $R2$. Сформированное таким образом напряжение U_2 через конденсатор C_{p2} подается на управляющую сетку лампы второго плеча двухтактного каскада и одновременно на управляющую сетку второго триода фазоинверсного каскада.

В результате данный каскад не только формирует два одинаковых по амплитуде, но противофазных напряжения U_1 и U_2 , но и обеспечивает усиление входного напряжения $U_{вх}$.

Для лампы верхнего (по схеме) плеча последующего двухтактного каскада сопротивление утечки образуется резисторами $R1$ и $R2$. В то же время для лампы нижнего (по схеме) плеча окончательного двухтактного каскада сопротивление утечки образуется резистором $R3$. Поскольку нормальная работа окончательного усилительного каскада обеспечивается при равенстве величин сопротивлений утечки, должно соблюдаться следующее равенство:

$$R3 = R1 + R2.$$

В то же время резисторы $R1$ и $R2$ образуют делитель, на котором формируется входное напряжение для второго триода фазоинверсного каскада. При этом должно выполняться следующее условие:

$$R2 = R3 / K.$$

Это означает, что величина сопротивления резистора R2 должна быть в K раз (где K – коэффициент усиления) меньше, чем сумма сопротивлений резисторов R1 и R2:

$$R2 = (R1 + R2) / K.$$

Однако на практике довольно сложно подобрать в точности одинаковые сопротивления R_{A1} и R_{A2} , а также $R3 = R1 + R2$. Помимо этого триоды Л1_А и Л1_Б могут иметь некоторый разброс параметров. Поэтому в реальных условиях всегда существует определенная асимметрия ламп и элементов рассматриваемого каскада. В результате возникает асимметрия напряжений U_1 и U_2 . Для уменьшения этой асимметрии вводится балансный резистор R4, величина сопротивления которого может составлять от 10 до 50% величины сопротивления резистора R3.

В специализированной литературе фазоинверсный каскад на двойном триоде часто называется самобалансирующимся. Принцип автоматической самобалансировки рассматриваемой схемы заключается в следующем. Предположим, что каскад строго симметричен. В этом случае токи рабочей частоты, протекающие от триодов Л1_А и Л1_Б через резистор R4, равны по величине и противоположны по направлению, что приводит к их взаимной компенсации. При этом на резисторе R4 падение напряжения отсутствует. Если предположить, что каскад станет несимметричным при условии, что напряжение U_1 больше напряжения U_2 , то на резисторе R4 появится падение напряжения ΔU . Это падение напряжения прибавится к падению напряжения, снимаемому с резистора R2 и подаваемому на сетку второго триода. В результате поступление на сетку триода Л1_Б большего входного напряжения приведет к увеличению напряжения U_2 до значения, близкого к величине напряжения U_1 . При обратной асимметрии, когда напряжение U_1 будет меньше напряжения U_2 , напряжение ΔU будет вычитаться из напряжения, снимаемого с резистора R2. В результате на сетку триода Л1_Б будет подаваться меньшее входное напряжение, что приведет к уменьшению напряжения U_2 до значения, близкого к величине напряжения U_1 . Таким образом, любое отклонение величины напряжения U_1 сопровождается формированием на

резисторе R_4 дополнительного выравнивающего напряжения с соответствующим знаком, которое обеспечивает уменьшение возникающей в схеме асимметрии в несколько раз.

Одной из отличительных особенностей фазоинверсного каскада на двойном триоде является отсутствие в цепи автоматического смещения конденсатора, блокирующего резистор R_k . Дело в том, что переменные составляющие анодного тока обеих ламп (или триодов одной лампы) в такой схеме в один и тот же момент противоположны по направлению и, проходя через резистор R_k , компенсируют друг друга. Если же эти токи вследствие асимметрии ламп и деталей окажутся неодинаковыми, формируемое на резисторе R_k переменное напряжение будет подаваться на сетки обеих ламп. Для триода, у которого ток больше, это напряжение окажется напряжением отрицательной обратной связи, в результате анодный ток данной лампы уменьшится. Для триода с меньшим анодным током обратная связь будет положительной, в результате анодный ток этой лампы увеличится. Так происходит выравнивание токов, то есть симметрирование схемы.

В середине прошлого века была разработана схема другого варианта самобалансирующегося инверсного каскада, которая широко используется и в современных конструкциях. Упрощенная принципиальная схема такого фазоинвертора приведена на рис. 3.44.

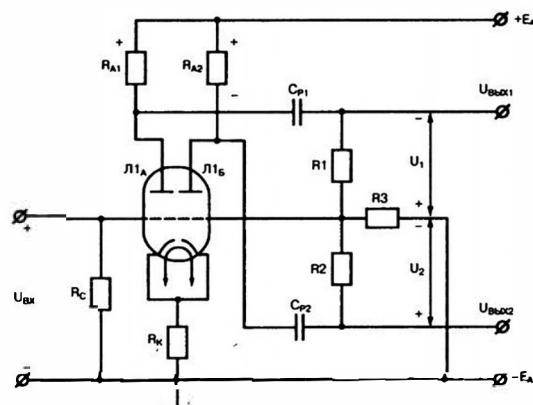


Рис. 3.44. Принципиальная схема усовершенствованного самобалансирующегося инверсного каскада

В отличие от самобалансирующегося каскада, рассмотренного ранее, функции делителя напряжения и балансирования в этой схеме выполняет один резистор R_3 . При этом величины сопротивлений R_1 и R_2 выбираются неравными, вследствие чего на резисторе R_3 всегда присутствует падение напряжения, подаваемое на сетку триода $Л1_б$. В зависимости от степени симметрии ламп и нагрузочных сопротивлений данное падение напряжения становится или больше, или меньше, но всегда остается таким, что значение амплитуды напряжения U_2 оказывается близким значению амплитуды U_1 . Главное достоинство такой схемы заключается в отсутствии одного резистора. Главный же недостаток – несколько худшая реакция на асимметрию.

На практике в усилителях сравнительно невысокого качества иногда применяются так называемые упрощенные схемы поворота фазы. В них возбуждение двухтактных каскадов осуществляется сигналом, подаваемым от обычного несимметричного усилителя. Принципиальные схемы двух вариантов таких схемотехнических решений приведены на рис. 3.45.

В двухтактном усилителе (рис. 3.45, а) напряжение низкой частоты, подаваемое на управляющую сетку лампы $Л2$, формируется на делителе R_4R_5 , включенном в анодную цепь лампы $Л1$. Величина сопротивления резистора R_5 подбирается так, чтобы переменная составляющая анодного напряжения лампы $Л2$ равнялась переменной составляющей анодного напряжения лампы $Л1$. В процессе усиления нижняя по схеме лампа обеспечивает поворот фазы усиливаемого напряжения на 180° . В результате на первичной обмотке трансформатора $Тр1$ выполняется условие противоположности напряжений по знаку при равенстве амплитуд.

В рассматриваемой схеме конденсатор $C1$ отделяет постоянную составляющую, а резистор R_6 обеспечивает симметричные условия работы трансформатора $Тр1$. Величина сопротивления этого резистора обычно выбирается в пять раз больше величины сопротивления нагрузки между анодами ламп при соблюдении следующего равенства:

$$R_6 = R_4 + R_5$$