

Мордовский Государственный  
Университет Имени Н.П.Огарева

Институт Физики и Химии

Кафедра Радиотехники

Бардин В.М.

***РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА  
УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ  
И ОКОНЕЧНЫЕ КАСКАДЫ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ.***

Саранск, 2005

УДК 621.376.3(076)

Составитель В.М Бардин

Рецензент – к.т.н., доцент Беспалов Н.Н.

Радиопередающие устройства.

Усилители мощности и оконечные каскады радиопередатчиков.

Метод. указания/сост. В.М. Бардин. – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2005.

– 17 с.

В данном издании рассмотрены основные схемные решения оконечных каскадов радиопередатчиков, а также способы сложения мощностей усилителей мощности. Предназначено для студентов специальности «Радиотехника» очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению научно-методического совета Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева

## 1. Усилители мощности

Мощность возбудителя и буферных каскадов РПД обычно во много раз меньше требуемой выходной мощности передатчика. Если выходная мощность значительна (десятки, сотни киловатт и более), то для получения таких мощностей приходится включать в состав РПД несколько промежуточных усилителей мощности и оконечный каскад. При этом возникает целый ряд проблем, связанных с согласованием каскадов между собой, выбором класса режимов, ограничением спектра, охлаждением активных элементов и др.

Маломощные промежуточные каскады усиления, когда еще не стоит проблема обеспечения высокого КПД, чаще всего выполняют на транзисторах, работающих в режиме класса А, т.е. без отсечки тока. При этом обеспечивается минимальное искажение сигнала и упрощаются фильтры. Но по мере увеличения мощности появляется необходимость обеспечения высокого КПД и поэтому усилители переводят в режимы В, С, D. Однако это расширяет спектр сигнала и приходится применять более сложные согласующие устройства и фильтры. Кроме того, учитывая ограниченную единичную мощность активных элементов, возникает задача их группового (последовательного и параллельного) соединения, а также обеспечения эффективного охлаждения.

Промежуточные и оконечные каскады передатчиков на мощности до 30 кВт, как правило, выполняют на полупроводниковых приборах. Более мощные строятся на вакуумных приборах, единичная мощность которых в десятки и сотни раз превышает мощность транзисторов.

Нагрузка маломощных промежуточных каскадов может носить аperiodический или резонансный характер. Оконечные каскады, как правило, нагружаются на резонансную нагрузку. Схема простейшего транзисторного усилителя с аperiodической нагрузкой приведена на рис. 1.

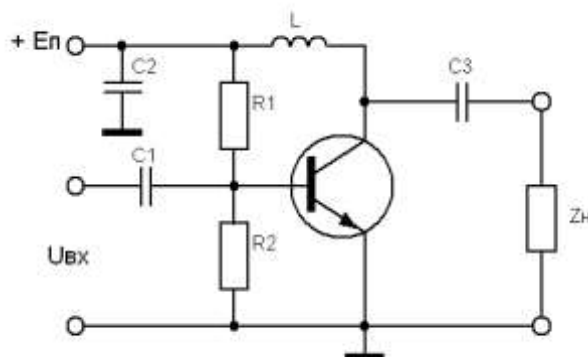


Рис. 1. Схема промежуточного усилителя.

Выбор режима работы транзистора обеспечивается соответствующим подбором резисторов R1 и R2. Элементы  $C_2L$  выполняют функции фильтра в цепи питания. Емкости C1 и C3 являются разделительными.

КПД такого усилителя не может превышать 0,5 (его реальное значение обычно составляет (0,3-0,35)). Повысить КПД можно переводом усилителя на работу в режиме классов В, С, D. При этом сигнал становится несинусоидальным и чтобы выделить первую гармонику необходимо в качестве нагрузки или согласующей цепи использовать колебательные контуры или фильтры.

Типовые схемные решения таких усилителей приведены на рис. 2.

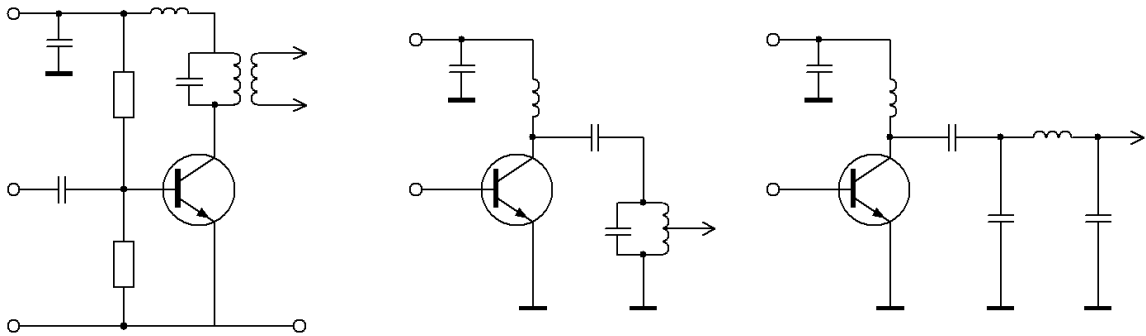


Рис. 2. Варианты схемных решений промежуточных усилителей мощности.

Увеличение мощности при обеспечении минимальных искажений обеспечивается в двухтактном усилителе (рис. 3).

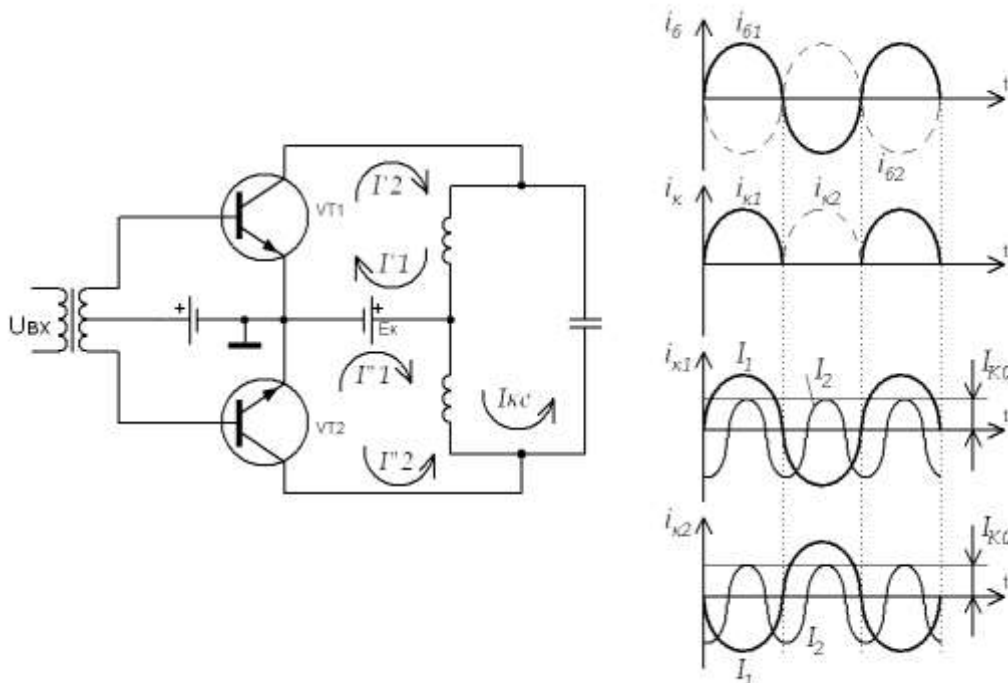


Рис. 3. Схема двухтактного усилителя и диаграмма токов

Транзисторы в таком усилителе подключены к контуру симметрично, образуя два плеча. Они подпитывают контур поочередно. Напряжение смещения транзисторов выбирается таким образом, чтобы угол отсечки тока был равен  $90^\circ$ . В простейшем случае базы транзисторов

через резисторы соединяются с «землей». При подаче входного синусоидального сигнала на базы транзисторов поступают равные, но противофазные напряжения. Выходные токи транзисторов будут иметь форму однополупериодных косинусоидальных импульсов (если ток транзистора не превышает тока насыщения) или форму, близкую к прямоугольной. В результате за один период входного напряжения через контур поочередно проходят два импульса тока, т.е. подпитка контура происходит в два такта. Мощность колебаний в такой схеме увеличивается в два раза. Другим достоинством схемы является отсутствие в нагрузке колебаний четных гармоник. В полубмотках контура токи четных гармоник направлены встречно и поэтому их магнитные поля взаимно компенсируются. Но, в то же время, токи всех четных гармоник суммируются в общем проводе, соединяющем контур с источником питания. Поэтому необходимо принимать меры, чтобы они не попадали в источник питания. Токи первой гармоники (и всех нечетных гармоник) суммируются в контуре, но взаимно компенсируются в общей цепи.

Дальнейшее увеличение мощности усилителей может быть обеспечено путем параллельного включения транзисторов (или ламп). Однако при этом необходимо учитывать ряд особенностей. В частности, из-за разброса сопротивлений транзисторов необходимо принимать меры для симметрирования токов, т.е. обеспечить равномерное распределение тока между транзисторами. Это можно обеспечить либо подбором транзисторов, либо включением последовательно с транзисторами выравнивающих сопротивлений. Кроме того, необходимо обеспечить синфазность возбуждения всех приборов. Это особенно сложно сделать на высоких частотах, когда разница в длине соединительных проводников и разброс реактивных параметров самих транзисторов, начинает вносить фазовые сдвиги во входные и выходные токи. Для компенсации (и выравнивания) таких фазовых задержек приходится вводить специальные цепи. Существует и еще ряд проблем. Так, при параллельном включении приборов складываются все межэлектродные емкости. Особенно опасным является увеличение проходной емкости (между входом и выходом), так как при определенных условиях это может привести к самовозбуждению усилителя и появлению паразитных колебаний.

При выходе из строя с обрывом цепи одного из транзисторов (или лампы), остальные приборы оказываются нагруженными на сопротивление, отличающиеся от оптимального, режим работы нарушается и это может привести к отказу остальных приборов.

На рис. 4. приведена схема параллельного включения двух ламп, а на рис.5 - схема включения двух транзисторов, работающих в диапазоне СВЧ.

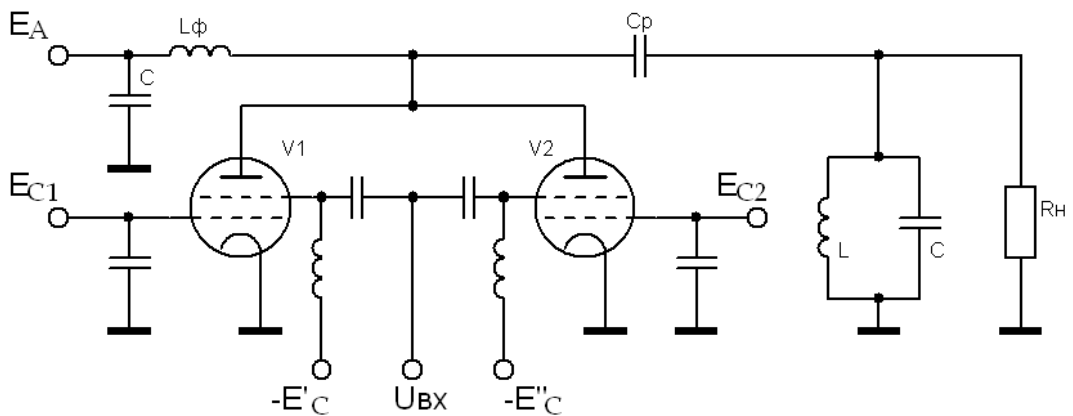


Рис. 4. Схема параллельного включения двух ламп

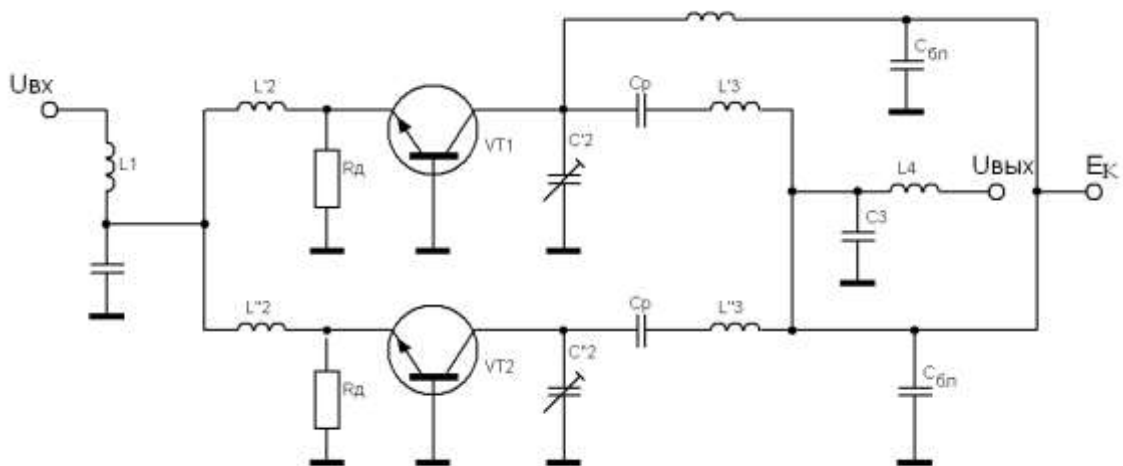


Рис. 5. Схема параллельного включения транзисторов

Управляющие сетки ламп подключены к разным источникам сеточного смещения, чтобы можно было подобрать режим каждой лампы отдельно. По сравнению с лампами транзисторы имеют гораздо больший разброс параметров, поэтому их симметрирование усложняется. Для того чтобы уменьшить влияние проходных емкостей транзисторов, при работе на высоких частотах их обычно включают по схеме с общей базой. Разделение LC элементов во входных и выходных цепях связи и цепи коллекторного питания позволяет: во-первых, подстраивать коллекторную цепь каждого из них (скомпенсировать разброс коллекторных емкостей) и выровнять режимы работы транзисторов; во-вторых, так легче обеспечить симметрию монтажа. При достаточно больших и одинаковых индуктивностях  $L_2$ , когда их сопротивления на рабочей частоте оказываются много больше входных сопротивлений транзисторов, обеспечивается равенство входных эмиттерных токов и синфазность возбуждения. Поскольку коэффициент усиления по току в схеме с общей базой  $h_{21} \approx 1$ , то одновременно обеспечивается равенство амплитуд коллекторных токов обеих транзисторов.

Ввиду взаимного влияния, сложности настройки, положительного температурного коэффициента для токов и, как следствие этого, снижения надежности, при параллельном включении биполярных транзисторов их число редко превышает 4-5 приборов. В этом отношении лучше полевые приборы, поскольку у них отрицательный температурный коэффициент для токов. Поэтому для них менее опасен разброс параметров.

## 2. Сложение мощностей усилителей мощности.

Двухтактная схема даже при групповом включении транзисторов в каждом плече не всегда позволяет получить требуемую выходную мощность передатчика. Увеличение общей мощности можно обеспечить путем сложения мощностей отдельных блоков. В передатчиках большой мощности широкое применение нашли мостовые схемы, обеспечивающие совместную и независимую работы ВЧ модулей. Принцип работы мостового сумматора мощностей двух усилителей иллюстрируется рис. 6.

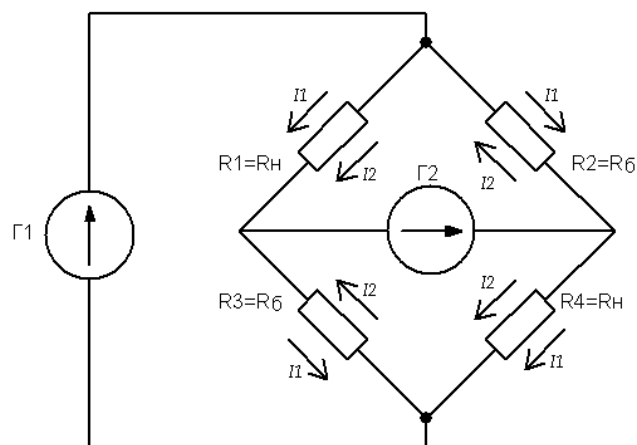


Рис. 6. Мостовая схема сложения мощностей.

При условии  $R1R4=R2R3$  выполняется условие баланса моста, т.е. напряжение одного из генераторов не поступает на вход второго и генераторы работают независимо друг от друга. При равенстве  $R1=R2=R3=R4$  генераторы нагружены на сопротивление  $Z_{BX1}=R$  и  $Z_{BX2}=R$ . Токи обоих генераторов  $I1$  и  $I2$  суммируются в двух нагрузочных сопротивлениях ( $R_n$ ) и вычитаются в двух балластных ( $R_6$ ). В результате:

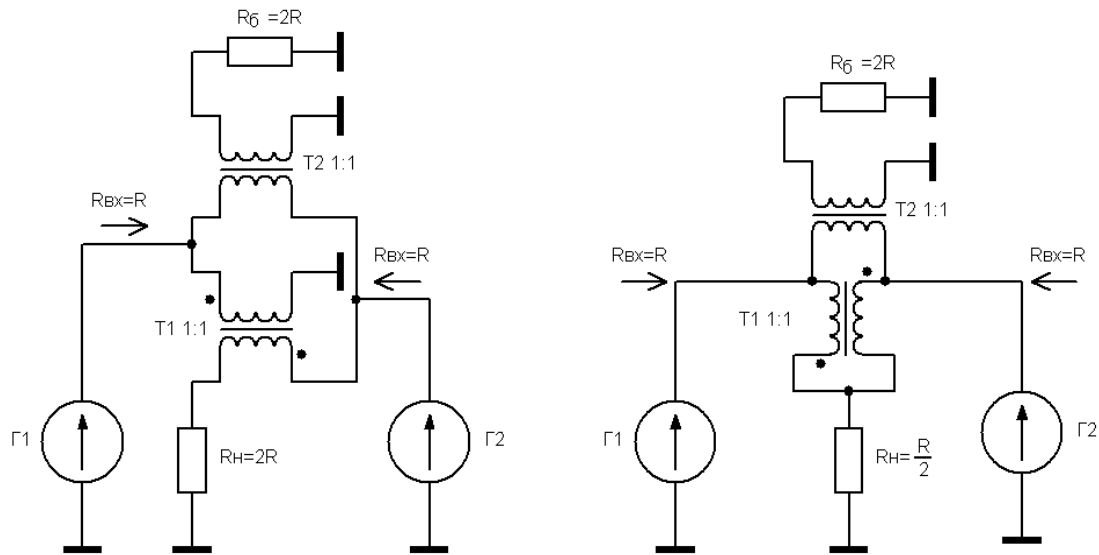
$$P_n = \frac{1}{2}(I1 + I2)^2 R_n$$

$$P_6 = \frac{1}{2}(I1 - I2)^2 R_6$$

Если  $I1=I2$ , то вся мощность поступает в полезную нагрузку.

Однако для практического применения такая схема оказывается непригодной, поскольку, во-первых, содержит по два нагрузочных и

балластных сопротивлений и, во-вторых, даже при заземлении одной из точек схемы оказываются изолированными от корпуса один из генераторов и по одному из нагрузочных и балластных сопротивлений. Эти проблемы решаются с помощью дополнительных трансформаторов. Существует несколько вариантов таких схем. На рис. 7 приведены два возможных решения.



$$U_H = U_{Г1} + U_{Г2}$$

$$I_H = I_{Г1} + I_{Г2}$$

Рис. 7. Трансформаторные схемы параллельной работы двух генераторов.

Трансформатор Т1 подключает последовательно или параллельно к сопротивлению  $R_H$  оба генератора в фазе. Через трансформатор Т2 оба генератора подключаются к сопротивлению  $R_6$  и при равенстве  $U_{Г1} = U_{Г2}$  в нем не выделяется мощность. В таких схемах напряжение от одного генератора не поступает на выход другого, т.е. обеспечивается их независимая работа.

Существуют схемы, позволяющие подключать к одной нагрузке не два, а  $N$  генераторов. Одна из таких схем приведена на рис. 8. Схема содержит  $N$  одинаковых четырехполюсников и  $N$  балластных сопротивлений, включенных по схеме многолучевой звезды.



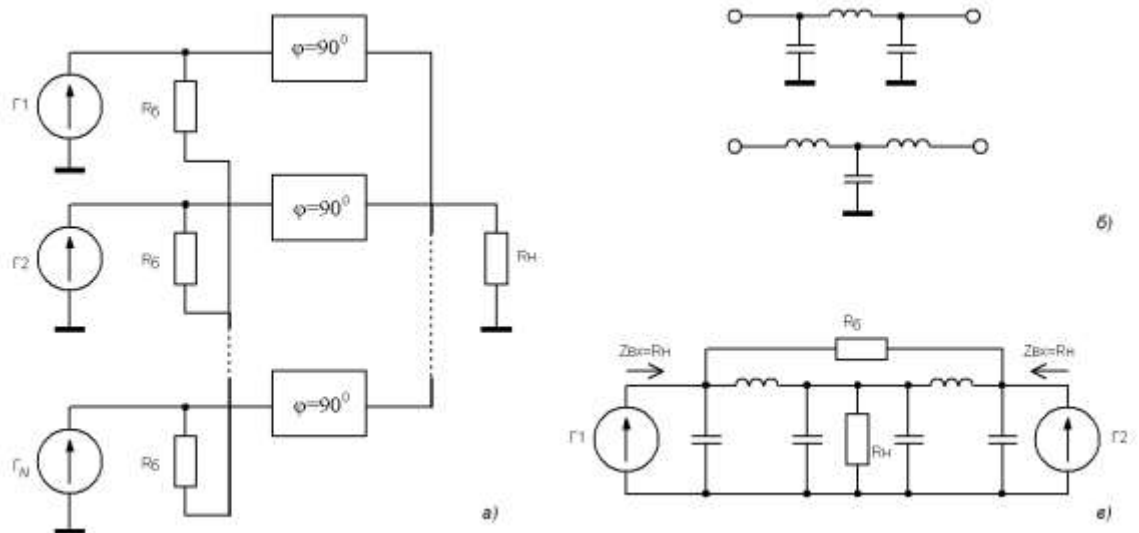


Рис. 8. Многолучевая схема сложения мощностей генераторов.

Четырехполюсники обеспечивают необходимую трансформацию сопротивлений и фазовый сдвиг на  $90^\circ$ . При этом токи всех генераторов суммируются в основной нагрузке  $R_H$  и компенсируются в балластных сопротивлениях  $R_\delta$ . В качестве фазосдвигающих четырехполюсников используются обычные фазосдвигающие цепочки (рис. 8,б). На рис. 8,в приведен вариант параллельного включения двух передатчиков.

В радиопередающих устройствах широко применяются квадратурные мостовые схемы сложения мощностей (рис. 9). В этом случае выходные напряжения генераторов  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  изначально сдвигаются по фазе на  $90^\circ$ . Обычно выбирают  $R_{BX1}=R_{BX2}=R_\delta=R_H=R$ , где  $R$  выбирается стандартным и равным, например, волновому сопротивлению подводящих линий (50 или 75 Ом). Квадратурный мост содержит два «продольных» четырехполюсника, обеспечивающих поворот фазы на  $90^\circ$  и трансформацию сопротивлений  $R_{BX}$  в  $R_H/2$  и два «поперечных» четырехполюсника, также обеспечивающих поворот фазы на  $90^\circ$  и трансформацию сопротивлений  $R_{BX}$  в  $R_H$  с коэффициентом 1:1. Напряжение генератора  $\Gamma_1$  опережает по фазе на  $90^\circ$  напряжение генератора  $\Gamma_2$ .

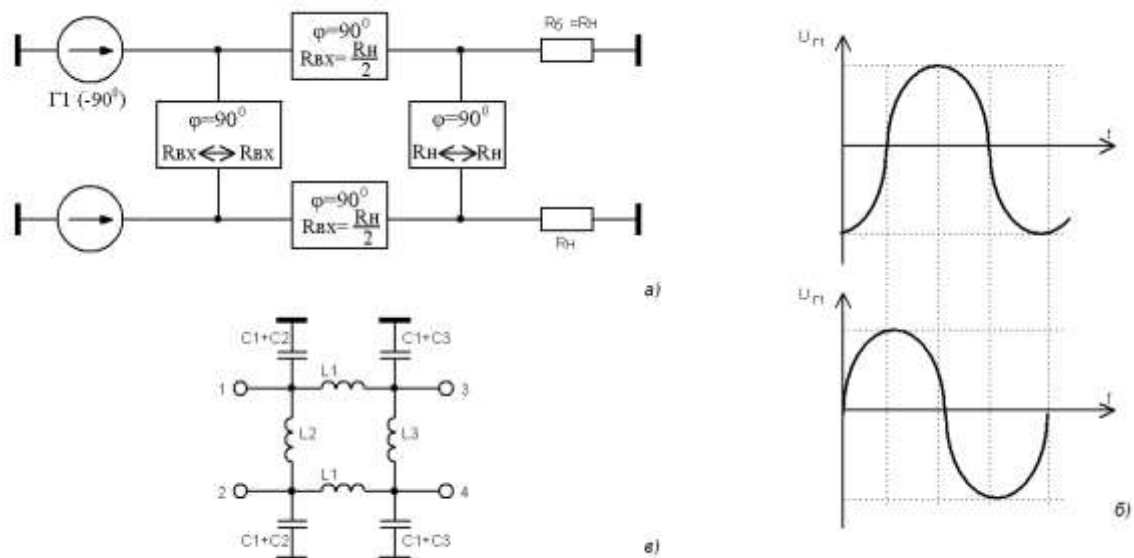


Рис. 9. Квадратурная схема сложения мощностей двух генераторов

Сигналы с обоих генераторов проходят через четырехполюсники по двум путям, так, что напряжение обоих генераторов суммируется в  $R_H$  и вычитаются в  $R_6$  и одновременно напряжение одного из генераторов отсутствует в точке подключения другого. Этим достигается их развязка. В качестве четырехполюсников используются П-фильтры, что позволяет объединить емкости соседних четырехполюсников.

### 3. Контрольные вопросы.

1. На вход усилителя сигнала, собранного по схеме рис.1 подается синусоидальное напряжение такой величины, чтобы обеспечить работу транзистора в пределах линейной части нагрузочной характеристики.

Нарисуйте форму напряжения на нагрузке при отключенном резисторе  $R1$ . Что необходимо сделать, чтобы обеспечить работу усилителя в режиме класса D?

2. Поясните, почему в нагрузочном контуре двухтактного усилителя отсутствуют четыре гармоники тока.

3. Зачем на входе и выходе транзисторов (при их групповом соединении) включают дополнительные индуктивности?

4. Объясните, каким образом происходит суммирование напряжений двух генераторов на нагрузке в схеме на рис. 7.

5. Объясните, почему отсутствует ток в балластном сопротивлении схемы, приведенной на рис. 9.