

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
«Высшая школа электроники и компьютерных наук»
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

Допустить к защите
Заведующий кафедрой
_____ Даровских С.Н.

“ ____ ” _____ 2017 г.

Расчет устройства сложения радиосигналов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – Д 11.03.02.2017.329.00 ПЗ

Научный руководитель:

Спицын В.С. _____

“ ____ ” _____ 2017 г.

Автор работы

студент группы КЭ-438

Волков А.О.

“ ____ ” _____ 2017 г.

Нормоконтролер

Спицына В.Д. _____

“ ____ ” _____ 2017 г.

РЕФЕРАТ

Волков А.О. Расчет устройства сложения радиосигналов – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ; 2017, с. 40, 21 илл., Библиогр. список– 8 наим, 2 листа приложений формата А1.

В данной дипломной работе описаны основные методы сложения мощностей радиосигналов. Рассмотрены общие модели устройств сложения, их преимущества и недостатки. Произведен расчет резонансного моста сложения по току.

					<i>ЮУрГУ – Д 210700.2017.329.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Волков А.О.</i>			<i>Расчет устройства сложения радиосигналов</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Спицын В.С.</i>					<i>3</i>	<i>40</i>
<i>Икон.</i>		<i>Спицына В.Д.</i>				<i>ЮУрГУ, кафедра ИКТ</i>		
<i>Утв.</i>		<i>Даровских С.Н.</i>						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Трансформаторные устройства сложения.....	9
1.1 Широкодиапазонные мостовые схемы.....	11
1.2 Устройства с одним магнитопроводом.....	13
1.3 Устройства с двумя магнитопроводами.....	15
1.4 Сложение мощностей двухтактных усилителей.....	16
1.5 Устройство попарного сложения мощности.....	18
2 Пространственное сложение мощности.....	19
3 Мостовые устройства на элементах.....	21
3.1 Резонансные мостовые схемы.....	24
3.2 Гибридные кольца.....	27
3.3 Квадратурные мосты.....	29
4 Расчет устройства сложения мощностей.....	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	40

ВВЕДЕНИЕ

В ряде случаев требуется строить генераторы и передатчики таких больших мощностей, которые не могут быть получены от одной или небольшого числа существующих типов ламп или транзисторов. Для этих целей иногда разрабатываются новые специальные лампы или транзисторы повышенной мощности. Однако такой путь не всегда является лучшим, потому что разработка и организация производства новых ламп и транзисторов обходятся дорого, надёжность их может быть невысокой, а потребность в них небольшой. Кроме того, существуют физические и технологические ограничения на создание более мощных приборов. Например, в настоящее время разработаны генераторные лампы на мощности до 0,5...3,0 МВт, а генераторные транзисторы – до 250...1000 Вт на частотах до 150...1000 МГц, и дальнейшее увеличение мощностей в несколько раз, а тем более на порядок, представляет трудную, практически невыполнимую задачу. В то же время включение большого числа ламп или транзисторов непосредственно параллельно или параллельно в каждом плече двухтактной схемы имеет целый ряд недостатков. Если же совершенствовать методы суммирования мощностей генераторных приборов, то во многих случаях это оказывается более экономичным и обеспечивает более надёжную работу устройства, например, при выходе из строя одного из приборов у остальных работа не прерывается.

Весьма значителен разброс параметров у транзисторов. Выравнивание (симметрирование) их нагрузки обычно осуществляется путем включения резисторов в цепи эмиттеров, что приводит к ухудшению энергетических показателей устройства. На повышенных частотах эта мера неприемлема из-за наличия индуктивности у соединительных проводов, поэтому на коротких, тем более ультракоротких волнах параллельное соединение транзисторов не применяется.

Гораздо меньше разброс параметров у электронных ламп. Поэтому параллельное соединение небольшого числа (2-3) мощных ламп практикуется и в настоящее время. При большом их числе возникают значительные трудности:

а) увеличение размеров соединительных проводов и устройства в целом усиливает его склонность к паразитному самовозбуждению и ухудшает нейтрализацию. Кроме того, из-за падения напряжений в соединительных проводах входные и выходные напряжения на лампах оказываются неидентичными по амплитуде и фазе, что приводит к понижению энергетических показателей генератора. Очевидно, с повышением рабочей частоты эти недостатки усугубляются;

Чтобы сделать аноды и сетки ламп эквипотенциальными, их иногда располагают по окружности, соединяя электроды между собой металлическими дисками. При этом однако, замена неисправной лампы сильно затрудняется;

б) в электронных приборах, работающих при высоких напряжениях, иногда возникают пробой и вспышки газа, создающие короткое замыкание для источников питания и колебательных цепей. Лампы с сеточным управлением могут, кроме того, выйти из строя из-за касания сетки с катодом, создающего короткое замыкание для сеточных цепей. Защита от упомянутых коротких замыканий должна быть весьма быстродействующей, так как в отличие от электрических машин электронные приборы (особенно полупроводниковые) не терпят кратковременной перегрузки.

Для уменьшения трудностей параллельного соединения генераторных приборов и повышения надежности работы устройства его стали строить, начиная с 30-х годов, в виде нескольких блоков меньшей мощности, каждый из которых содержит приемлемое число генераторных приборов, входную и выходную колебательные согласующие цепи, связанные, в свою очередь, с общими ВЧ возбудителем и нагрузкой. На практике получили применение три метода суммирования мощностей блоков.

Основными параметрами МУ являются:

а) Количество N развязанных генераторов (источников) или нагрузок;

б) Коэффициент деления мощности k . При $N > 2$, как правило, $m = 1$;

в) Мощность (P) источников суммируемых мощностей или источника в режиме деления. Она определяет габариты элементов МУ и балластных нагрузок, а также в некоторой степени предопределяет выбор типа МУ;

г) Номинальные сопротивления входов. Обычно МУ связывается с источниками и нагрузками посредством фидеров (кабелей, линий) и с волновыми сопротивлениями W последних согласуются номинальные входные сопротивления (R). Нередко реальное входное сопротивление отличается от номинального R и на выходе возникает отражение, о котором судят по коэффициенту отражения.

д) Степень развязки или просто развязка между входами МУ. Ее определяют следующим образом: к одному из развязываемых входов подключается источник с внутренним сопротивлением, равным номинальному для данного входа, к остальным ($N - 1$) входам - резисторы с номинальными для входов сопротивлениями.

е) Диапазонные (полосовые) свойства. Они определяются в соответствии с допустимыми изменениями коэффициента отражения, величины развязки и коэффициента деления мощности. У разных типов МУ частотные свойства проявляются неодинаково. Так, например, у МУ, построенном из отрезков двухпроводных линий одинаковой длины l , развязка в принципе частотно-независима, однако входные сопротивления сильно изменяются с частотой. МУ на отрезках связанных линий отличаются широкополосными развязкой и согласованием, но у них частотно-зависимым является коэффициент деления мощности.

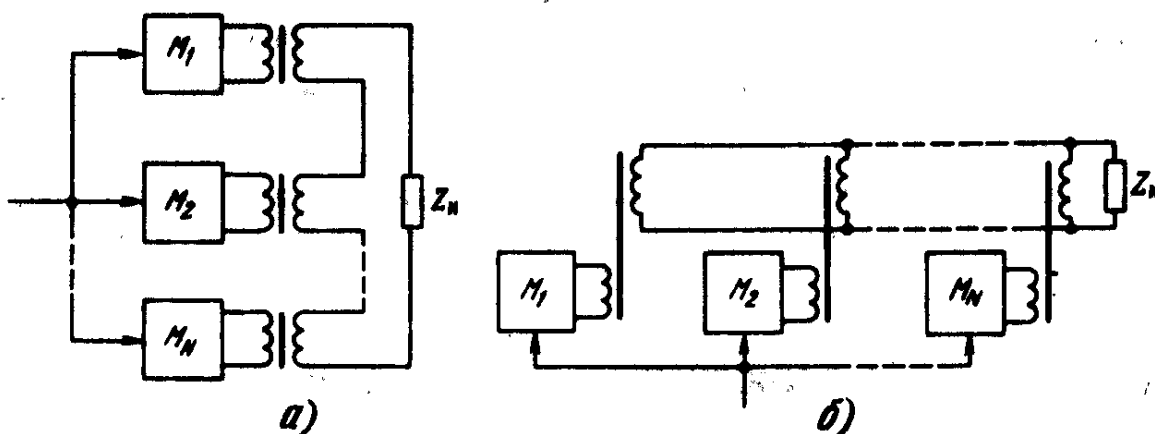
Наиболее широкополосными являются трансформаторные мосты, однако они ограничены по частоте и мощности. Полосовые свойства МУ на отрезках линий и элементах с сосредоточенными постоянными удается улучшить, сделав их многосекционными. Два реактивных плеча выполняются из нескольких

секций. Эти секции соединяются между собой резисторами, выполняющими в совокупности функции балластной нагрузки.

ж) Надежность работы МУ, являющегося необслуживаемым устройством, естественно, должна быть весьма высокой. При проектировании мощных устройств возникает вопрос о выборе номинальной мощности балластных нагрузок. Если исключить из рассмотрения возможность противофазного подключения одного из генераторов, но потребовать, чтобы при любых отключениях генераторов ни один из балластных резисторов не оказался перегруженным, то в случае многополюсного моста суммарная номинальная мощность балластной системы может превысить суммарную мощность (NP) генераторов. Учитывая неодинаковую вероятность отключений разных сочетаний генераторов, способность резисторов выдерживать некоторую перегрузку и возможности их защиты, можно сделать балластную систему менее громоздкой.

1 Трансформаторные устройства сложения

Можно осуществлять сложение мощностей нескольких ВЧ генераторов, выполненных в виде идентичных модулей M_1, \dots, M_N и подключаемых параллельно либо последовательно с помощью широкодиапазонных трансформаторов (см. рисунок 1) или резонансных ЦС к общей нагрузке Z_H .



а) последовательное соединение

б) параллельное соединение

Рисунок 1 – Блочное модульное сложение по мощности

Однако при таком суммировании сохраняются недостатки параллельного и двухтактного включений ламп и транзисторов: требуются идентичность и синфазность работы отдельных генераторов и

симметрия схемы, сохраняется взаимное влияние и, значит, резко снижается надежность работы всего устройства. В частности, авария в одном из генераторов или модулей (короткое замыкание или разрыв на его выходных клеммах) может привести к аварийному режиму работы всех остальных, поскольку нагрузка на них может стать близкой к нулю или холостому ходу. Поэтому такой способ сложения используется сравнительно редко, например, при построении сверхмощных относительно низкочастотных транзисторных

генераторов, в которых при работе транзисторов в ключевом режиме с высоким КПД обеспечивается высокая надежность, а разброс параметров транзисторов сводится к минимуму.

Система взаимосвязанных блоков, однако, обладает рядом существенных недостатков, обусловленных именно взаимосвязью между блоками через общий нагрузочный контур:

а) изменение величины связи блока с нагрузочным контуром отражается на нагрузке R_H и режиме работы других блоков. Гораздо большие осложнения возникают в случае прекращения работы электронных приборов блока из-за отсутствия ВЧ возбуждения, перегорания катода, выключения источника питания и т. д. При этом контур неисправного блока, будучи связанным с нагрузочным контуром, превращается в потребителя мощности последнего. Так как он имеет высокую добротность и настроен в резонанс, то в нем резко увеличивается ток (особенно в последовательной схеме) и возникают опасные перенапряжения на контурных и нейтральных конденсаторах, в катушках индуктивности и др. Во избежание серьезной аварии аппаратуры контура должна быть предусмотрена ее автоматическая быстродействующая защита;

б) по мере повышения частоты и увеличения мощности, а, следовательно, и размеров блоков становится труднее обеспечить идентичные условия их работы-одинаковое и синфазное возбуждение и одинаковую связь с нагрузочным контуром. При несинфазном ВЧ возбуждении блоки работают как бы на расстроенную нагрузку, вследствие чего понижаются их энергетические показатели. Неидентичность связи с нагрузочным контуром обусловлена: у последовательной схемы емкостными связями с катушками, находящимися под разными потенциалами относительно земли, у параллельной схемы - индуктивностью монтажных шин.

1.1 Широкодиапазонные мостовые схемы

Для практического применения схема оказывается непригодной, поскольку, во-первых, содержит по два нагрузочных и балластных резистора и, во-вторых, даже при соединении с корпусом одной из точек схемы оказываются не соединенными с корпусом один из генераторов и по одному из нагрузочных и балластных резисторов.

Включением дополнительных трансформаторов, осуществляющих переход от симметричной к несимметричной нагрузке, можно соединить с корпусом второй генератор и вторые нагрузочный и балластный резисторы. Одновременно можно объединить в один нагрузочный и один балластный резисторы. При этом возможно большое многообразие вариантов построения мостовых схем. Рассмотрим только наиболее простые из них, содержащие наименьшее число трансформаторов.

На рисунке 2 показаны мостовые схемы на трансформаторах 1:1 с магнитной связью и суммированием по напряжению. Трансформатор Tr_1 , подключает к резистору R_H последовательно или параллельно оба генератора в фазе. Наоборот, через трансформатор Tr_2 оба генератора подключаются к резистору R_6 в противофазе, и при равенстве $U_{r1}=U_{r2}$

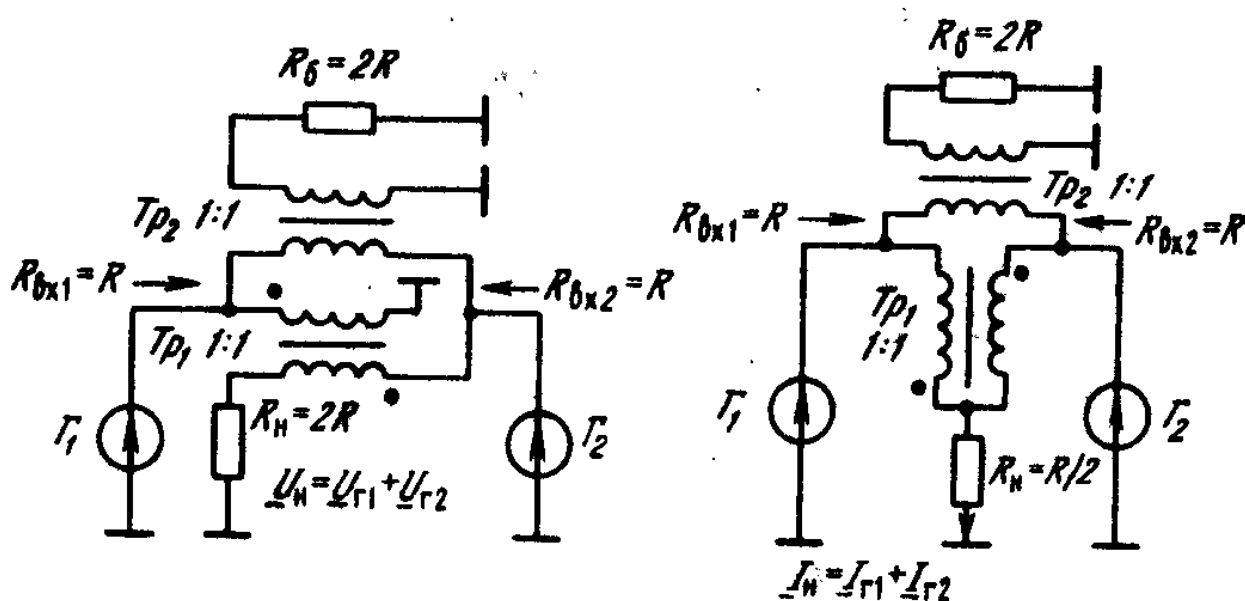
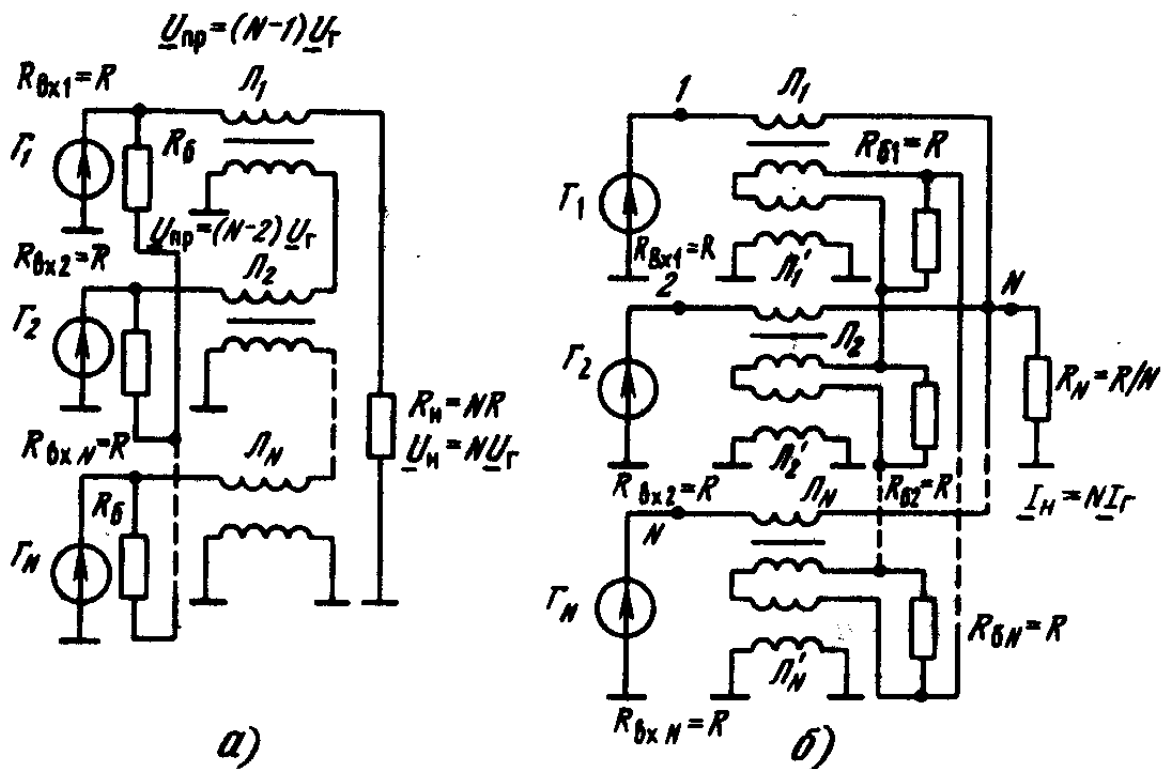


Рисунок 2 – Широкодиапазонные мостовые схемы

в нем не выделяется мощность. При соответствующих значениях R_H и R_6 напряжение от одного из генераторов не поступает на выход другого. Тем самым обеспечивается их взаимная независимость в работе, т. е. условие баланса моста.

На рисунке 3 показаны мостовые схемы для $N \geq 2$ идентичных генераторов на трансформаторах - линиях 1:1 со сложением по напряжению. В первой схеме балластные сопротивления включены по схеме многолучевой, а во второй - по схеме многоугольника. В схеме сложения по напряжению происходит повышение нагрузочного сопротивления ($R_H = NR_{BX}$), что очень важно, например, при построении, например, транзисторных генераторов. В то же время продольные напряжения на линиях оказываются неодинаковыми (наибольшее из них - на первой линии $U_{np} = (N-1)U_r$).



- а) по напряжению
- б) по току

Рисунок 3 - Широкодиапазонные мостовые схемы N генераторов

В мостовой схеме сложения по току в номинальном режиме продольные напряжения на линиях отсутствуют, и появляются они относительно малой величины только в аварийных режимах – при не идентичности генераторов и выходе из строя одного из них. Это, в свою очередь, снижает требования к ферритовым сердечникам. Главным недостатком такой схемы суммирования является снижение нагрузочного сопротивления $R_n = R_{вх} / N$.

Мостовые схемы на трансформаторах с магнитной связью или на трансформаторах-линиях обычно выполняют при достаточно больших нагрузочных сопротивлениях (выше 10...20 Ом) в диапазоне частот примерно от 0,1 до 1000 МГц при уровнях мощности до 10...20 кВт. Наряду с указанными схемами в радиопередающих устройствах при построении как мощных ламповых передатчиков ДВ и СВ, так и передатчиков в диапазонах УКВ и особенно СВЧ, где обычно требуются небольшие коэффициенты перекрытия по частоте, широко используются резонансные узкополосные мостовые схемы.

1.2 Устройства с одним магнитопроводом

Рассмотрим устройство на рисунке 4. Продольное напряжение на его линии указано в предположении, что не сказывается шунтирующее действие индуктивности намагничивания, а электрические длины линий синфазной и противофазной волн еще малы, эти условия принимаются для всех устройств сложения и деления мощности.

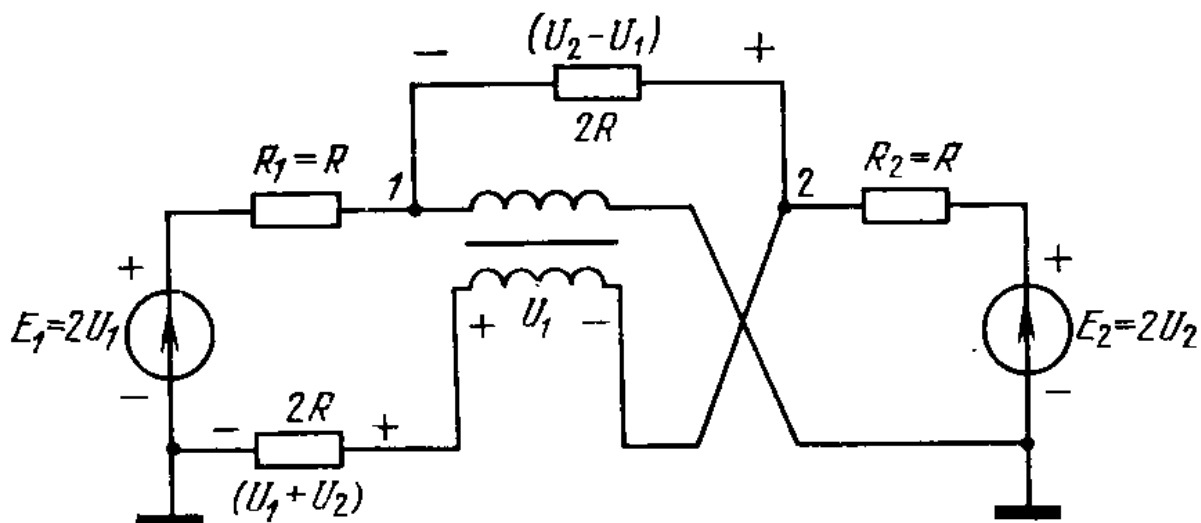


Рисунок – 4 Простейшее устройство сложения мощности

В области нижних частот входы 1 и 2 полностью развязаны, причем вход 2 согласован, а коэффициент отражения на входе 1 равен

$$S = -(1 + \frac{j2\omega L}{R})^{-1}. \quad (1)$$

Достоинством устройства (см. рисунок 5) является равенство нулю предельного напряжения при сложении равных мощностей синфазных колебаний и соответственно отсутствие потерь в магнитопроводе. При выходе из строя (или отключении одного источника) продольное напряжение составит половину напряжения на входе устройства.

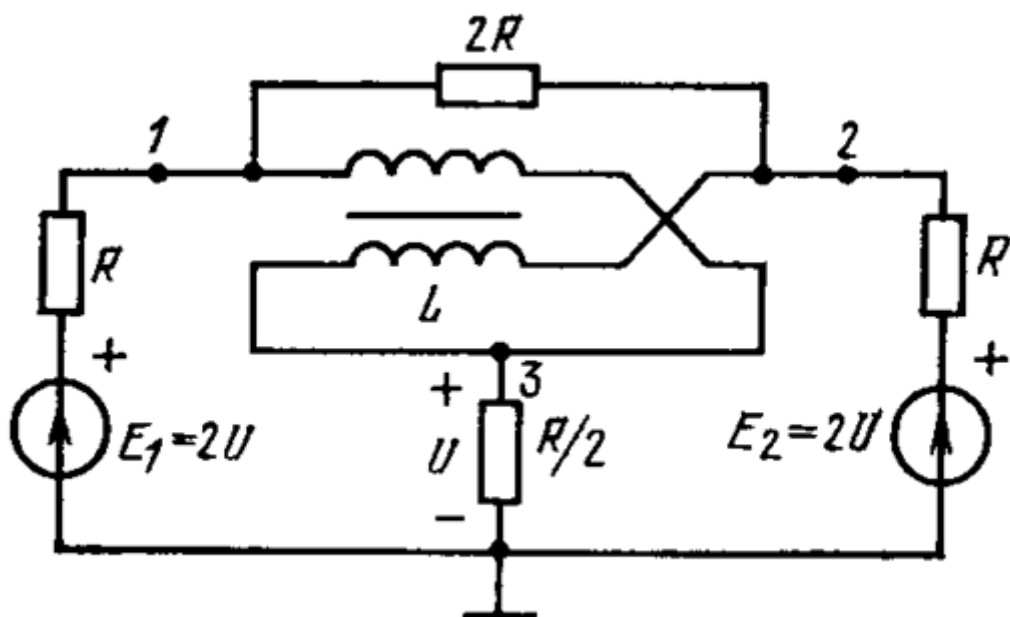


Рисунок 5 – Простейшее симметричное устройство

1.3 Устройства с двумя магнитопроводами

При двух магнитопроводах можно решить следующие задачи:

- а) сложение равных мощностей синфазных источников с изменением полярности напряжения на нагрузке;
- б) создание устройств с четырьмя несимметричными относительно земли входами и согласованно-развязанных в области верхних частот;
- в) суммирование равных мощностей двухтактных каскадов с ослаблением синфазных составляющих за счет сильной магнитной связи.

Рассмотрим схему на рисунке 6. В ней происходит возрастание продольных напряжений и ухудшается развязка между входами 1 и 2 в области нижних частот. Для обеспечения полной развязки следует включить индуктивность L параллельно развязывающему резистору $2R$ и тогда полная шунтирующая индуктивность на входе 1 равна $L/3$, а на входе 2 равна $L/2$.

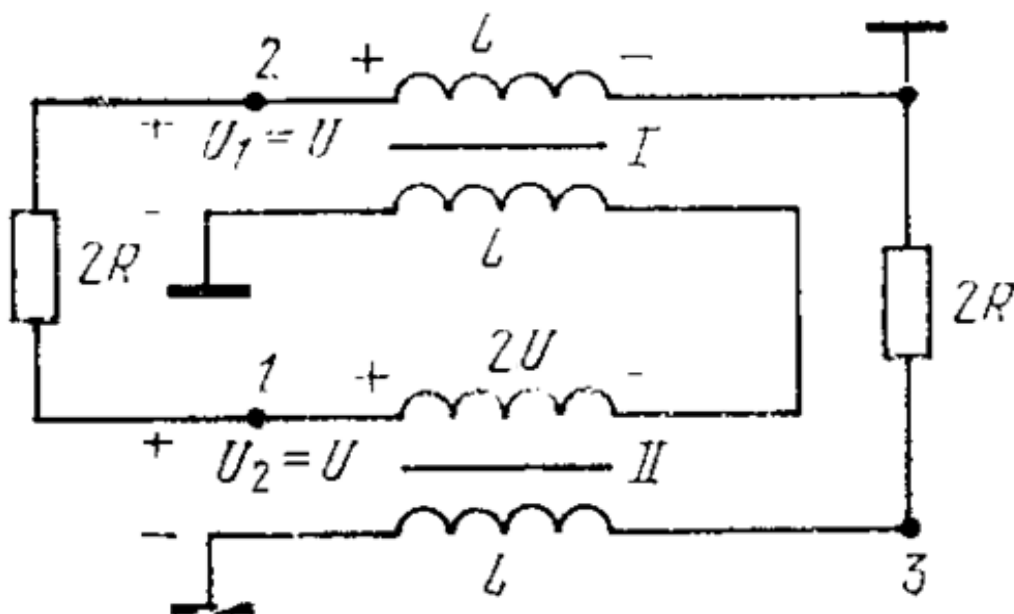


Рисунок – 6 Устройство с изменением полярности к общей нагрузке

1.4 Сложение мощности двухтактных усилителей

Возможны различные варианты построения устройств сложения мощности двухтактных усилителей класса В с подавлением четных гармоник в каждом из них. Переход к одноклапному выходу осуществляется либо в каждом усилителе, после чего их мощности складываются, либо с помощью одного симметрирующего ТЛ на выходе симметричного устройства сложения или совмещенного с ним.

Устройства сложения двухтактных усилителей, решают одновременно три задачи: подавление четных гармоник, суммирование мощности и переход к несимметричной нагрузке. Они имеют несколько худшие характеристики, чем в случае решения этих задач отдельными устройствами, но более компактные конструкции. Предварительно рассмотрим схему рисунке 7 для сложения мощности двух одноклаптных усилителей.

Для образования двухтактных входов достаточно добавить два проводника (две обмотки) для противофазных плеч (см. рисунок 8) и благодаря сильной связи между ними обеспечить подавление четных гармоник. В отличие от

схемы на рисунке 7 это приведет в рабочем режиме к дополнительной емкостной реакции. В остальном на интервале значений X , где развязка велика, а рассогласование мало, эти параметры, а также к.п.д. в режиме сложения (или деления) близки к таковым для схемы на рисунке 7, которую значительно проще анализировать в области верхних частот.

В области нижних частот параметры обеих схем очевидны, входы 1-2 и 3-4 полностью развязаны между собой, причем каждый из первых двух шунтирован индуктивностью соответствующего ТЛ, а коэффициенты отражения одинаковы на всех входах.

Для области верхних частот применительно к схеме (см. рисунок 7) можно считать, что средний полосковый проводник каждого ТЛ является экраном между крайними проводниками. Последними могут служить также внутренние проводники коаксиальных кабелей, а их спаренные внешние проводники образовывать средний проводник каждого ТЛ.

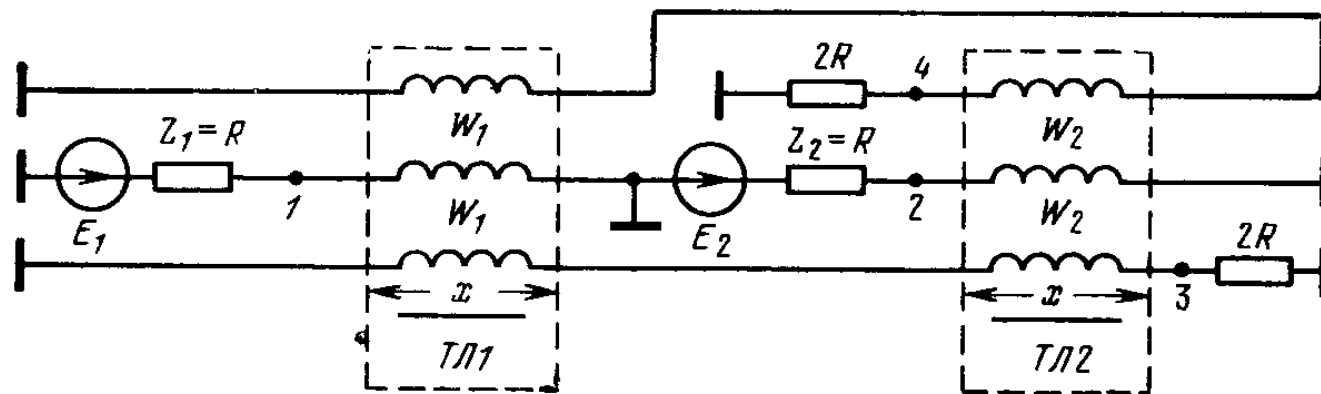


Рисунок 7 – Схема устройства сложения мощности

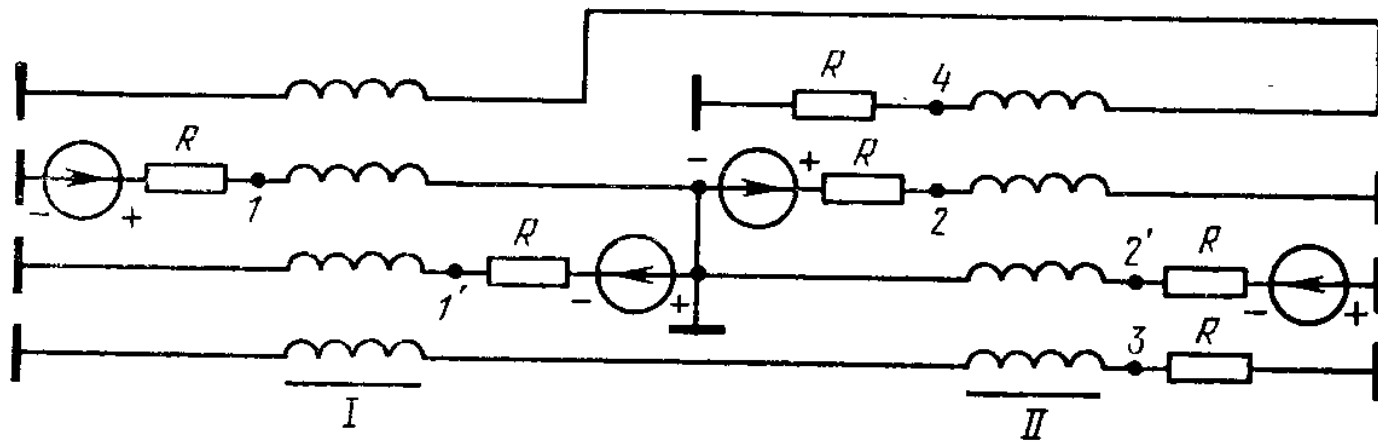


Рисунок 8 – Схема устройства со связанными плечами двухтактных входов

1.5 Устройства попарного сложения мощности

Широко распространены устройства попарного (двоичного) соединения простых составляющих. В качестве этих составляющих применимы устройства, рассмотренные ранее.

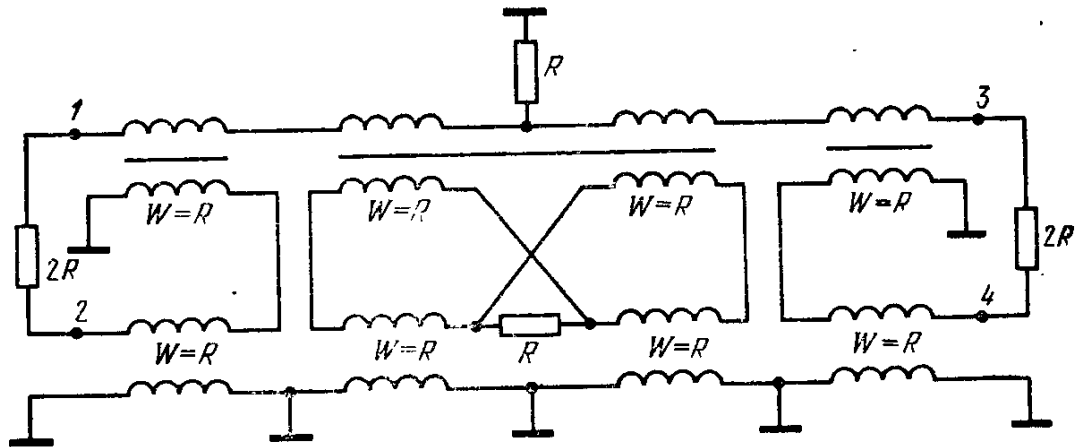


Рисунок 9 – Схема попарного сложения мощности

В целом, при попарном соединении идентичных устройств присущие им недостатки, как правило, усугубляются с ростом числа ступеней. Ослабить их можно, если использовать в разных ступенях различные устройства. Так, устройство (см рис. 9) имеет волновые сопротивления единого номинала и лучшие характеристики, чем при использовании только схем. Этот принцип можно распространить на произвольное число ступеней k . При этом волновые сопротивления всех линий одинаковы и равны величинам всех развязывающих сопротивлений (кроме соединяющих попарно входы), а также входным сопротивлениям в рабочем режиме для области верхних частот. Этой же единой величине равно сопротивление общей нагрузки при четных k и удвоенному значению ($R_n = 2W$) при нечетных k .

2 Пространственное сложение мощностей

Сложение мощностей можно осуществлять в пространстве при работе двух или более автономных передатчиков на одной частоте от одного возбуждителя на разные антенны. В этом случае происходит сложение электромагнитных полей, создаваемых антеннами. Для ослабления связи между передатчиками, точнее между их выходными каскадами через антенны, последние располагают на расстоянии не менее $3\lambda/4$ одна от другой. При этом антенны должны питаться синфазными токами. Если вводить некоторую разность фаз в токи, питающие антенны, то можно изменять (поворачивать) диаграмму излучения антенн. Введением специальных фазовращателей (см. рисунок 10) можно поворачивать диаграмму направленности излучения.

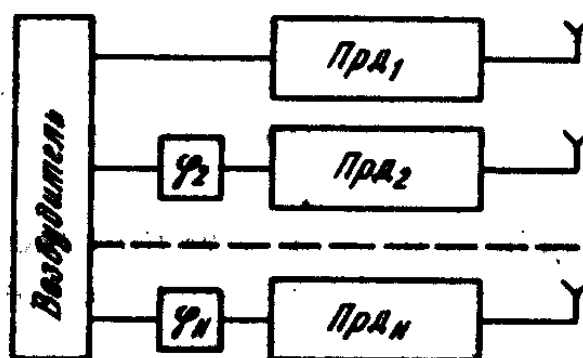


Рисунок 10 – Структурная схема сложения ВЧ мощности в пространстве

В диапазонах ДВ и СВ из-за больших геометрических размеров антенн ограничиваются сложением мощностей, как правило, не более двух передатчиков. В диапазоне КВ такой способ повышения излучаемой мощности и изменения диаграммы направленности используется широко. Например, четыре передатчика мощностью по 1 кВт при расстановке штыревых антенн на 5 м и соответствующем фазировании эквивалентны одному передатчику мощностью 16 кВт. На радиопередающих центрах внедрено в эксплуатацию пространственное сложение четырех передатчиков мощностью 250 кВт каждый.

В диапазоне сантиметровых волн, где геометрическая длина отдельных элементарных полуволновых вибраторов и расстояния между ними получаются небольшими, а ВЧ генераторы на полупроводниковых приборах при уровне мощности 1... 10 Вт имеют малые габаритные размеры, удается в небольшом объеме на малой площади установить до 100... 1000 отдельных ВЧ генераторов и антенн. Тем самым колебательная мощность повышается на два-три порядка при высокой надежности, поскольку выход из строя единиц и даже десятков отдельных ВЧ генераторов незначительно сказывается на работе такого передатчика и снижении его мощности.

Введением соответствующей фазировки отдельных ВЧ генераторов формируется узкая, поворачивающаяся в широких пределах диаграмма направленности. Такие устройства принято называть фазированными антенными решетками. Недостатками системы сложения мощностей в пространстве являются: ограничения в выборе вида антенной системы, большое количество фидеров, зависимость результирующей полярной диаграммы от числа работающих блоков, а также от соотношения амплитуд и фаз между токами в парциальных антеннах. Последний недостаток для некоторых применений (например, для антенных фазированных решеток) можно рассматривать как достоинство.

3 Мостовые устройства на элементах

В современных радиопередающих устройствах различных диапазонов волн широкое применение получил метод сложения мощности с помощью мостовых схем. В этом случае при суммировании мощностей двух и более генераторов обеспечивается их взаимная электрическая развязка. Каждый из генераторов работает независимо от других на оптимальную для него нагрузку, в то время как у остальных генераторов режим по ВЧ может меняться вплоть до короткого замыкания или холостого хода. Вследствие этого достигается высокая надежность передатчика. Даже в тех случаях, когда заданную мощность можно получить от одного ЭП, передатчик часто выполняют в виде нескольких менее мощных ВЧ генераторов или модулей с последующим суммированием их мощностей в мостовых схемах. При этом выход из строя M генераторов (аварийный режим) не нарушает работу остальных $N - M$ и только уменьшает мощность передатчика. Снижение мощности происходит по формуле (2):

$$P_{\text{н}} = \frac{(N-M)^2}{N} P_i . \quad (2)$$

Объясняется тем, что часть мощности оставшихся $N-M$ генераторов начинает выделяться в балластных сопротивлениях мостовой схемы. По условиям эксплуатации обычно допускается некоторое кратковременное снижение выходной мощности передатчика. Наиболее вероятен выход из строя одного из генераторов ($M = 1$), поэтому уменьшение мощности передатчика будет в $(N-1)^2/2$ раз. Исходя из этих соображений можно определить необходимое число модулей N и мощность каждого из них определяется по формуле (3):

$$P_{\text{мод}} = P_{\text{н ном}}/N. \quad (3)$$

Например, если допустима работа с понижением мощности до 50 %, то достаточно, чтобы передатчик содержал четыре модуля, поскольку $(4-1)^2/4^2 = 0,56$. Часто, например, при построении телевизионных и УКВ ЧМ передатчиков последний строится в виде двух полукомплектов. При выходе одного из них мощность передатчика должна была бы снизиться 4 раза $(2 - 1)^2/2^2 = 0,25$. Однако предусматривается схема обхода моста, поэтому мощность в нагрузке снижается всего в 2 раза. Одновременно обход моста позволяет устанавливать его балластное сопротивление на рассеиваемую мощность, существенно меньшую $0,25 P_{н ном}$.

Принцип работы и свойства мостовой схемы рассмотрим на примере суммирования мощностей двух идентичных синфазных генераторов Γ_1 и Γ_2 . Классическая мостовая схема, приведенная на рис. 3.37, содержит четыре резистивных нагрузочных сопротивления. При $R_1/ R_3 = R_2/ R_4$ выполняется условие баланса моста, т. е. напряжение от одного из генераторов не поступает на выход другого, и генераторы работают независимо друг от друга. При равенстве $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ генераторы нагружены на сопротивлениях $Z_{вх1} = R$ и $Z_{вх2} = R$. Токи обоих генераторов $I_1 = U_1/2R$, $I_2 = U_2/2R$ суммируются в двух нагрузочных сопротивлениях $R_n = R$ и вычитаются в двух балластных сопротивлениях $R_6 = R$. В результате мощности, выделяющиеся в нагрузочных и балластных резисторах, находятся по формулам (4) и (5):

$$P_n = 0,5|I_1 + I_2|^2 R_n, \quad (4)$$

$$P_6 = 0,5|I_1 - I_2|^2 R_6. \quad (5)$$

Если $I_1=I_2$, то вся мощность поступает в полезную нагрузку. В общем случае, когда $I_1 \neq I_2$, КПД моста, равный отношению мощности в нагрузке к суммарной мощности, определяется отношением (6)

$$\eta_m = \frac{P_n}{(P_n + P_6)} = (1 + k^2 + 2k \cos \varphi) / 2(1 + k^2), \quad (6)$$

где $k = |I_1|/|I_2|$; φ - фазовый сдвиг между токами двух генераторов. На основании этого соотношения, справедливого и для других рассмотренных ниже мостовых

схем, на рисунке 11 построены графики зависимости КПД от k и φ соответственно.

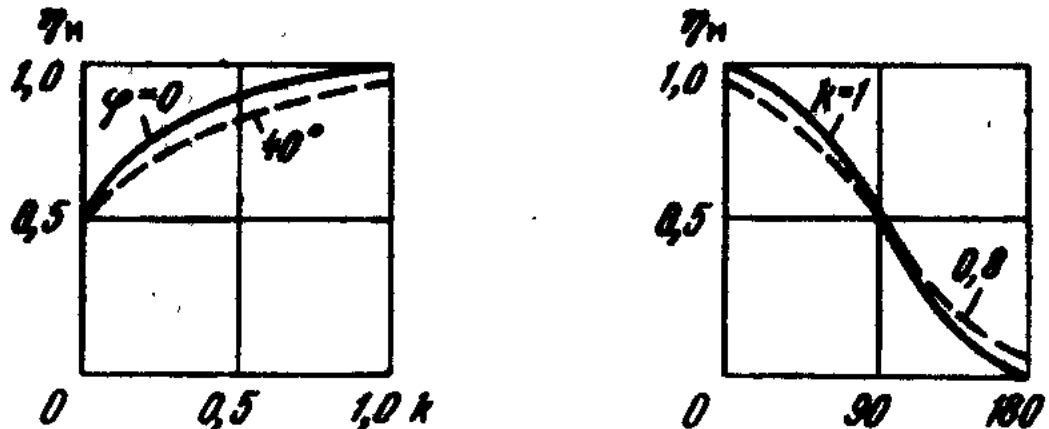


Рисунок 11 – Зависимость КПД моста сложения

Видно, что КПД мостовой схемы остается высоким даже в том случае, когда токи неточно равны по амплитуде и неточно синфазны. Если амплитуды различаются не более чем на 20%, а сдвиг фаз не превышает 40° , КПД снижается до 0,87, т. е. только 13 % суммарной мощности теряется на сопротивлении R_6 .

Отметим, что при $\varphi = 180^\circ$ - противофазной работе двух генераторов - сопротивления R_n и R_6 меняются «ролями». Наихудшим случаем является отключение одного из генераторов, что приводит к уменьшению КПД до 0,5, а мощности в нагрузке в 4 раза, так как половина мощности второго работающего генератора выделится в балластном резисторе. Поэтому при выключении одного из генераторов целесообразно, особенно в мощных устройствах, переключить второй работающий генератор с моста сложения непосредственно на нагрузку, с тем чтобы избежать потери мощности в балластном резисторе. Обычно это делается автоматически с помощью системы обхода моста.

3.1 Резонансные мостовые схемы

Принцип построения резонансных мостовых схем удобно рассматривать на примере сложения мощности N идентичных синфазных генераторов. Общая структурная схема на рисунке 6 содержит N одинаковых четырехполюсников и N балластных резисторов $R_6=R_{вх}$, включенных по схеме многолучевой звезды. Четырехполюсники обеспечивают необходимую трансформацию сопротивлений NR_H в $R_{вх}$ и фазовый сдвиг на 90° . При этом токи всех генераторов суммируются в основной нагрузке R_H и компенсируются в балластных резисторах R_6 . При резистивных нагрузке R_H , входных $R_{вх}$ и балластных R_6 сопротивлениях в качестве четырехполюсников можно использовать П- или Т-цепочки на LC-элементах (см. рисунок 12) с одинаковыми по модулю реактивными сопротивлениями: $X = X_L = \omega_0 L = |X_C| = 1/\omega_0 C$, где ω_0 - рабочая частота.

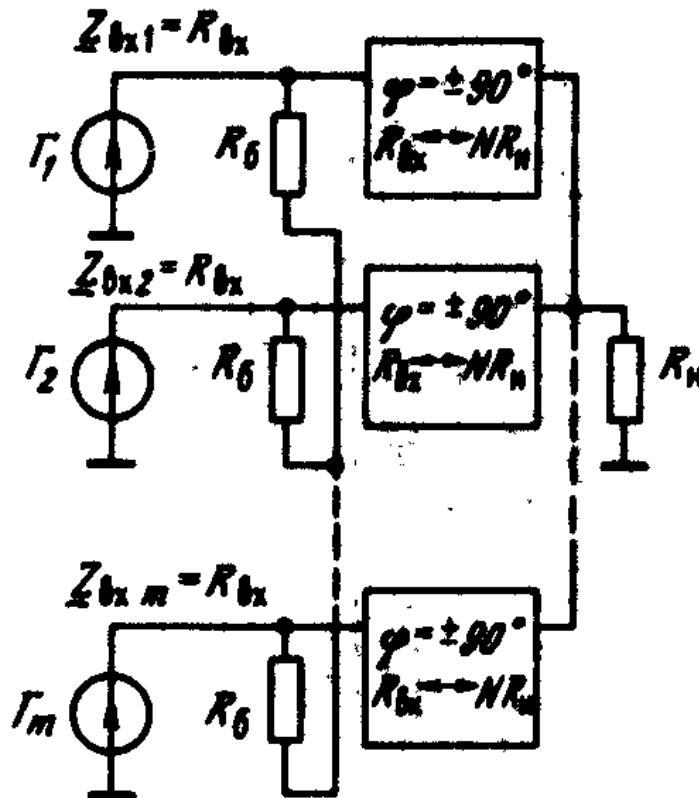
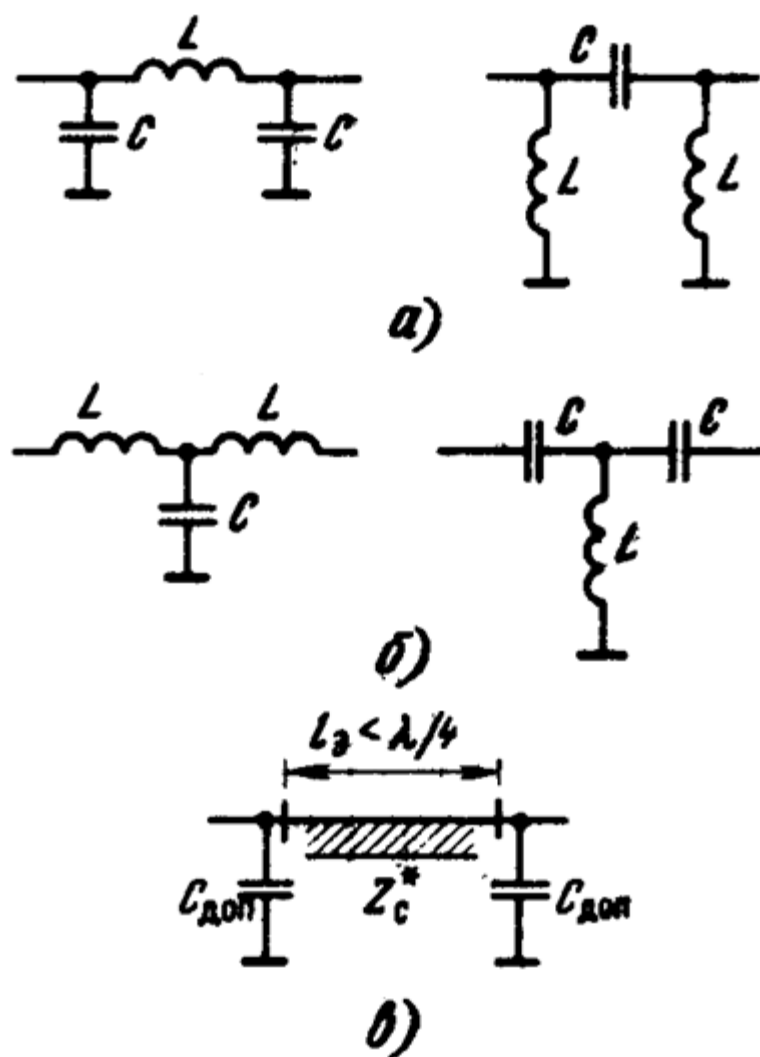


Рисунок 12 – Резонансный мост сложения по току



- а) П- цепи
- б) Т- цепи
- в) Полосковая реализация

Рисунок 13 – Схемы трансформирующих цепочек

С позиции дополнительной фильтрации высших гармоник ВЧ генераторов, а также практической реализации LC-элементов в микрополосковом исполнении на УКВ и СВЧ предпочтительнее четырехполюсники в виде ФНЧ (см. рисунок 13). В качестве них можно использовать также четвертьволновые отрезки длинных линий с электрической длиной $l_3 = \lambda/4$ с волновым сопротивлением $Z_c = X$. Если геометрическая длина получается большой, линию можно укоротить ($l_3 < \lambda/4$), а на ее входе и выходе параллельно включить дополнительные сосредоточенные конденсаторы $C_{доп}$. В этом случае

волновое сопротивление линии Z_c^* и реактивное сопротивление $X_{\text{доп}}$ дополнительных конденсаторов определяются из соотношений.

Отметим что произвольное соотношение между входными и нагрузочными сопротивлениями ($R_{\text{вх}} = R_6$ и R_n) достигается соответствующей трансформацией в четырехполюсниках, т. е. выбором значений X или Z_c . Однако для наибольшей широкополосности надо выбирать коэффициент трансформации равным единице. При этом $X=Z_c=R_{\text{вх}}=R_6$ и $R_n=R_{\text{вх}}/N$.

Важным практическим примером являются мостовые схемы для суммирования мощностей двух одинаковых генераторов ($N=2$). Обычно мост строится при одинаковых входных и нагрузочных сопротивлениях ($R_{\text{вх1}} = R_{\text{вх2}} = R_n = R$). Тогда на основании реактивные сопротивления LC-элементов или волновое сопротивление четвертьволновых линий определяются, как $X = Z_c = \sqrt{2}R$.

На рисунке 14 показаны две схемы. Первую из них, выполненную на четырехполюсниках из П-цепочек, широко используют для сложения мощностей в передатчиках ДВ и СВ диапазонов, построенных в виде двух полуккомплектов. В тоже время схема на рисунке 15 применяется в диапазоне УКВ-СВЧ, где геометрическая длина линий оказывается небольшой.

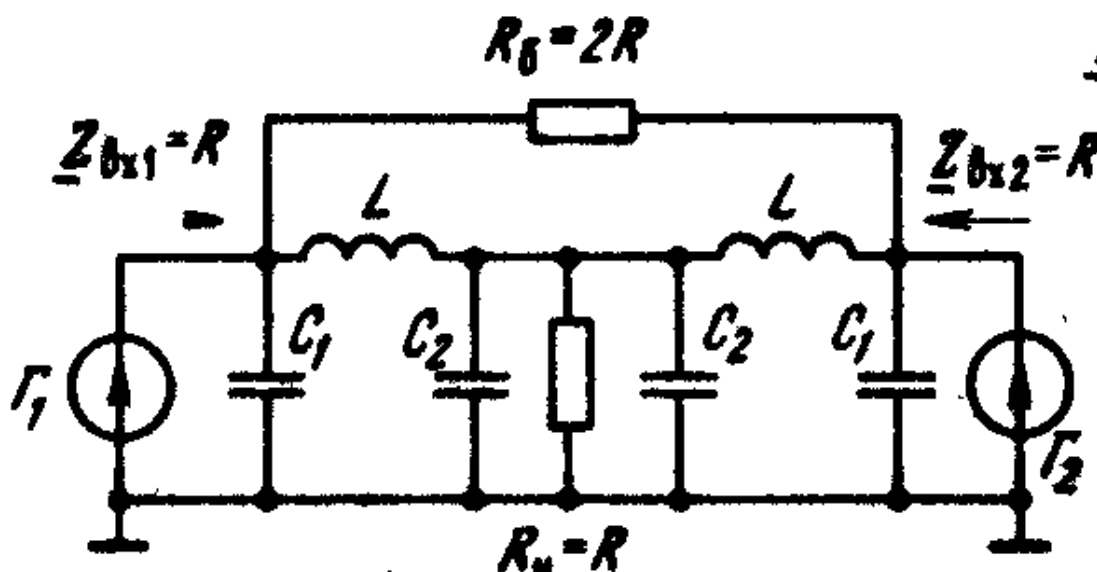


Рисунок 14 – Мост на четырехполюсниках из П-цепочек

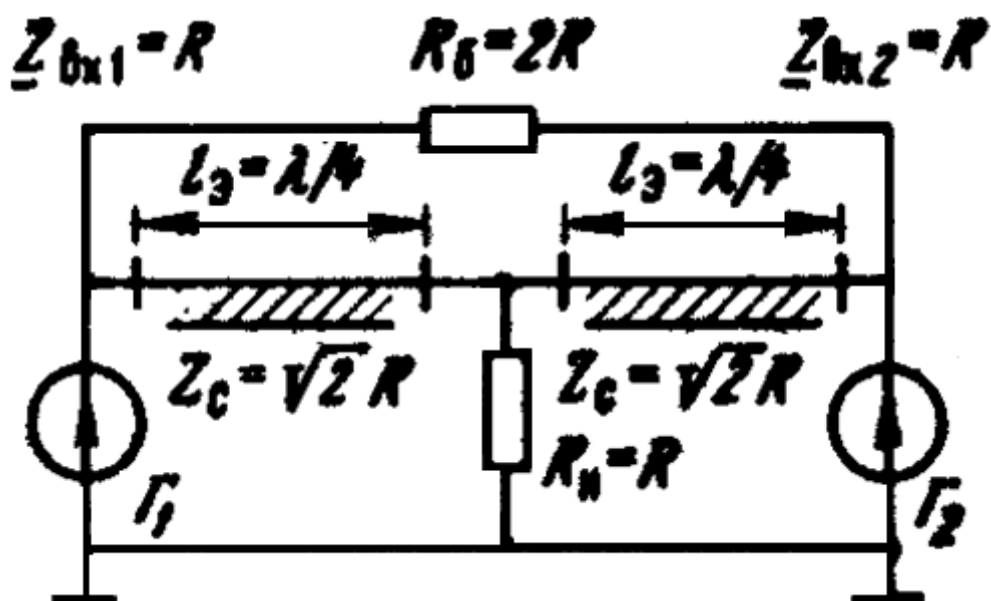


Рисунок 15 – Мост на микрополосковых линиях

При построении мощных передатчиков целесообразно, чтобы балластный резистор, в котором при отклонениях от номинального режима может рассеиваться значительная мощность, был соединен с корпусом. Это позволяет его отнести в сторону от основной схемы и лучше охлаждать.

3.2 Гибридные кольца

На низких частотах R_6 подключают через дополнительный трансформатор, как в схемах. В схеме на рисунке 9, он подключается через дополнительные линии, как показано на рисунке 16. Такую мостовую схему на: УКВ - СВЧ называют гибридным кольцом. В отличие от исходной схемы, которую называют гибридным тройником, здесь добавлены еще две линии длиной $\lambda/4$ и $3\lambda/4$ с таким же волновым сопротивлением. Таким образом, все четыре линии образуют кольцо (или прямоугольник) общей длиной $3\lambda/2$.

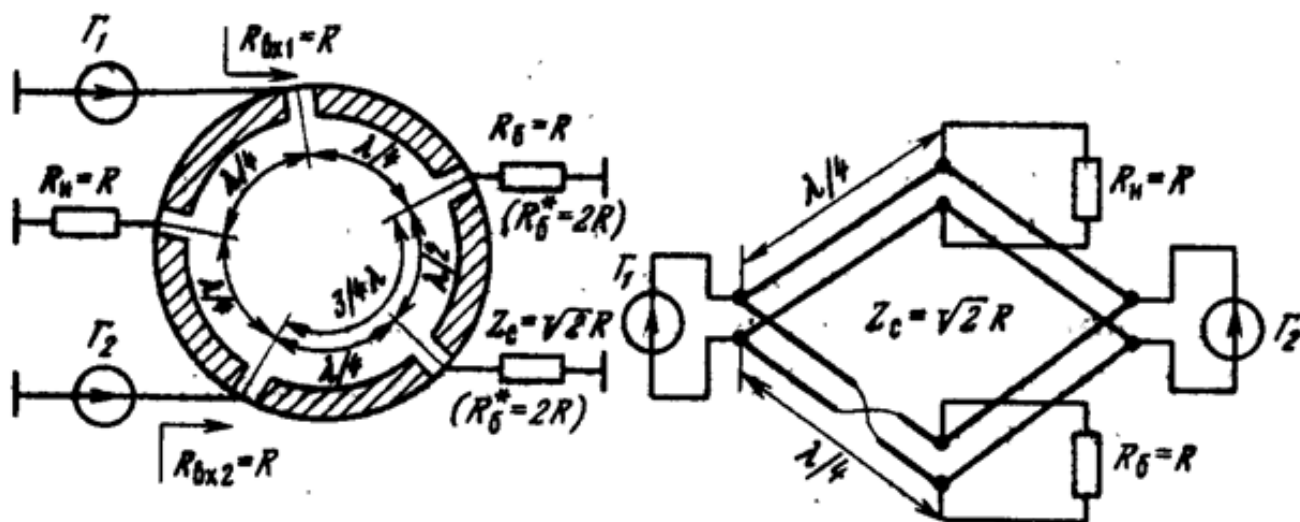


Рисунок 16 – Гибридное кольцо

Иногда для достижения симметрии схемы вместо одного $R_6 = R$ включают два балластных резистора $R_6^* = 2R$. При выполнении моста на симметричных полосковых или двухпроводных линиях линию длиной $3\lambda/4$ можно заменить четвертьволновой, но с «опрокидыванием» фазы (см. рисунок 16). В частности, такой мост используется для сложения мощностей КВ передатчиков, причем в качестве R_6 и R_6 включаются две антенны. Меняя фазу ВЧ колебаний одного из передатчиков на 180° , осуществляют перевод работы двух передатчиков с одной антенны на другую.

Кольцевые мосты являются наиболее распространенными МУ на распределенных постоянных. Они могут быть осуществлены из отрезков линий любого типа: двухпроводных, коаксиальных, полосковых, -волноводов. Их форма может отличаться от кольцевой. При выполнении МУ из отрезков коаксиальных или полосковых линий внутренняя окружность на рисунке 16 принимается заземленной. При этом внешние цепи могут быть подключены к МУ последовательно или параллельно. Так, для коаксиальных линий с внешней заземленной жилой удобнее применить параллельное подключение входов. Для полоскового или микрополоскового исполнения может оказаться предпочтительной симметричная нагрузка, которая подключается

последовательно. Параллельное подключение волноводов осуществляется тройником в плоскости Н, последовательное тройником в плоскости Е.

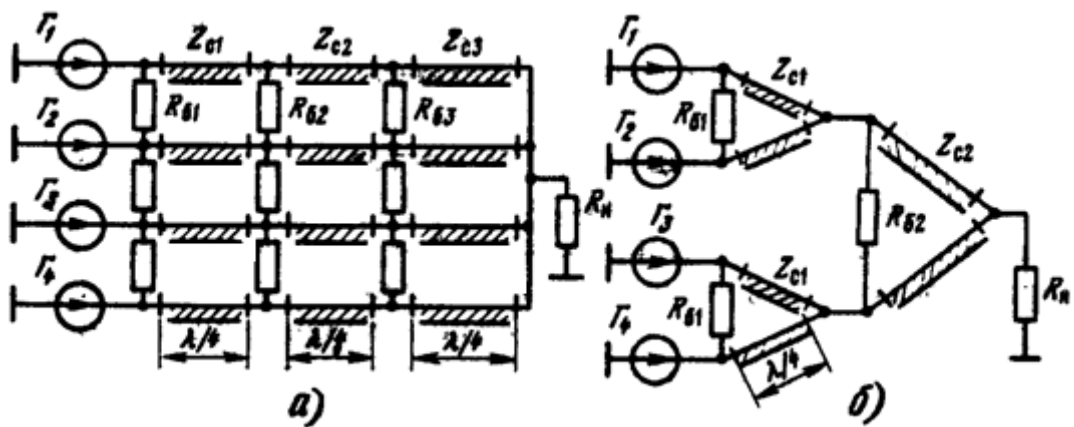
Мостовые устройства допускают без нарушения развязки между входами следующие изменения электрических длин плеч:

- а) любое из них можно изменить на целое число волн ($\pm n\lambda$);
- б) два смежных плеча можно изменить на $\pm \lambda/2$.

Полосовые свойства МУ можно улучшить путем соответствующего подбора волновых сопротивлений W_B , W_A и соотношения R_b/R_n . Некоторым недостатком такого исполнения МУ является различие величин сопротивлений нагрузки и балласта и значительное расхождение величин волновых сопротивлений плеч.

3.2 Квадратурные мосты

Четырехполюсники, на которых выполняются мостовые схемы, обеспечивают поворот фазы на 90° и необходимую трансформацию сопротивлений только на фиксированной частоте ($\omega_0 = \text{const}$). Практически полоса пропускания в таких мостовых схемах составляет не более 3...5 %. Для расширения полосы пропускания до 10...30 % на НЧ используются более сложные, но и более широкополосные четырехполюсники на LC-элементах. В диапазоне СВЧ для этого применяют многоступенчатые мостовые схемы с суммированием двух и большего числа генераторов ($N_g = 2, 3, 4, \dots$) либо осуществляют суммирование по два (бинарные сумматоры) с $N_g = 2, 4, 8, 16, \dots$. На рисунке 17 показаны примеры с $N = 4$. В обеих схемах подбираются (рассчитываются на ЭВМ) оптимальные волновые сопротивления отдельных линий, число ступеней, а также сопротивления балластных резисторов в зависимости от числа суммируемых генераторов N и требований к полосе пропускания.



- а) многоступенчатый
- б) с суммированием по два

Рисунок 17 – Широкодиапазонные мосты

Коэффициент перекрытия по частоте в таких мостовых схемах может достигать $K = 2 \dots 4$ и выше. Широко используют также квадратурные мостовые схемы сложения. В этом случае выходные напряжения генераторов Γ_1 и Γ_2 сдвинуты по фазе на 90° . Для совместной работ двух одинаковых генераторов квадратурные мосты, обычно выполняют при равенстве входных ($R_{вх1} = R_{вх2}$) и нагрузочных ($R_n = R_6$) сопротивлений. Очень часто их выбирают одинаковыми: $R_{вх1} = R_{вх2} = R_n = R_6$ где значение R выбирается стандартным, например равным волновому сопротивлению подводящих линий.

В общем виде (см. рисунок 18) квадратурный мост содержит два «продольных» четырехполюсника, обеспечивающих поворот фазы на 90° и трансформацию сопротивлений $R_{вх}$ в $0,5R_n$ и два «поперечных» четырехполюсника, обеспечивающих также поворот фазы на 90° и трансформацию 1:1 сопротивлений $R_{вх}$ или R_n . В схеме на рисунке 12 напряжение генератора Γ_1 опережает по фазе на 90° напряжение генератора Γ_2 .

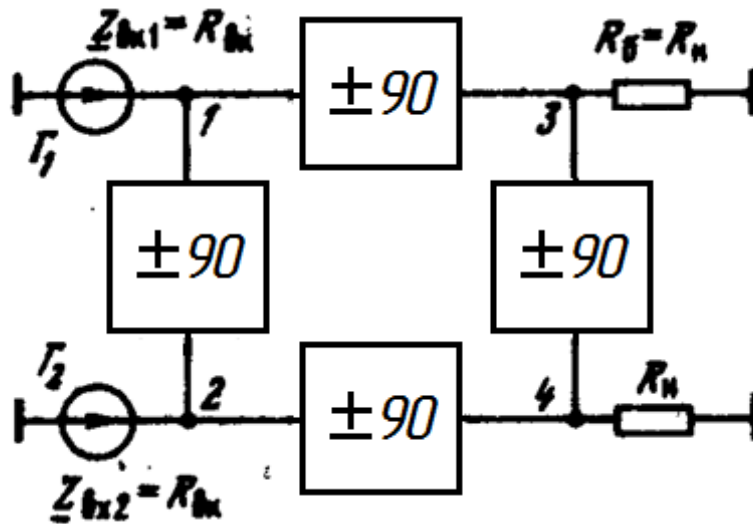


Рисунок 18 – Структурная схема

Сигналы с обоих генераторов проходят через четырехполюсники 1 – 4 по двум путям, так что, напряжения обоих генераторов суммируются в R_n и вычитаются в R_6 и одновременно напряжение от одного из генераторов отсутствует в точке подключения другого. Этим самым достигается их взаимная развязка, т. е. баланс мостовой схемы.

Четырехполюсники можно выполнять из П-, Т-цепочек на сосредоточенных LC-элементах либо на отрезках линий, у которых реактивные сопротивления X или волновые сопротивления Z_C определяются из условий заданной трансформации сопротивлений $X_1 = Z_{C1} = \sqrt{0,5R_{bx}R_n}$ - для двух «продольных» четырехполюсников, $X_2 = Z_{C2} = R_{bx}$ и $X_3 = Z_{C3} = R_n$ для первого и второго «поперечных» четырехполюсников. При этом в качестве четырехполюсников используют обычно П-цепочки, что позволяет объединять емкости соседних четырехполюсников ($C_1 + C_2$) и ($C_1 + C_3$) и уменьшать общее число реактивных элементов до восьми. В результате получаем мостовые схемы. Отметим, что квадратурный мост на линиях в технике СВЧ называют двухшлейфовым направленным ответвителем.

Полоса пропускания квадратурных мостов на рисунке 19 составляет 5...10 %. Для расширения полосы до 20...30 % увеличивают число LC- четырехполюсников или линий и шлейфов и оптимальным образом

подбирают реактивные элементы или волновые сопротивления линий и шлейфов. Однако это резко усложняет конструкцию, увеличивает геометрические размеры. Кроме того, возникают трудности технологической реализации линий и шлейфов с сильно различающимися волновыми сопротивлениями. Поэтому для достижения $K=1,4...1,7$ и выше переходят к квадратурным мостовым схемам, в которых используются не только электрические связи между отдельными элементами, но и магнитные. В диапазонах УКВ и СВЧ мостовые схемы на уровне мощности выше $0,1...1,0$ кВт выполняются на двух связанных четвертьволновых линиях, которые располагаются на определенном расстоянии друг от друга и помещаются в общий экран круглой или прямоугольной формы (см. рисунок 19).

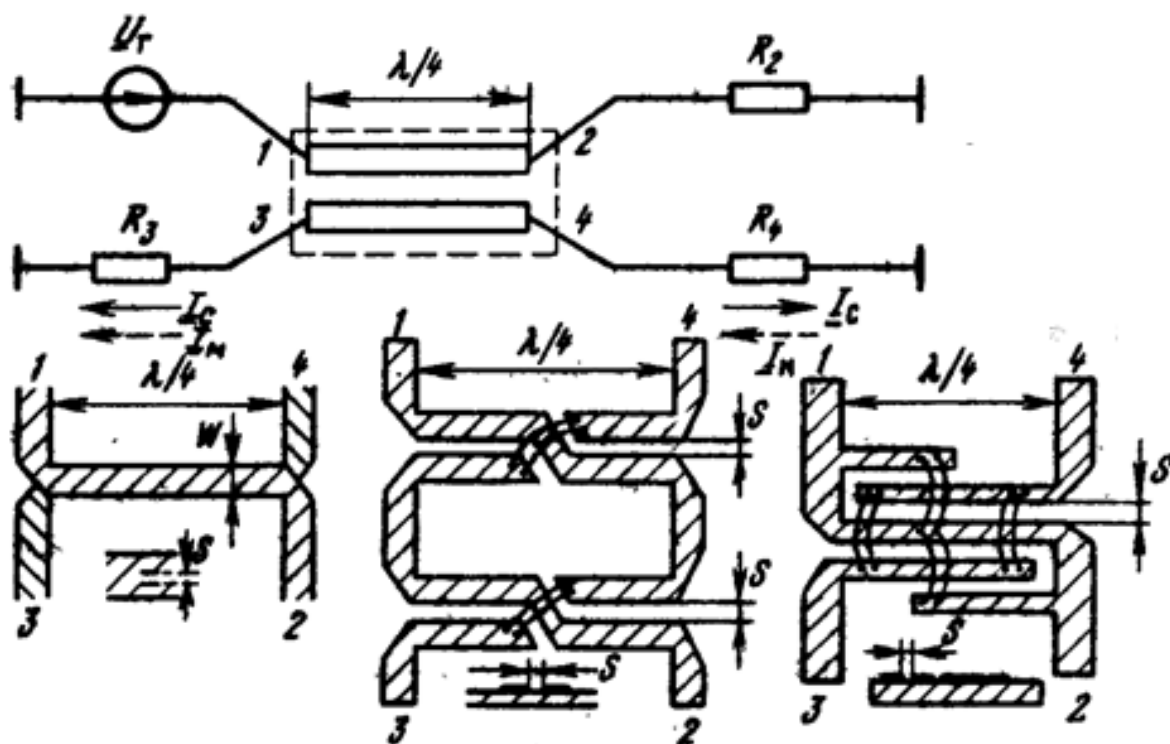


Рисунок 19 – Квадратурные мосты на связанных линиях

Принцип работы такого моста удобно рассмотреть в режиме деления мощности. Допустим, к выводу 1 подключен генератор U_G , а к выводам 2 - 4 - резисторы $R_2 = R_3 = R_4 = R$. Под действием напряжения U_G в верхнюю линию

поступает ток. Часть этого тока проходит в резистор R_2 , и часть мощности генератора будет поступать в R_2 с задержкой по фазе на 90° . Одновременно другая часть входного тока генератора будет поступать в нижнюю линию. Благодаря электрической связи в нижней линии наводится ток I_3 , а за счет магнитной связи - ток I_M . Оба тока суммируются в R_3 и вычитаются в R_4 . Поэтому связь между линиями должна быть такой, чтобы:

а) токи I_3 и I_M были равны по модулю, при этом в R_4 не будет выделяться мощность и вывод 4 моста окажется развязанным относительно вывода 1;

б) мощность (напряжение) генератора Γ_1 поровну делилась между выходами 2 и 3, при этом напряжение на выходах 3 и 2 имеют сдвиг по фазе -90° .

Такой мост называют трехдецибелным направленным ответвителем (деление на 2). Отметим, что в режиме суммирования генераторы Γ_1 и Γ_2 подключаются к выводам 2 и 3 (или 1 и 4), а резисторы R_n и R_6 – к выводам 1 и 4 (или 2 и 3). Для одностороннего подключения генераторов (в режиме сложения) или нагрузочных сопротивлений (в режиме деления) в реальных конструкциях линии перекрещивают. Это отражается в их изображении на электрических схемах.

При уровнях мощности до 0,1...1,0 кВт квадратурные мосты обычно выполняются на полосковых и микрополосковых линиях с диэлектрическим заполнением ($\epsilon > 1$). В мосте с лицевой связью обе линии располагаются одна над другой и разделены тонкой диэлектрической пленкой. Однако такая конструкция оказывается технологически сложно выполнимой. В то же время в конструкции на микрополосковых линиях с торцевой связью между линиями требуется не только целый зазор $S=0,03$ мм между линиями, но и очень критична точность его практического выполнения. Поэтому либо применяют тандемное соединение двух мостов с существенно меньшей связью (вместо 3 дБ она уменьшается до 8,34 дБ и поэтому зазор между линиями $S \approx 0,07$ мм), либо выполняют мост Ланге, который содержит «гребенку» из нескольких связанных линий с достаточно большими зазорами между ними, а главное, не

очень критичными к точности их практического выполнения. Отметим, что в конструкциях на рисунке 19, полоса пропускания может достигать 0,7...0,8 октавы, в тандемной конструкции 0,5...0,6 октавы, а в мосте Ланге 0,6...0,7 октавы.

При суммировании мощности двух генераторов в квадратурном мосте их входные напряжения должны быть сдвинуты на 90° . Однако, как правило, поступают по-другому: на входе обоих генераторов включают аналогичный квадратный мост деления мощности который обеспечивает их возбуждение со сдвигом по фазе на 90° от общего источника. Это поясняет схема на рисунке 20.

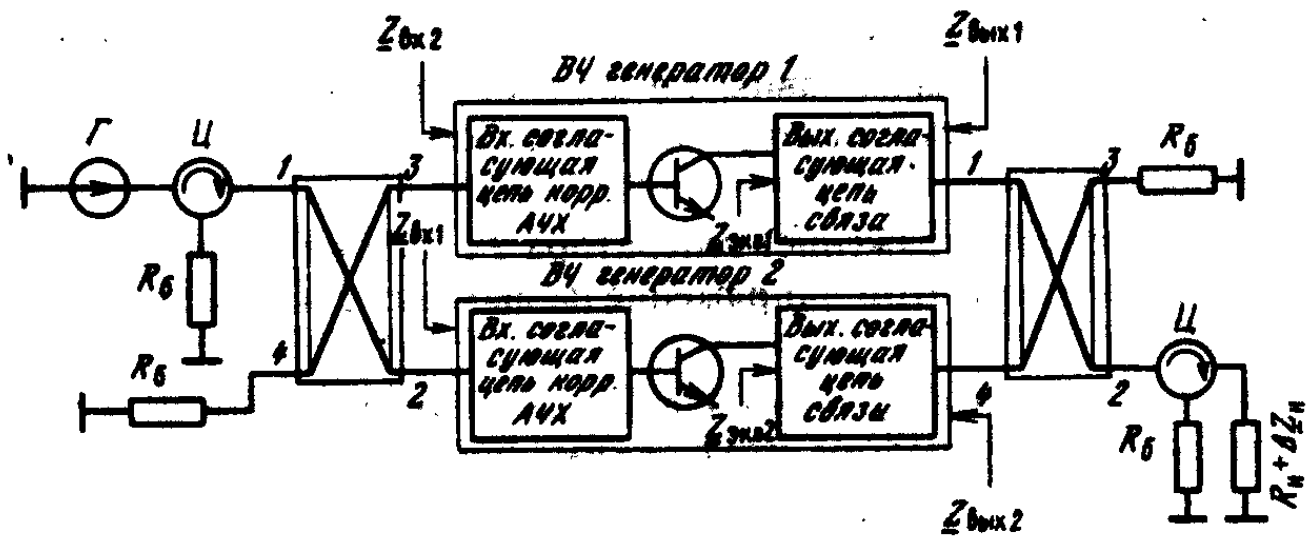


Рисунок 20 – Квадратурная схема построения ВЧ генераторов

Основные преимущества применения квадратурных мостовых схем перед синфазными (и противофазными) состоят в следующем: Входное сопротивление квадратурного моста деления постоянное и резистивное при любых, даже реактивных, но обязательно одинаковых нагрузочных сопротивлениях- входных сопротивлениях генераторов Γ_1 и Γ_2 (см. рисунок 20): $Z_{вх}(\omega) = R$ при $Z_{вх\Gamma_1}(\omega) = Z_{вх\Gamma_2}(\omega)$. При рассогласованных нагрузках в плечах 2 и 3 отраженные по этой причине мощности поступают в плечо 4 и рассеиваются в R_6 . Аналогично выходное сопротивление квадратного моста сложения постоянное и резистивное при любых, даже реактивных, но обязательно

одинаковых выходных сопротивлениях генераторов Γ_1 и Γ_2 : $Z_{\text{вых}}(\omega) = R$ при $Z_{\text{вых}\Gamma_1}(\omega) = Z_{\text{вых}\Gamma_2}(\omega)$.

При появлении отраженной волны со стороны нагрузки генераторов она гасится в балластном резисторе R_6 , даже если выходные сопротивления обоих генераторов не равны R . Однако при рассогласовании нагрузки $Z_{\text{н}} = R_{\text{н ном}} + \Delta Z_{\text{н}}$, входные сопротивления моста сложения, а следовательно, нагрузочные сопротивления для обоих генераторов становятся различными: на один из генераторов рассогласование $\Delta Z_{\text{н}}$ пересчитывается прямо пропорционально, а на другой – обратно пропорционально. Отсюда пересчитанные нагрузочные сопротивления Z и Z для первого и второго транзисторов тоже становятся разными, отличны и режимы их работы, а поэтому могут отличаться их входные сопротивления. В результате нагрузочные сопротивления для моста деления будут отличаться друг от друга и его входное сопротивление не будет равно номинальному. Устранение подобного рассогласования возможно только включением дополнительных невзаимных устройств – циркуляторов или вентилях непосредственно на выходе и входе генератора на рисунке 20.

Перечисленные выше положительные свойства квадратурной схемы построения определяют ее широкое применение как при построении отдельных транзисторных генераторов, так и при суммировании мощностей несколько генераторов, так и при суммировании мощностей нескольких генераторов и образованных ими модулей, а также при построении мощных телевизионных и УКВ ЧМ передатчиков в виде двух полукомплектов. Поэтому даже в тех случаях, когда трудно непосредственно выполнить квадратурную мостовую схему, используют синфазную мостовую схему, в одно из плеч которой включают дополнительный фазовращатель на 90°

4 Расчет устройства сложения мощностей

Необходимо сложить мощности шести усилительных модулей (см. рисунок 21), причём выходное сопротивление каждого равно $R_{\Gamma} = 50 \text{ Ом}$. Мощность каждого усилительного модуля $P_1 = 148,15 \text{ Вт}$. Нагрузкой является фидер, $R_{\text{Н}} = 100 \text{ Ом}$.

Балластное сопротивление

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_{\Gamma} = 50 \text{ Ом.}$$

Сопротивление всех реактивных элементов:

$$X = \sqrt{NR_{\Gamma}R_{\text{Н}}} = \sqrt{6 \cdot 50 \cdot 100} = 173,21 \text{ Ом,}$$

где $N = 6$ – число усилительных модулей.

Индуктивности дросселей:

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = \frac{X}{\omega_0} = \frac{173,21}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 10^6} = 4,59 \text{ мкГн.}$$

Ёмкости всех конденсаторов:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = C_7 = C_8 = C_9 = C_{10} = C_{11} = C_{12} = \frac{1}{\omega_0 X} \\ = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 173,21} = 153,1 \text{ пФ.}$$

Найдём нагруженную добротность:

$$Q_{\text{Н}} = \frac{NR_{\text{Н}} + R_{\Gamma}}{X} = \frac{6 \cdot 100 + 50}{173,21} = 3,75.$$

Тогда КПД (считая $Q_0 = 100$) будет

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{Н}}}{Q_0} = 1 - \frac{3,18}{100} = 0,96.$$

Выходная мощность УСМ

$$P_{\text{ВЫХ}} = NP_1\eta = 6 \cdot 148,15 \cdot 0,96 = 855,54 \text{ Вт.}$$

Найдём реактивные мощности всех элементов цепи согласования.

Входное напряжение равно:

$$U_{\text{ВХ}} = \sqrt{2 \cdot P_1 \cdot R_{\Gamma}} = \sqrt{2 \cdot 148,15 \cdot 50} = 121,72 \text{ В.}$$

Тогда реактивная мощность входных конденсаторов равна:

$$P_{C'} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}^2}{X} = \frac{1}{2} \cdot \frac{121,72^2}{173,21} = 42,77 \text{ ВАР.}$$

Напряжение на выходе

$$U_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{2 \cdot P_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{Н}}} = \sqrt{2 \cdot 855,54 \cdot 100} = 413,65 \text{ В.}$$

Тогда реактивная мощность выходных конденсаторов равна

$$P_{C''} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{X} = \frac{1}{2} \cdot \frac{413,65^2}{173,21} = 493,95 \text{ ВАР.}$$

Найдём ток выходных конденсаторов:

$$I_{C''} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{X} = \frac{413,65}{173,21} = 2,39 \text{ А.}$$

Также найдём ток нагрузки:

$$I_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{413,65}{100} = 4,14 \text{ А.}$$

Ток индуктивности

$$I_L = \sqrt{I_{C''}^2 + \left(\frac{I_{\text{Н}}}{6}\right)^2} = \sqrt{2,39^2 + 0,69^2} = 2,49 \text{ А.}$$

Тогда реактивная мощность индуктивности равна:

$$P_L = \frac{1}{2} \cdot I_L^2 \cdot X = \frac{1}{2} \cdot 2,49^2 \cdot 173,21 = 535,11 \text{ ВАР.}$$

Найдём рассеиваемую мощность балластных резисторов:

$$P_{\text{расс}} = P_1 \cdot \left(\frac{N-1}{N}\right)^2 = 148,15 \cdot \left(\frac{6-1}{6}\right)^2 = 102,88 \text{ Вт.}$$

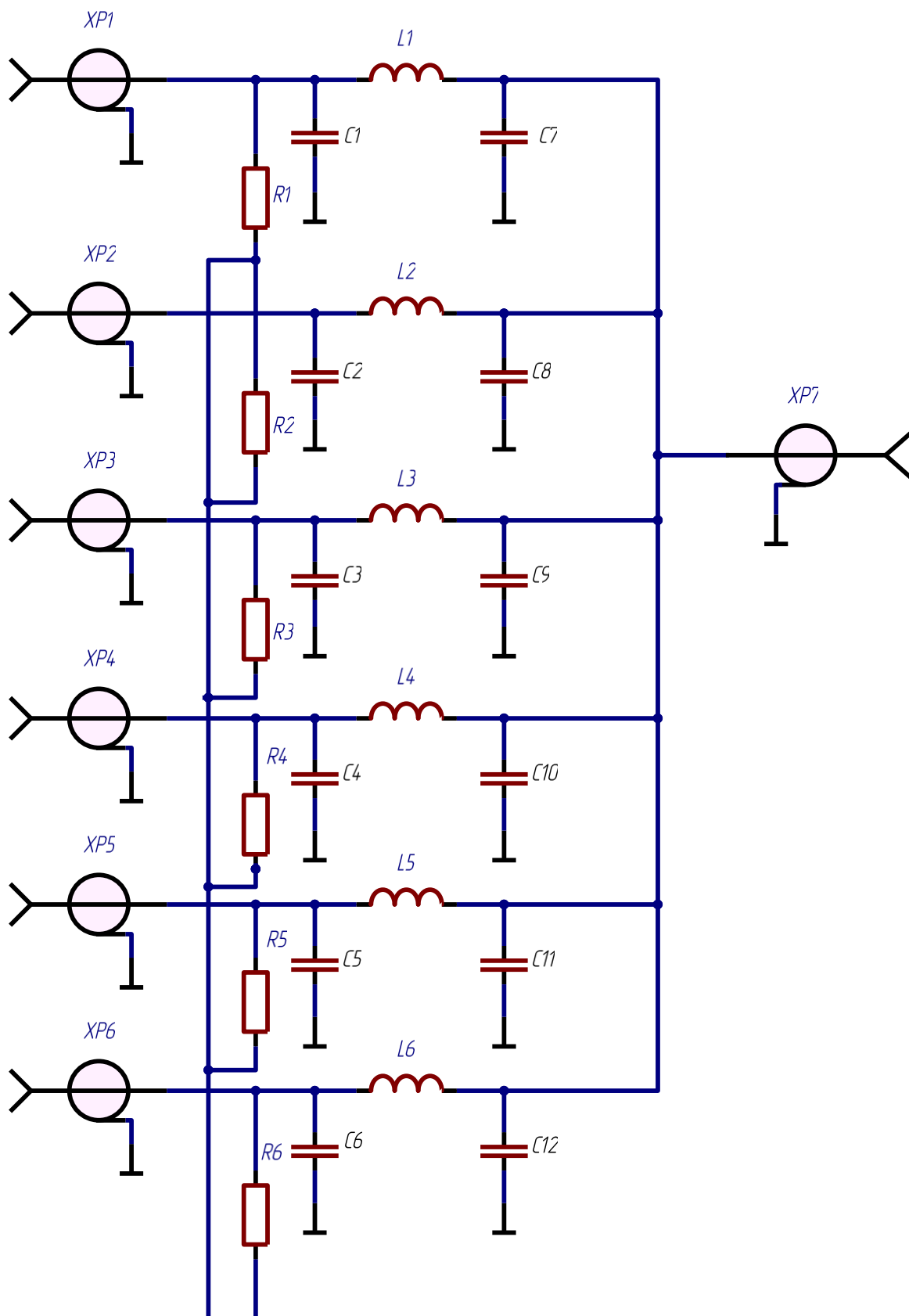


Рисунок 21 – Принципиальная схема устройства сложения мощности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мостовой метод суммирования мощностей часто используется для эффективного повышения надежности работы радиопередающего устройства: оно строится в виде двух или ряда комплектов мощностью P , возбуждаемых от общего ВЧ возбудителя и управляемых общим модулирующим сигналом. Выходные ВЧ каскады связаны посредством питающих фидеров и МУ с нагрузочным фидером. Необходимые фазовые соотношения на входах МУ обеспечиваются фазовращателями. Чтобы избежать большого понижения мощности в нагрузке при длительном выходе из строя одного комплекта, можно предусмотреть возможность переключения питающего фидера работающего комплекта непосредственно на нагрузочный-фидер в обход МУ. Для этого входные сопротивления МУ делаются равными волновому сопротивлению нагрузочного фидера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиопередающие устройства /под ред. В.В. Шахгильдяна. – 3-е изд., М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.
2. Устройства сложения и распределения мощностей высокочастотных колебаний / под ред. З.И. оделя. - – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
3. Воробьев, М.С. Транзисторные усилители мощности: учебное пособие /М.С. Воробьев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 68 с.
4. Воробьев, М.С. Транзисторные автогенераторы: учебное пособие / М.С. Воробьев. – Челябинск: Изд-воЮУрГУ, 2007. – 75 с.
5. СТО ЮУрГУ 04–2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / составители: Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.
6. Радиопередающие устройства /под ред. О.А. Челнокова. - М.: Радио и связь, 1982. – 256 с.
7. Схемотехника сверхширокополосных и полосовых усилителей мощности./ Титов А.А. – М.: Радиотехника, 2007. – 208 с.
8. Каталог подбора компонентов по параметрам – <http://www.chipfind.ru>