

## Одесса 2013

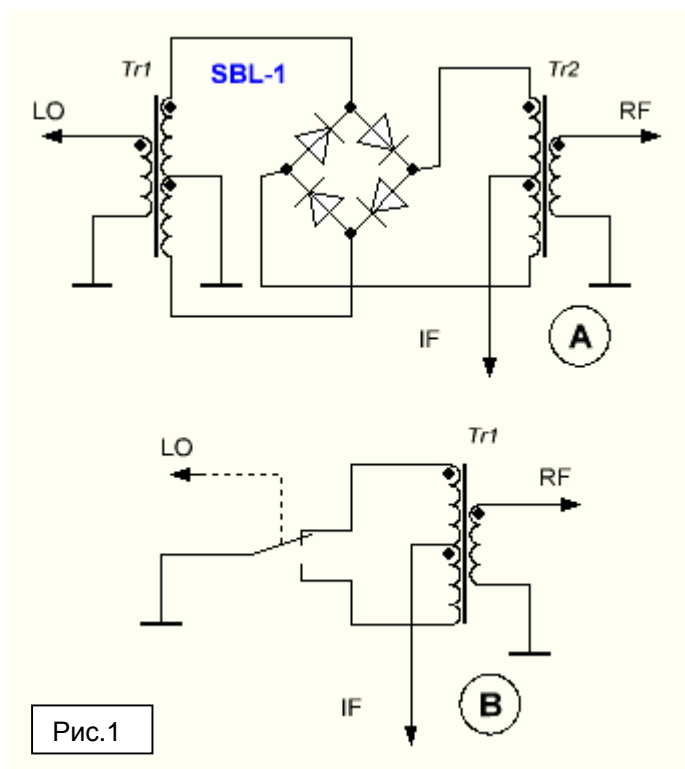


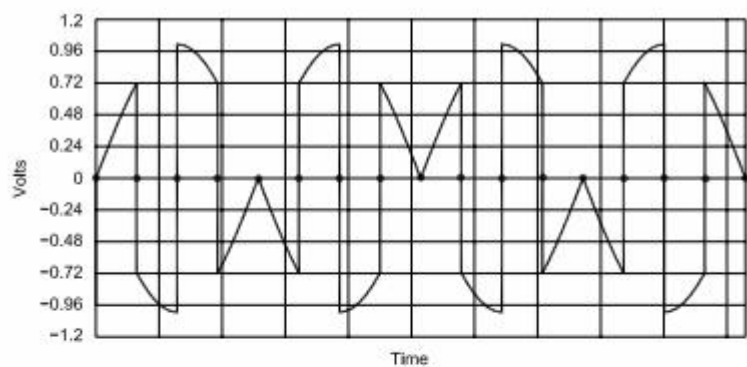
Рис.1

На Рис.2.C представлен результат работы смесителя в случае если на вход подается синусоидальный сигнал частотой 2MHz, а в качестве гетеродина используется прямоугольные колебания (меандр) с частотой 8MHz [3].

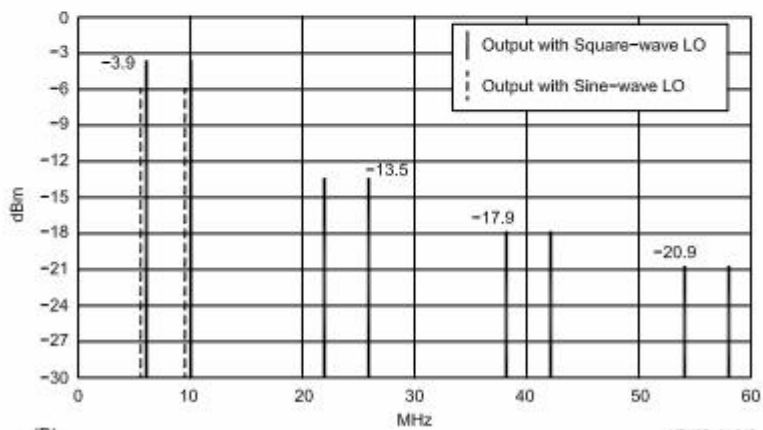
Потери в данном смесителе зависят от формы и уровня сигнала гетеродина. В случае меандра этот параметр достигает -3,9dB. В случае синусоидального сигнала он ухудшается до -6dB Рис.2.D.

На выходе смеситель формирует суммарную и разностную частоты, а также их нечетные гармоники. Типичное значение уровней гармоник представлено на Рис.2.D.

Типовой уровни сигнала гетеродина для такого смесителя +7dBm.



(C)



(D)

HBK05\_11-019

Рис.2

Важный момент в работе этого типа смесителей является то, что диоды запираются сравнительно невысоким напряжением равным падению напряжения на диоде в не зависимости от напряжения накачки гетеродина. Это приводит к тому что если мы используем обычные кремниевые диоды с напряжением отсечки  $V_d = 0.65\text{V}$  то максимальная амплитуда сигнала на выходе смесителя ограничена  $2 \cdot V_d = 2 \cdot 0.65 = 1.3\text{Vpp}$ . При повышении амплитуды сигнала на входе начинается ограничение (срезаются верхушки сигнала). Это видно на Рис. 3 – результат моделирования перегрузки смесителя (отмечено красным цветом).

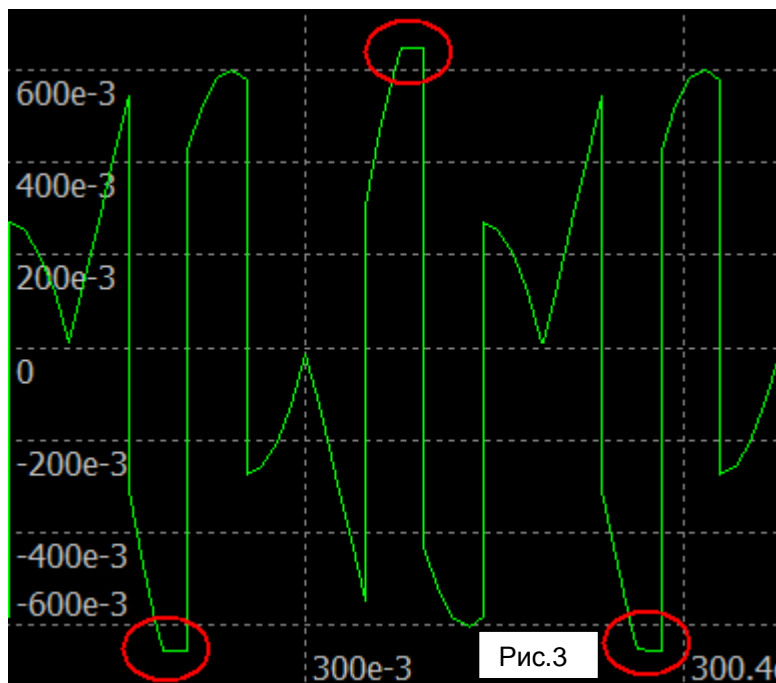


Рис.3

### 3. Diode Ring Modulator

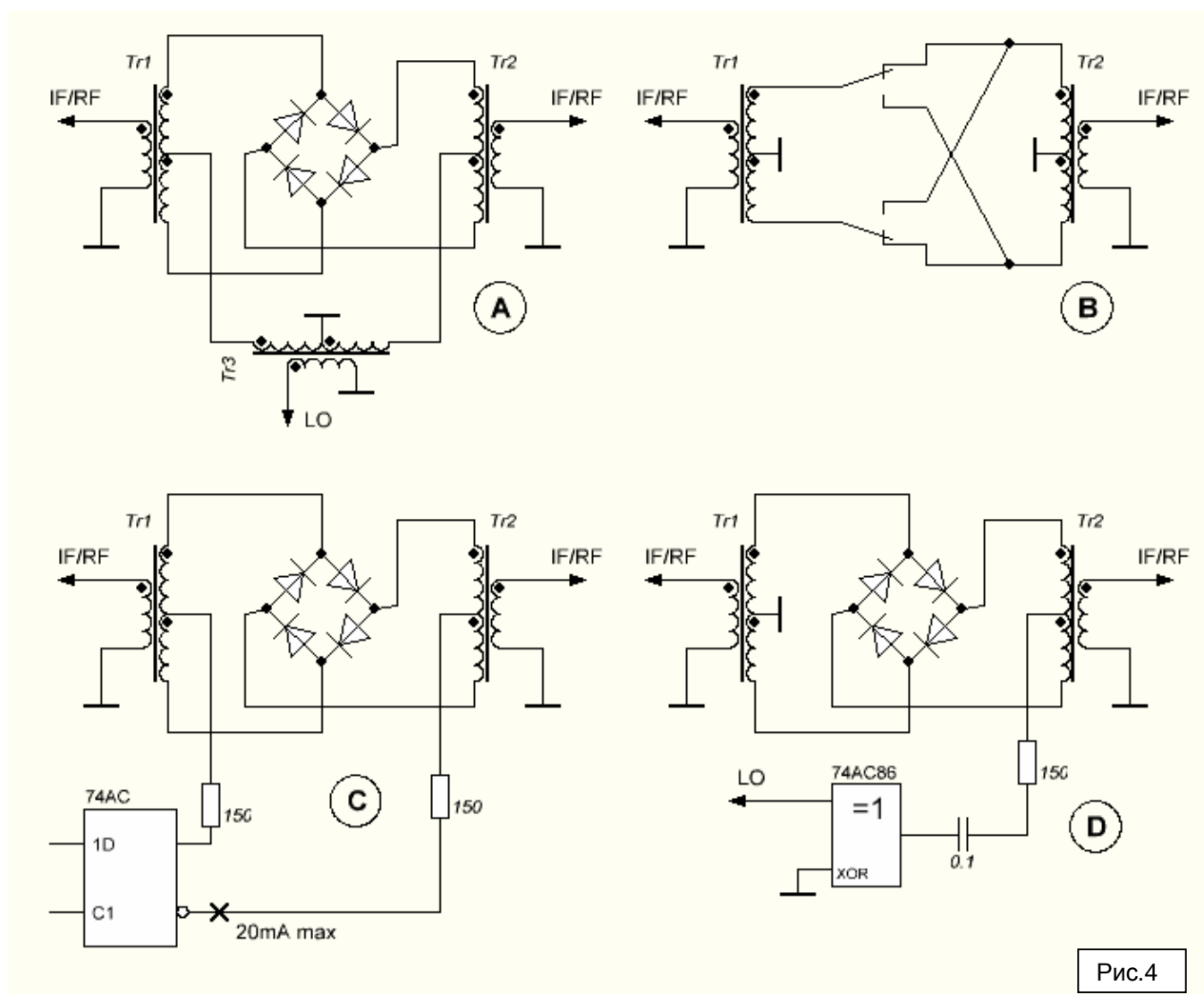


Рис.4

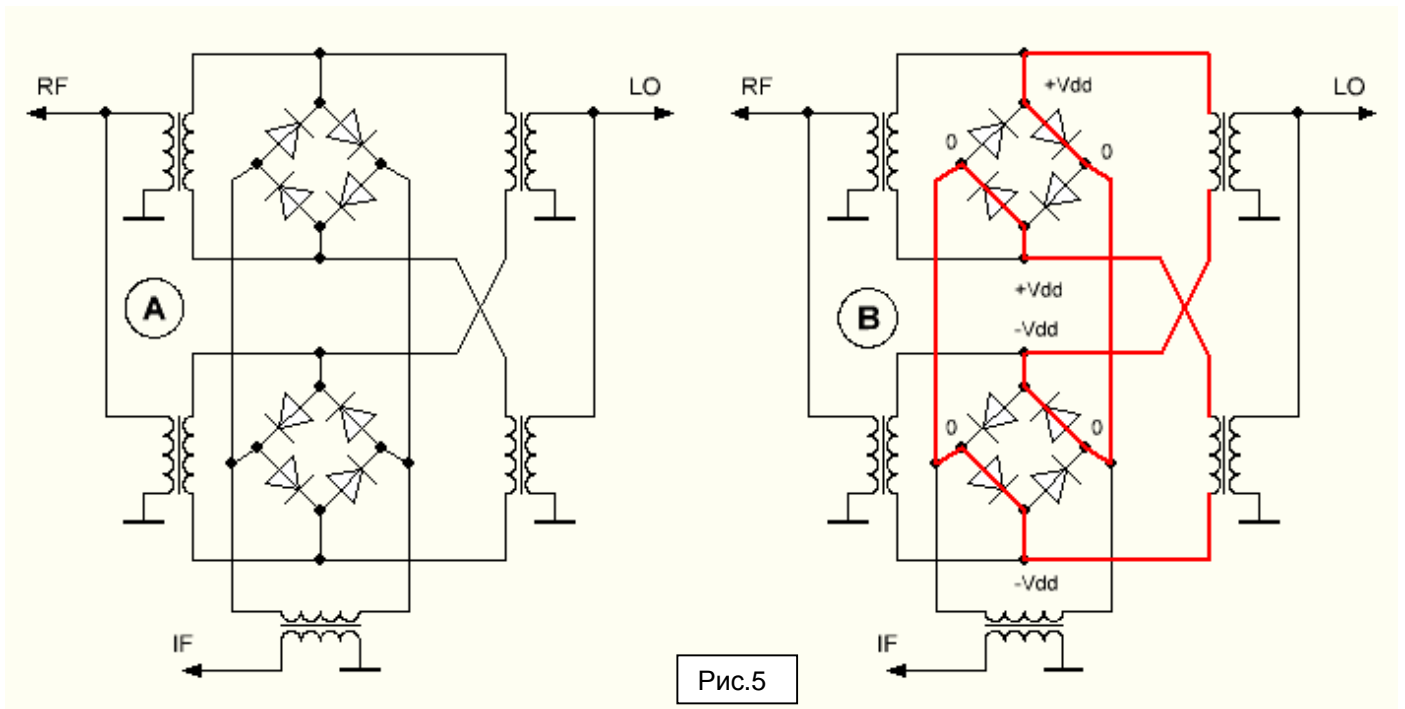
В рассмотренном выше смесителе DBM все входы являются взаимозаменяемыми – т.е. мы можем любой из трех портов выбрать для подачи сигнала гетеродина. Особенно интересно если подать сигнал гетеродина так, как показано на Рис.4.А.

В зарубежной литературе такая схема фигурирует под названием Diode Ring Modulator (DRM) и достаточно широко распространена не только в высокочастотных устройствах, но и в устройствах звукового диапазона. На Рис.4.В показан принцип работы данного смесителя. В отличие от классического DBM нижняя граничная частота по портам IF/RF определяется параметрами трансформаторов. В случае использования цифрового гетеродина схему можно упростить, исключив трансформатор в цепи гетеродина. Токоограничивающие резисторы выбирают исходя из максимального выходного тока применяемой цифровой логики.

Для этого смесителя справедливы все ранее озвученные замечания по потерям, гармоникам и максимальной амплитуде сигнала на выходе.

#### 4. Двойной дважды балансный смеситель DDBM

Попытка улучшить развязку портов приводит к топологии двойного дважды балансного смесителя (DDBM), или трижды балансного, что по сути одно и то же: Рис.5.А



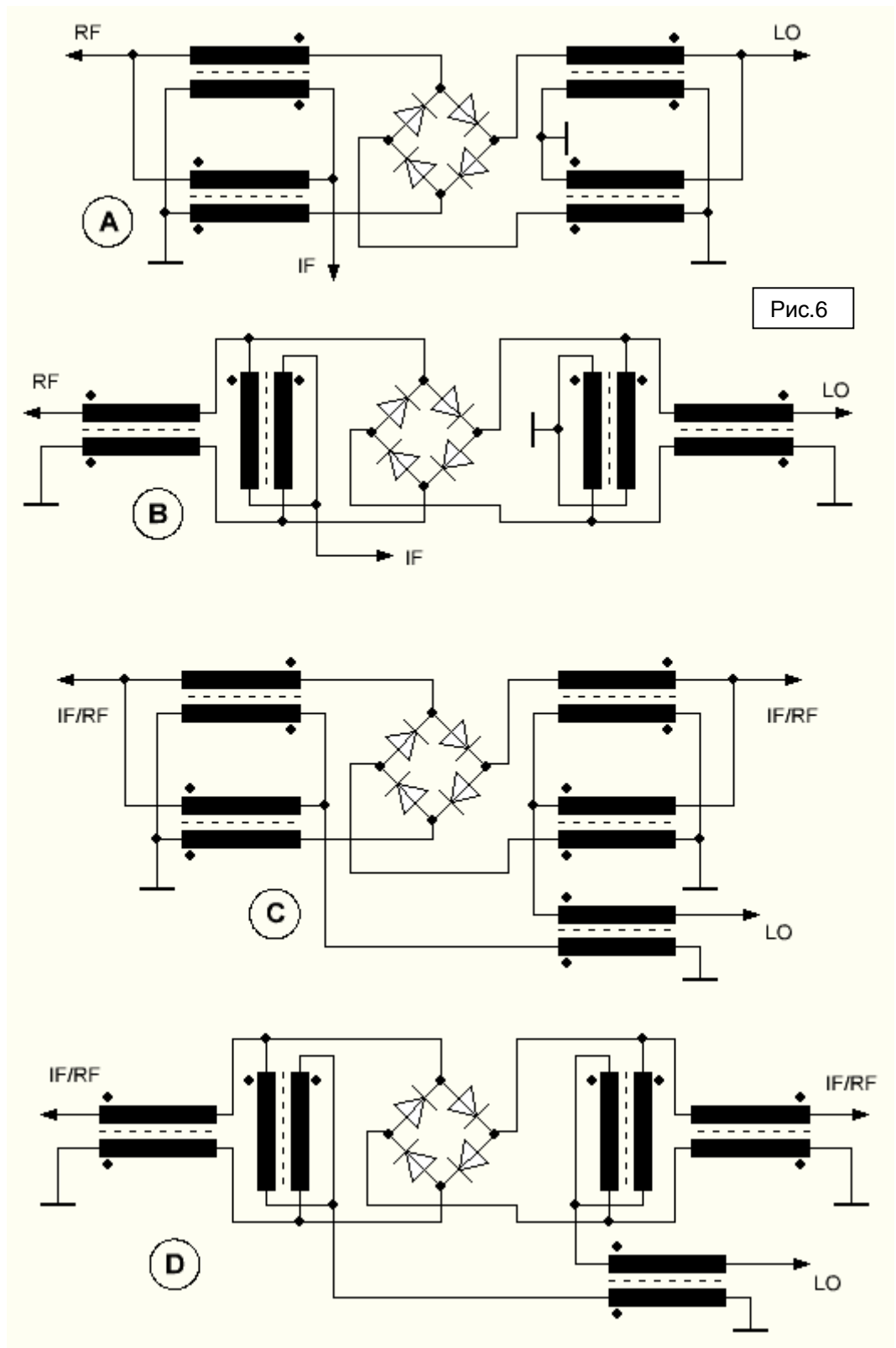
Из анализа Рис.5.В становится очевидным, что смеситель наследует все проблемы связанные с ограничением максимального уровня входного сигнала присущие ранее рассмотренному простому DBM, т.к. диоды закрыты напряжением Vdd.

## 5. Трансформаторы на длинных линиях

Если от смесителя требуется большая широкополосность, то вместо обычных трансформаторов применяются ТЛТ (transmission line transformer) [48,49]. В русскоязычной литературе прижились два термина - ТДЛ (трансформаторы на длинных линиях) и ШТЛ (широкополосный трансформатор на линиях). Применение ТДЛ по гетеродинному входу в случае «накачки» меандром актуально даже в сравнительно узкополосных устройствах, т.к. не забываем что меандр с крутыми фронтами имеет достаточно широкий спектр. Если мы его спектр «обрежем» сверху то получим «затянутые» фронты, что ухудшит параметры смесителя.

На Рис.6.А показана реализация DBM с использованием т.н. «Guanella balun» [2,48,49]. На Рис.6.В – на простой схеме симметрирования [2]. Отметим что «Guanella balun» помимо симметрирования обладает свойствами трансформации сопротивления 1:4.

Эти схемы наследуют все основные свойства рассмотренного ранее DBM на трансформаторах. В частности свойство взаимозаменяемости портов, что позволяет получить полностью симметричные схемы Рис.6.С и Рис.6.Д.



Пример практической реализации трижды балансного смесителя на ТДЛ конструкции OE9PMJ приведен на Рис.7 [45].

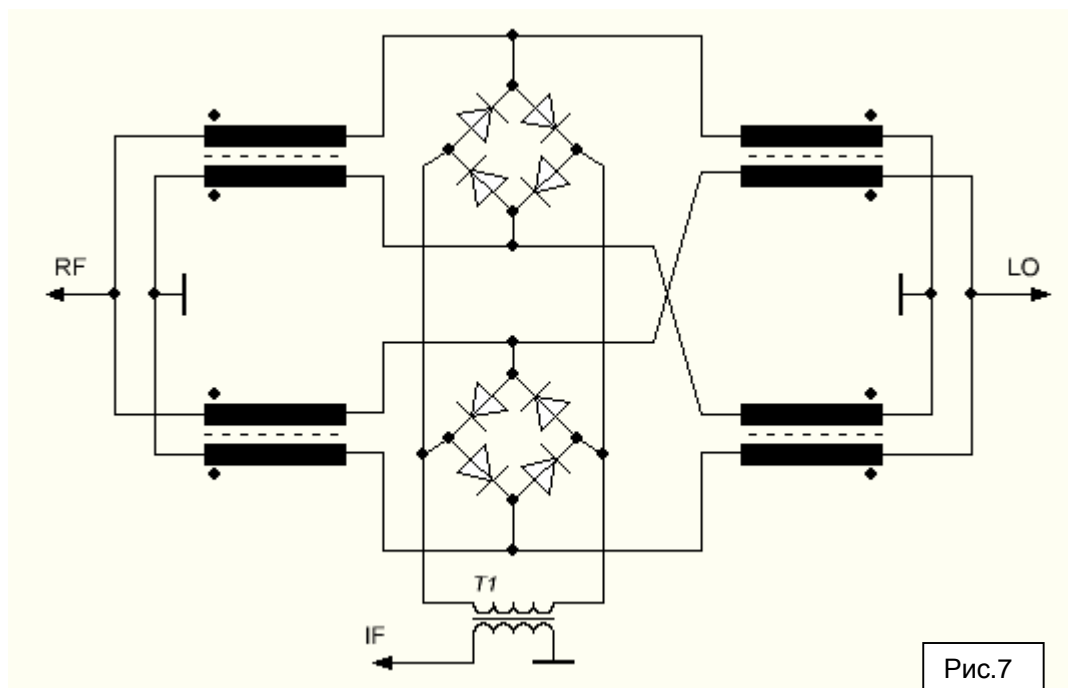


Рис.7

В некоторых случаях схемотехника смесителей на ТДЛ может на первый взгляд выглядеть странно и подозрительно. На Рис.8 приведена схема смесителя из [46]. Казалось бы, она не должна работать. Но она работает, и это подтверждается моделировщиком.

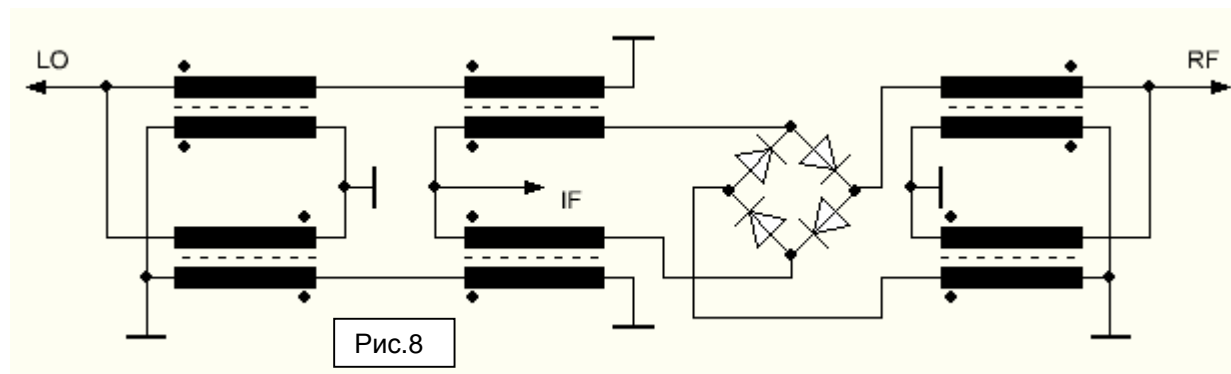


Рис.8

На Рис.9 приведена еще более запутанная схема Ultra high isolation mixer из патента [47]. Естественно тоже рабочая.

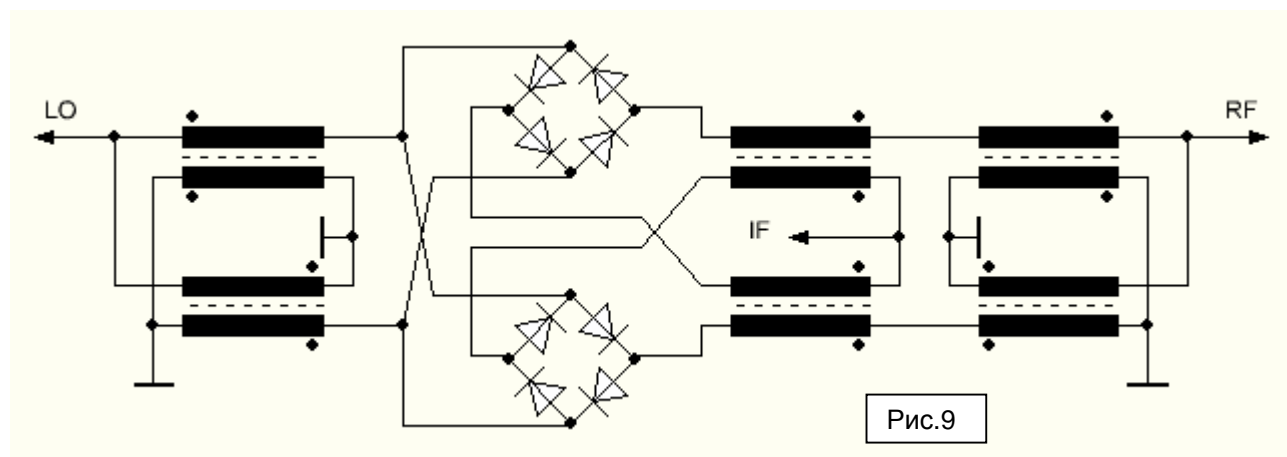


Рис.9

## 6. Классификация смесителей по уровню гетеродина

Рассмотренные ранее смесители с простым диодным кольцом относят к «**Class I**». Им требуется примерно +7dBm мощности гетеродина.

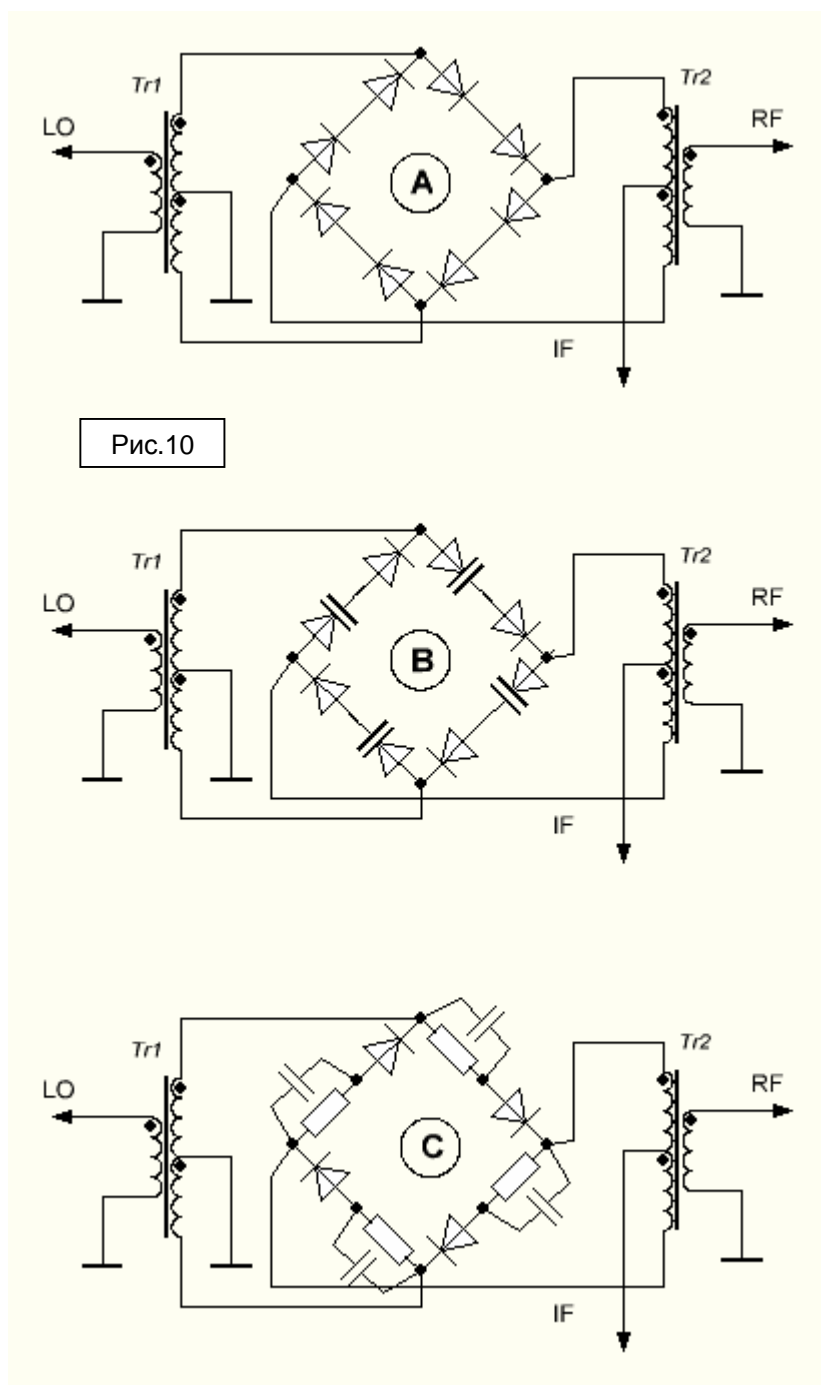
Попытка решить проблему ограничения сигнала что называется «в лоб» представлена на Рис. 10.A. Видно, что в каждое плечо включено по два диода. Соответственно в два раза повышается и максимальный неограниченный уровень на выходе смесителя. Данный смеситель требует увеличенной мощности накачки по входу гетеродина до +13..+17dBm и относится к «**Class II Type 1**».

В патенте [6] приводится критика предыдущего решения и предлагается схема с варикапами Рис.10.B. Основное преимущество такого решения – более «крутая» ВАХ и как следствие меньшие искажения.

Кардинальным решением проблемы ограничения выходного сигнала является схема представленная на Рис. 10.C. Номиналы резисторов должны быть в 2-3 раза больше чем выходное сопротивление гетеродина LO. В этой схеме диоды заперты напряжением, которое образуется в результате протекания тока гетеродина через цепочку R+D. При правильном выборе номиналов ограничение наступает при уровне выходного сигнала практически равном уровню гетеродина.

В случае если последовательно с диодами включены только резисторы (т.е. без конденсаторов) то мы имеем дело с «**Class II Type 2**» смесителем и требуемая мощность гетеродина порядка +17dBm.

Если резисторы шунтированы конденсаторами (как на Рис.10.C), то это «**Class III**» и от гетеродина требуется мощность +20..+30dBm.



## 7. Высокоуровневые Termination Insensitive Mixers

Под понятием «высокоуровневый смеситель» будем понимать такой смеситель, максимальный уровень сигнала на выходе которого определяется исключительно напряжением гетеродина, в не зависимости от напряжения отсечки примененных диодов. Это особенно актуально, т.к. перспективные в плане быстродействия диоды Шоттки имеют прямое падение в два раза ниже кремниевых - порядка 0,3в.

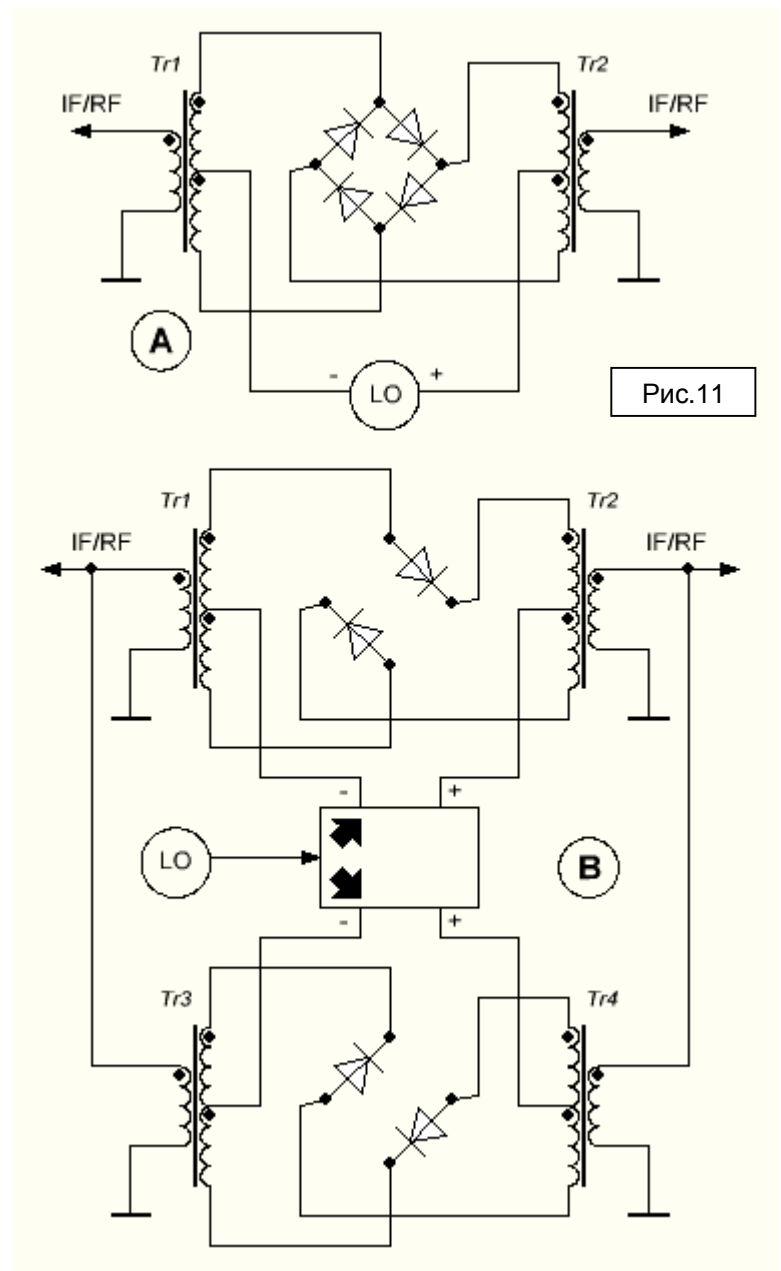
В зарубежной литературе такого рода смесители позиционируются как «нечувствительные к нагрузке» (Termination Insensitive Mixers), т.е. не ухудшающие существенно IP3 при рассогласовании по портам IF/RF. Например в патенте [47] мы можем прочесть следующее:

*Class IV Termination Insensitive Mixers: This mixer circuit called **TIM** consists of a transmission line hybrid network driving two sets of diodes. Isolation between each hybrid's opposite ports allows the LO to independently control the switching action of alternately conducting diode sets*

Важно понимать, что не все смесители на диодах являются **TIM**, в то же время все смесители на интегральных ключах либо ПТ в режиме ключей являются **TIM**.

Попробуем синтезировать схему **TIM** исходя из описания. За основу возьмем топологию **DRM** Рис.11.А и преобразуем ее к виду Рис.11.В. К разветвителю (на схеме - прямоугольник с двумя стрелочками) предъявляются требования изоляции между выходными портами.

Реализация такого разветвителя может быть осуществлена различными средствами в зависимости от формы колебаний гетеродина и используемой элементарной базы.



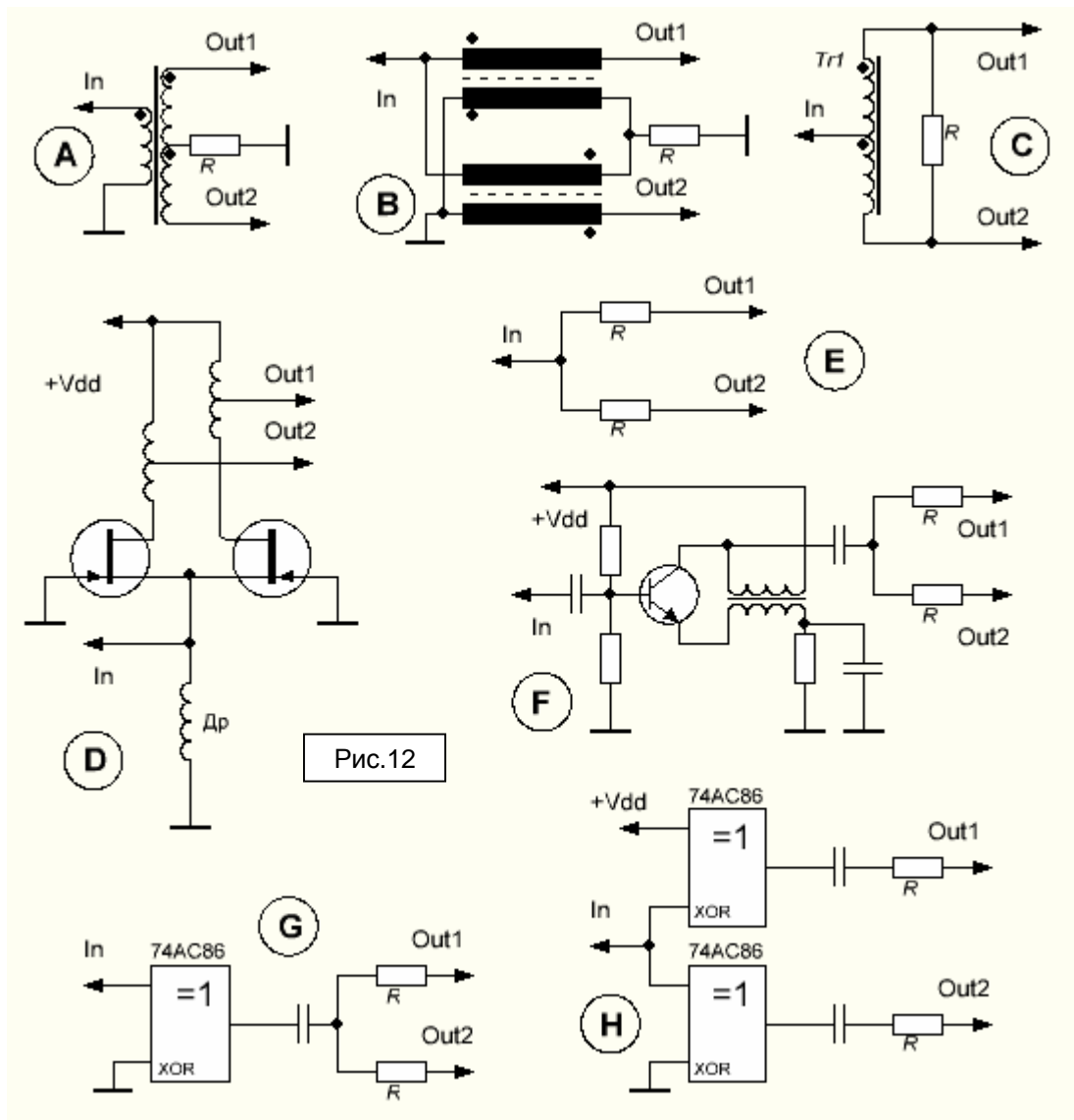
На Рис.12.А показан классический пассивный  $180^\circ$  разветвитель (гибрид) [20]. На его выходах сигнал будет в противофазе. Такой разветвитель может быть реализован и на ТДЛ Рис.12.В.

Другой вариант на Рис.12.С известен в зарубежной литературе как **Magic-T combiner-splitter** [21]. В отличие от предыдущей схемы напряжения на его выходах синфазны.

Разветвитель сигнала гетеродина может быть так же реализован на активных элементах. Например на Рис.12.Д используются каскады на ПТ с ОЗ – такое включение отличается очень хорошей развязкой вход-выход и повышенной широкополосностью за счет устранения эффекта Миллера.

Разветвитель может быть также построен по очень упрощенной схеме Рис.12.Е. Такое возможно в случае если выходное сопротивление гетеродина очень низкое. Таким свойством обладает каскад Рис.12.Ф [2].

В случае «цифрового» гетеродина схемы разветвителей упрощаются. На Рис.12.Г показан «цифровой» разветвитель с синфазным выходом, на Рис.12.Н – с парафазным.



На Рис.13 представлены две достаточно близкие практические схемы высокоуровневых **П**-смесителей. В обеих схемах диоды закрыты полным напряжением гетеродина.

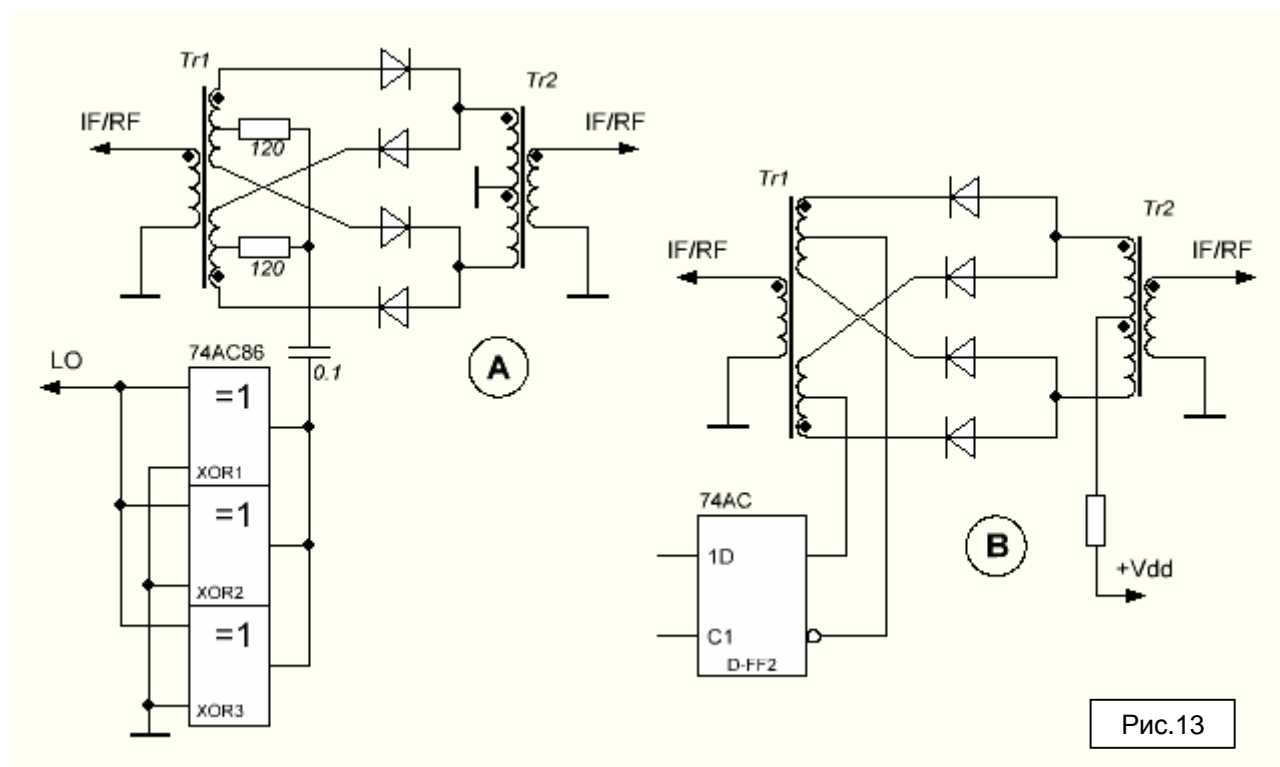


Рис.13

Схему Рис.13.А представлена в [9]. Первоначально она была применена в Redifon (GR-345) mobile transceiver в 1965 году! LA7MI переработал схемотехнику под более современные компоненты. IP3 порядка +25...+30dBm.

Схема Рис.13.В - из патента [10]. IP3=+22dBm при токе через диоды 18mA (74ACT, 220ом).

Трансформатор Tr1 может быть выполнен на бинокле: левая обмотка мотается по центру сердечника (через два отверстия), а две другие обмотки мотается скруткой в два провода каждая на своей половине бинокля.

В последнее время стали широко доступны подобранные сборки ПТ (quad-ring) и скоростные коммутаторы FST, ADG. Это позволило реализовывать ключевые пассивные смесители на новом качественном уровне.

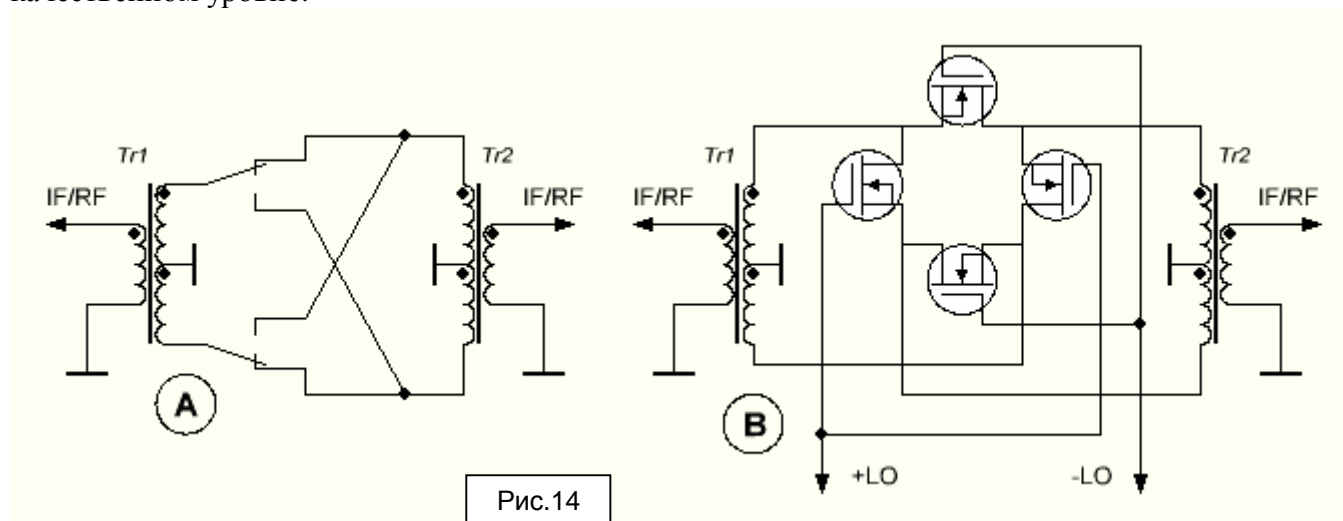


Рис.14

Рис.14.А поясняет принцип работы балансного смесителя на сборке ПТ SD8901 Рис.14.В, разработанного J.Makhinson N6NWP [40]. Смеситель имеет параметр  $IP3=+40\text{dBm}$ .

С.Макаркин RX3AKT разработал ключевой смеситель на высокоскоростном коммутаторе ADG774 [39] по структурной схеме Рис.14.А. Аналогичный смеситель на ADG774 применен UR3LMZ в трансивере SW2012 [38].

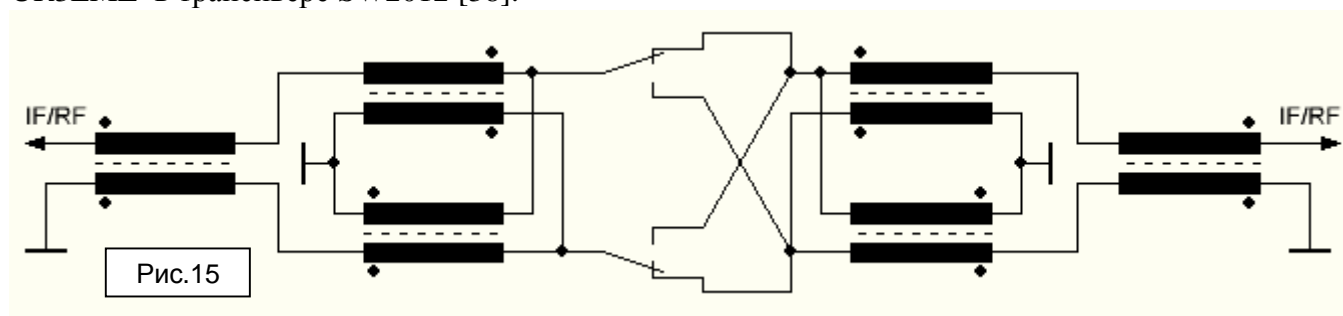


Рис.15

И.Усихин RW3FY в [37] предложил смеситель на ADG774 с использованием ТДЛ Рис.15 с  $IP3=+39\text{dBm}$  @14MHz.

Схема предложена в [36] Рис.16.А. использует ТДЛ, намотанный лентой из трех проводов виток к витку [32] стр.150 рис.3.23.

Схема Рис.16.В [36] использует балун конструкции С.Trask [41].

Схема Рис.16.С [36] использует два ТДЛ для получения лучшей симметрии.

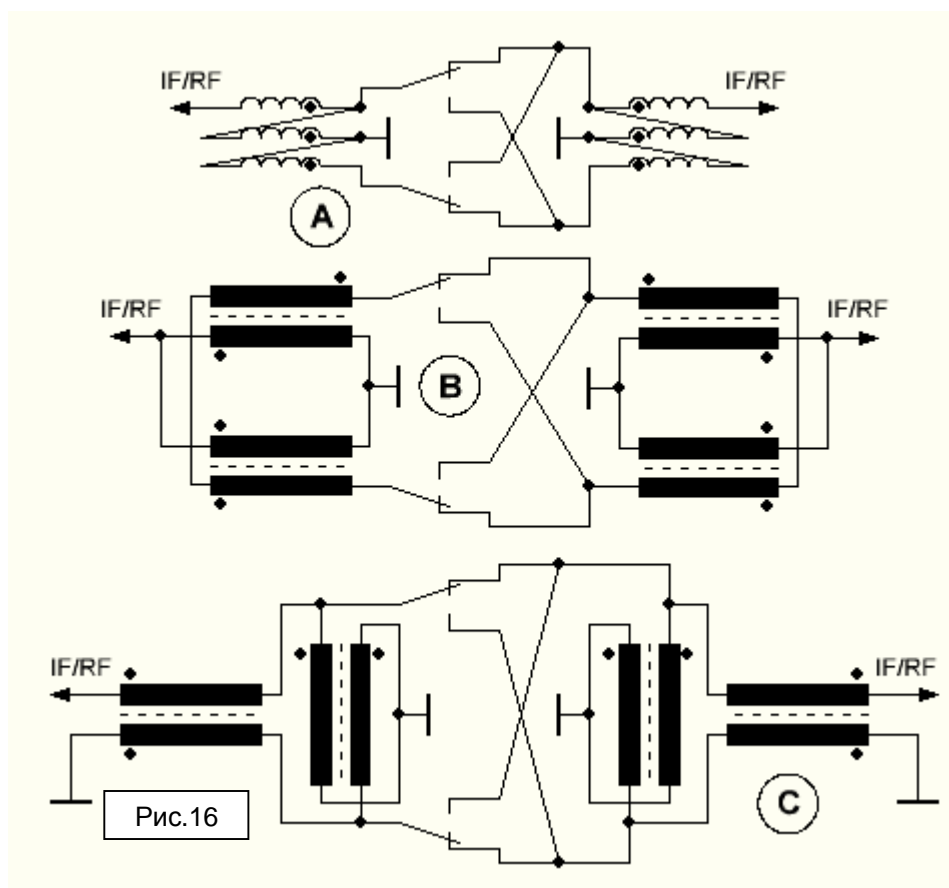
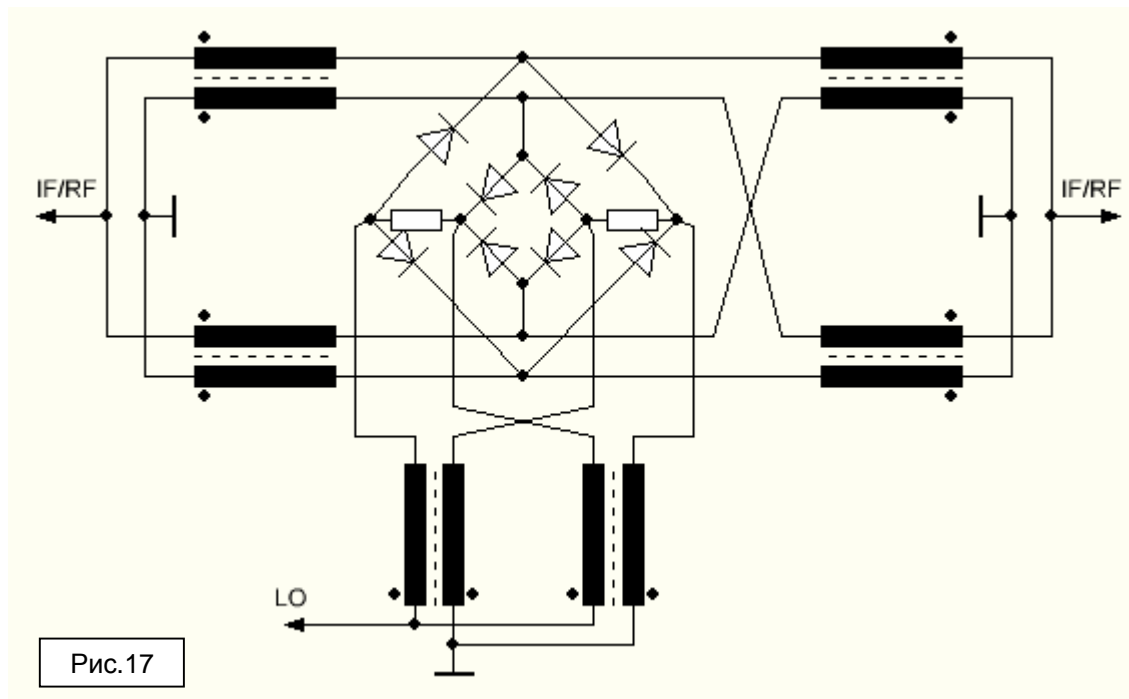
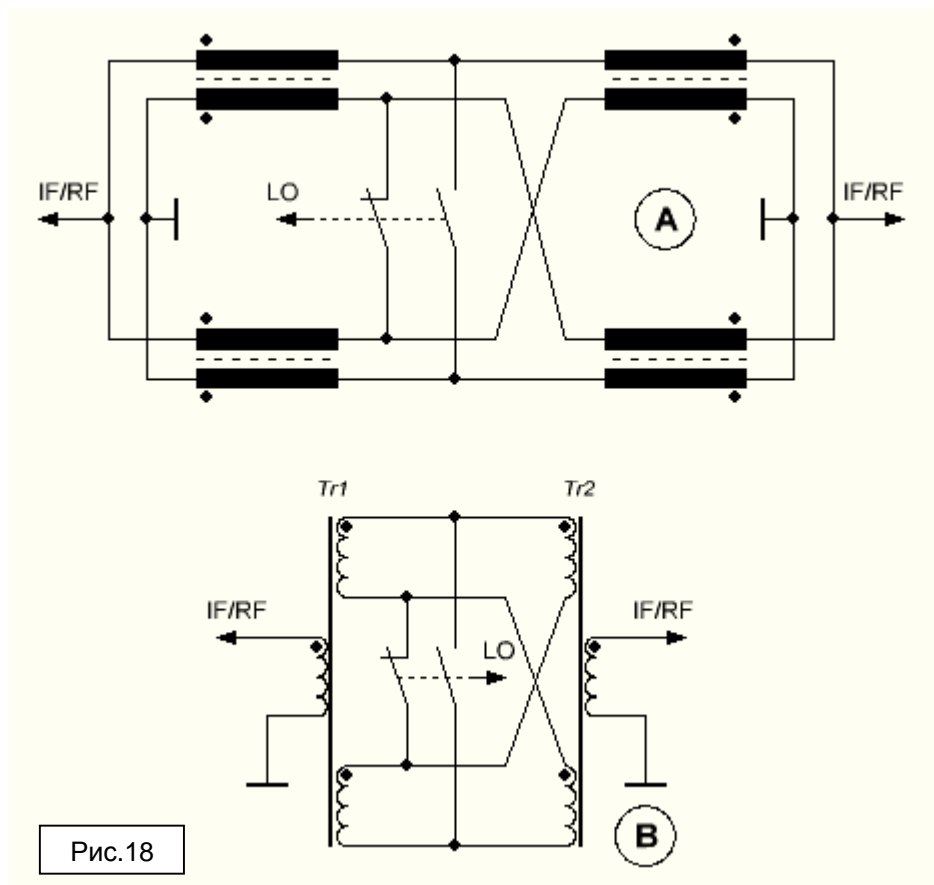


Рис.16

Интересная топология смесителя описана в патенте [18]. Смеситель задекларирован как «Broadband doubly balanced mixer having improved termination insensitivity characteristic», что в переводе означает: широкополосный двойной балансный, имеющий улучшенную нечувствительность к рассогласованию портов. Оригинальная схема смесителя из патента приведена на Рис.17.



Принцип действия смесителя понятен из Рис.18.А. В смесителе можно использовать обычные трансформаторы вместо ТДЛ - Рис.18.В



Смеситель может быть реализован как с использованием интегральных ключей, так и с применением диодных ключей. В последнем случае схема приобретает вид Рис 19.

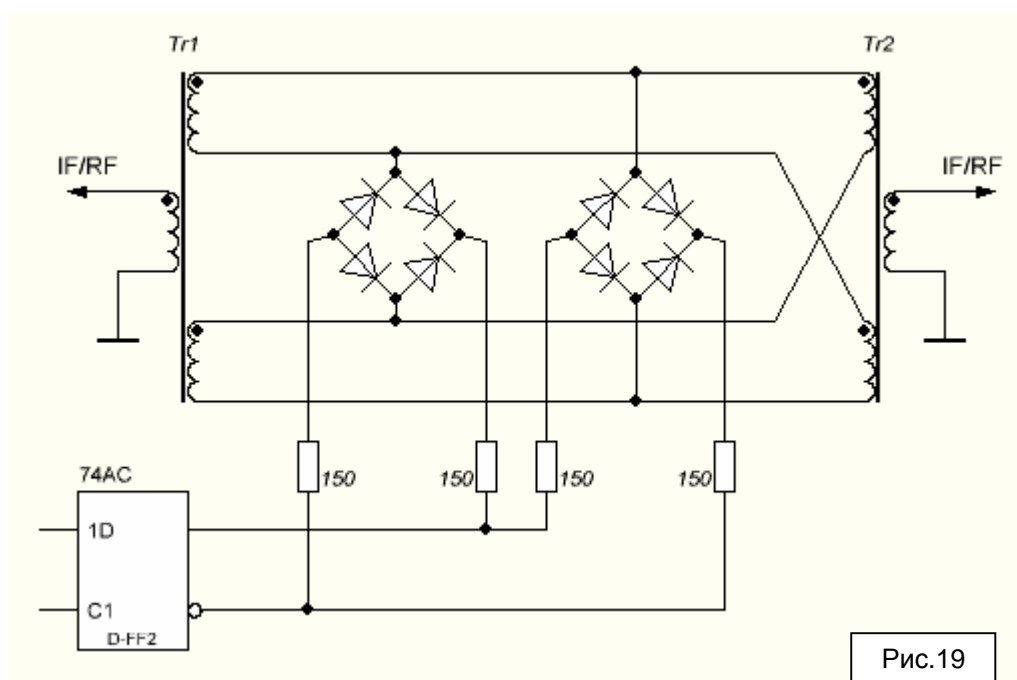


Рис.19

Оригинальную схему, переключавшуюся с рассмотренной, предложил Г.Брагин RZ4HK Рис.20 в [19]. Т.к. ключи не только коммутируют фазы, но и замыкают их на землю, то это потребовало введения двух дополнительных трансформаторов на входе и выходе для симметрирования.

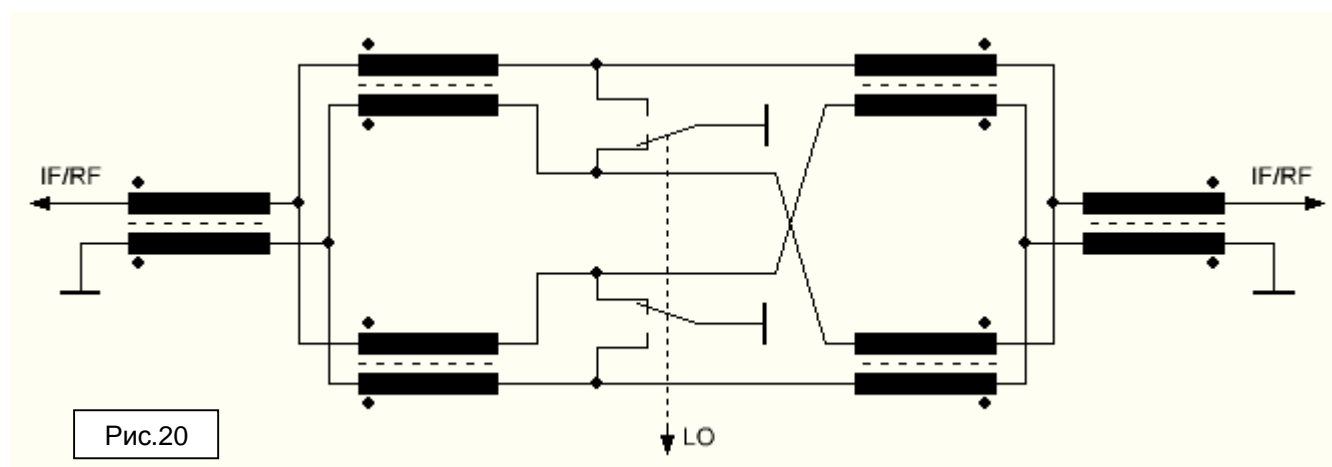


Рис.20

В случае если не требуется большая широкополосность то трансформаторы на линиях вполне можно заменить на обычные трансформаторы намотанные на кольцах или биноклях. Схема смесителя упрощается и приобретает вид Рис.21.

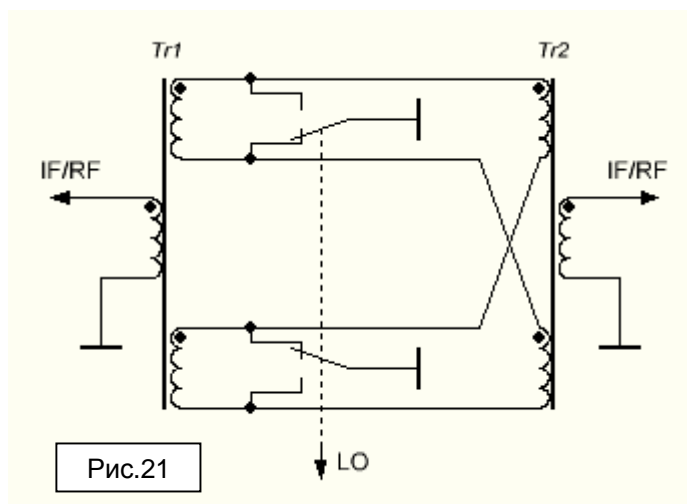
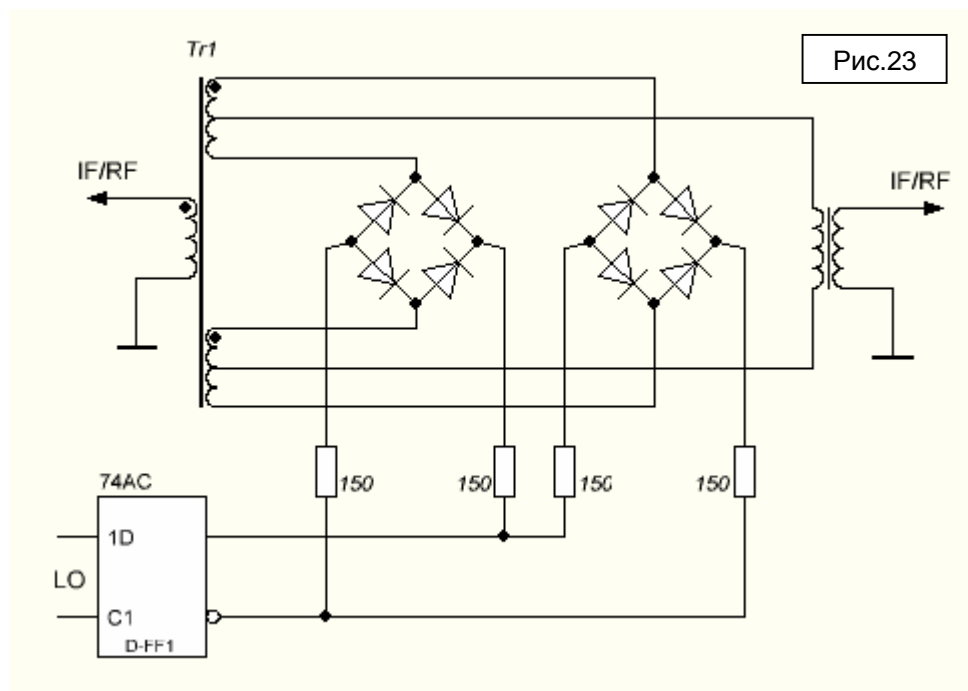
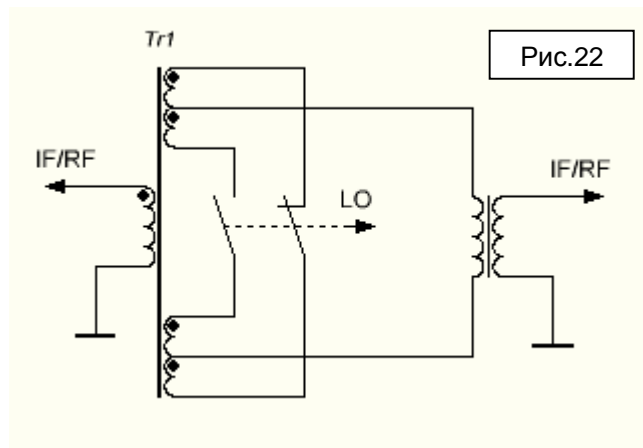


Рис.21

На Рис.22 представлена эквивалентная схема смесителя из патента [17].

В качестве ключей в патенте были использованы полевые транзисторы. Использование диодных ключей и цифрового гетеродина приводит нас к схеме Рис.23.

Трансформатор Tr1 может быть реализован на бинокле либо разделен на два трансформатора.



## 8. Высокоуровневые Termination Insensitive Mixers с заземленными ключами

Рассмотренные высокоуровневые смесители идеологически используют структурную схему Рис.4.В. Некоторый выигрыш можно получить используя структурную схему 1.В – т.е. заземляя один из выводов ключей. Такая топология может иметь несколько лучший параметр  $IP3$  и лучшую развязку портов.

На Рис.24 изображен процесс синтеза **TIM** из **DBM**.

Диодное кольцо разбивается на две пары диодов, каждая из которых открыта в соответствующий полупериод колебаний гетеродина. Напряжение гетеродина подается через разветвитель с синфазным выходом Рис.24.В.

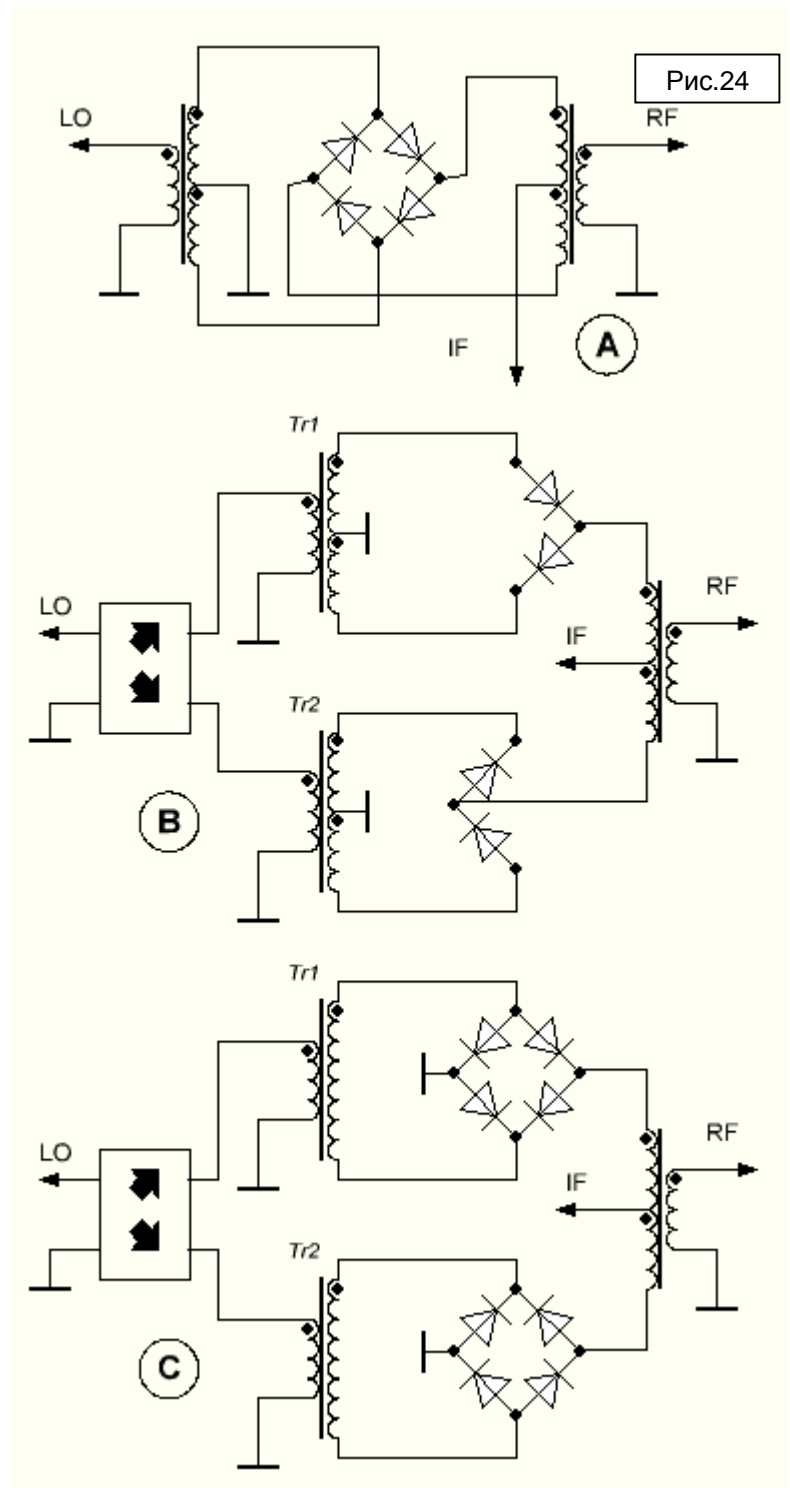
В данной схеме входной сигнал протекает через трансформаторы Tr1 и Tr2, что препятствует их объединению.

Если модифицировать схему так как показано на Рис.24.С, то мы устраним протекание входного/выходного сигнала через эти трансформаторы, что позволит их объединить в один и таким образом упростить схему.

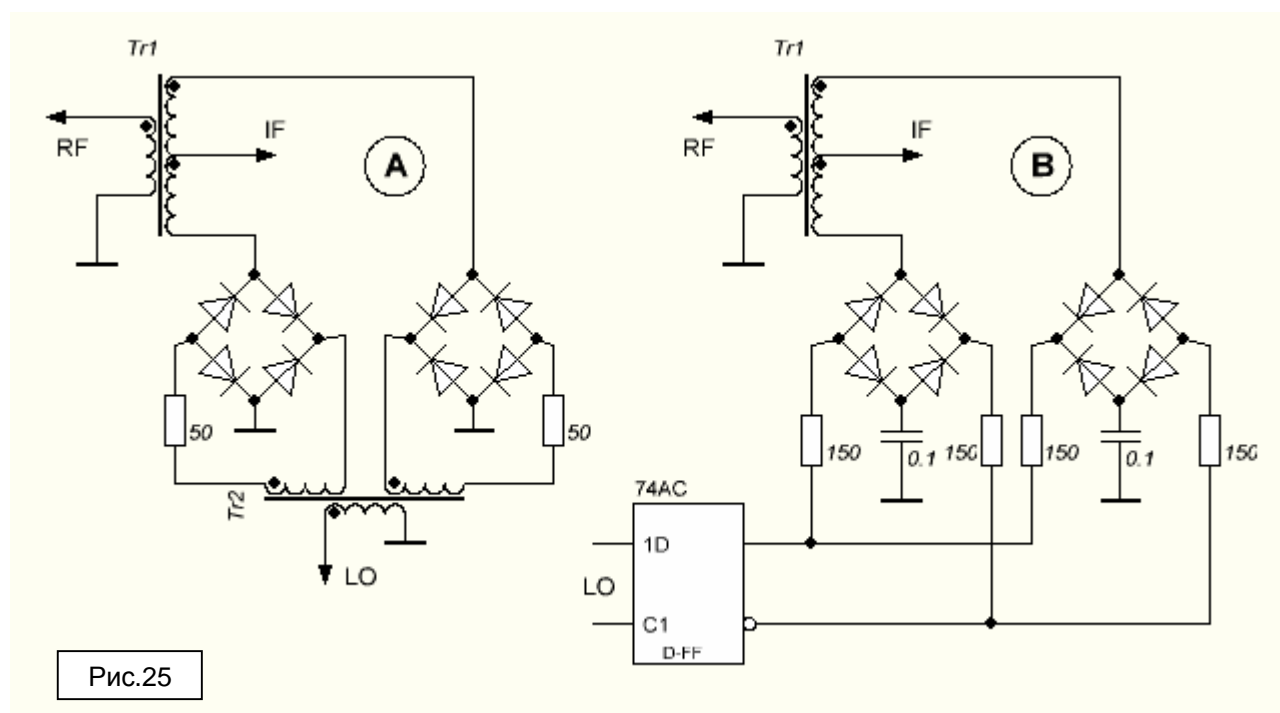
Таким образом, мы пришли к диодным ключам, построенным на четверке диодов. С подробным анализом процессов протекающих в таком диодном ключе можно ознакомиться в [1].

В случае «цифрового» гетеродина схема еще более упрощается т.к. Tr1 и Tr2 могут быть исключены.

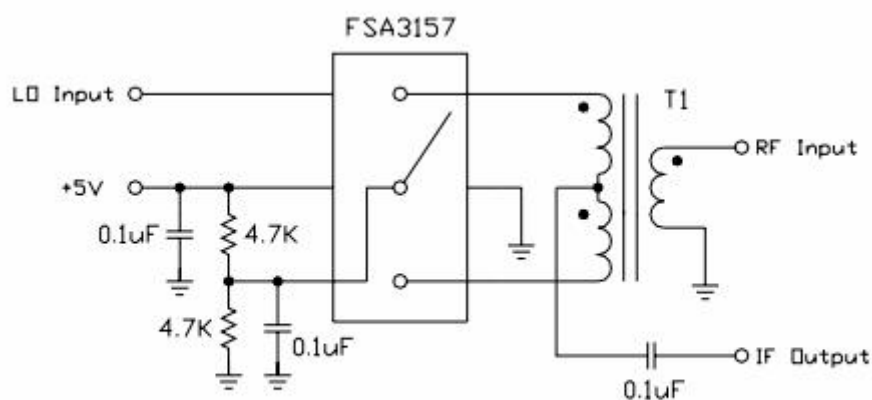
На Рис.25 приведены практические схемы таких смесителей.

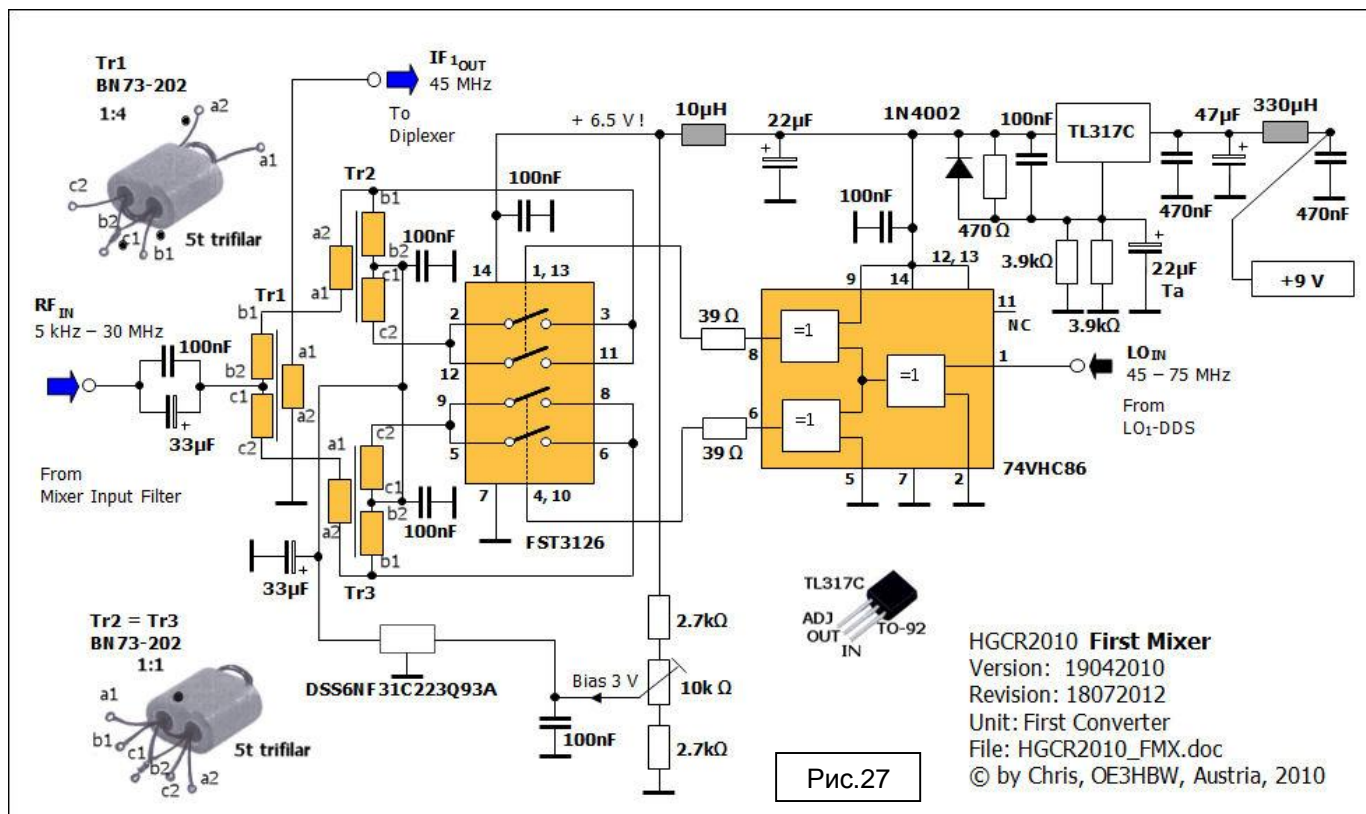


Смеситель на Рис.25.А применен в трансивере «Дружба-М» [26,61]. Смеситель с цифровым возбуждением на Рис.25.В применен в трансиверах НТ-981 [27] и 4Z5KY [28].

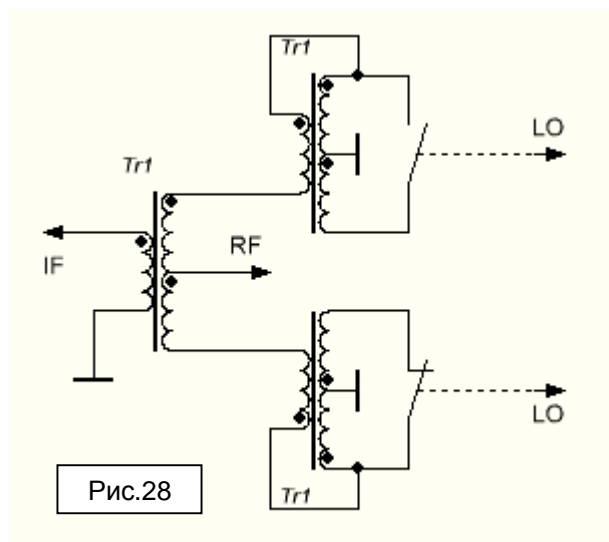


На Рис.26 представлена схема этого смесителя выполненная на современных интегральных ключах [5]. Смеситель имеет потери около 4dB и OIP3 >+40dBm (снижение до +29dBm на 50MHz). Важно отметить наличие цепей смещения по постоянному току, которые предназначены для повышения линейности ключа.





Интересная идея реализована в смесителе приемника HGCR2010 [43] Рис.27. Если посмотреть на обобщенную схему этого смесителя Рис.28, то становится очевидным, что сопротивление замкнутого ключа в данной схеме в 8 раз меньше чем в обычной – Tr2/Tr3 имеют коэффициент трансформации сопротивления 1:4, кроме этого ключи включены по два в параллель. Сопротивление замкнутого ключа согласно даташита составляет порядка 4ом. Соответственно к Tr1 подключены эквивалентные ключи с сопротивление  $4/8=0,5\text{ом}$ . Это уменьшает потери в смесителе. Но с другой стороны напряжение сигнала на ключах будет в 2 раза больше чем в схеме Рис.25, что может привести к снижению IP3. Так что схема нуждается в дальнейшем исследовании.



О. Скидан в [31] отмечает что при макетировании классического H-mode смесителя как на промышленных, так и на самодельных трансформаторах он получал падение IP3 с +35..+40dBm на 2MHz до +25..+30dBm на 30MHz. Использование ТДЛ позволяет расширить частотный диапазон и улучшить параметр IP3 на высоких частотах.

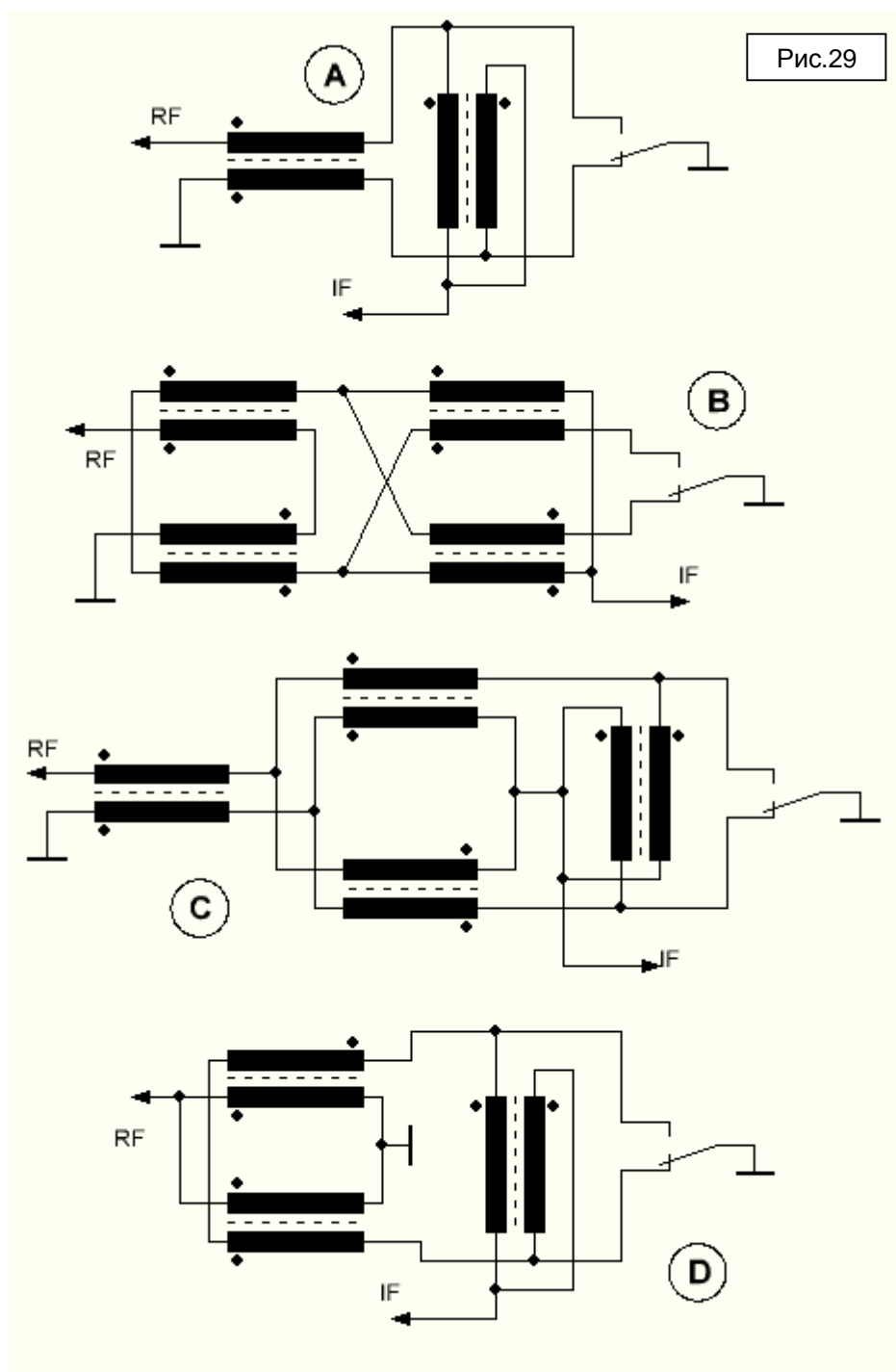
Применение ТДЛ в смесителях имеет некоторые тонкости – для правильной работы линии должны быть всегда корректно терминированы.

На Рис.29.А представлена схема смесителя на ТДЛ из [1]. И.Усихин RW3FY в [37] подверг эту схему критике и выдвинул гипотезу, что работа схемы улучшится, если ее вход задействовать как симметричный.

На Рис.29.В изображен TLT-mode смеситель Г. Брагина RZ4HK [33]. О.Скидан в [31] указывает, что неподключенные обмотки линии создают дополнительную емкость, которая ухудшает широкополосность смесителя. Несмотря на это смеситель имеет очень высокие параметры, подтвержденные независимыми измерениями [34].

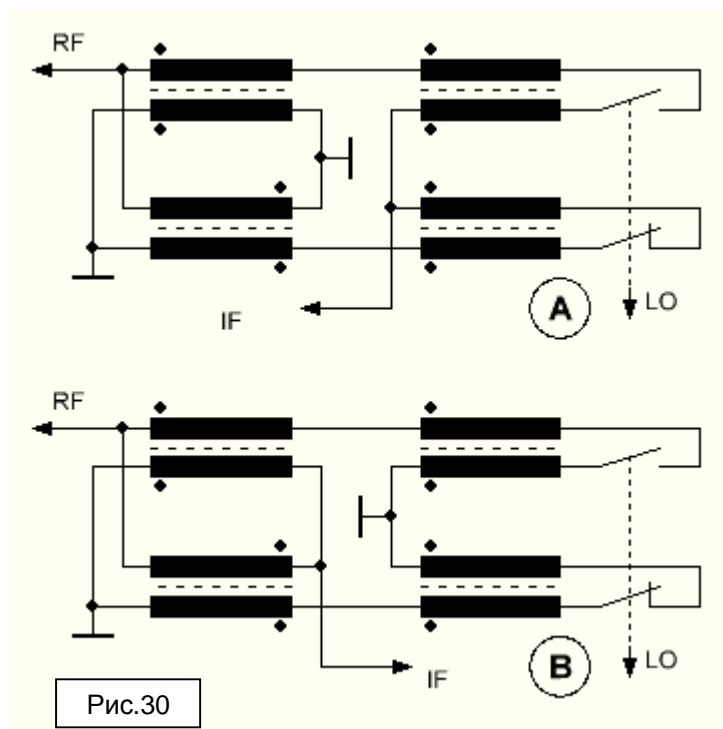
На Рис.29.С представлена новая топология ТДЛ-смесителя конструкции Г.Брагина RZ4HK [19]. По сравнению с предыдущими двумя схемами данный смеситель имеет улучшенную симметрию по входу и сохранение режима работы линий.

Используя балун конструкции Chris Trask [41] можно построить смеситель конструкции UR5FFR Рис.29.D [36]. ТДЛ, входящие в состав балуна могут быть попарно объединены и выполнены на одном сердечнике.



Рассмотренную ранее (см. Рис.9) схему из патента [47] можно реализовать на ключах Рис.30.А, что существенно улучшит ее параметры.

Другой вариант с очень близкой топологией предложил Reinhold «KubiK» [51] Рис.30.В. Используя ключи 74НС4066 по два в параллель он получил значение  $IP3=+19\text{dBm}$  при напряжении питания ключей 5в,  $+25\text{dBm}$  при питании 6в и  $+27\text{dBm}$  при питании 7в. При этом потери в смесителе составляют 5dB при частоте гетеродина меньше 25MHz. С ростом рабочей частоты потери увеличиваются и достигают 7dB на частоте 50MHz и 9dB на частоте 70MHz.



На Рис.31 приведена структурная схема termination-insensitive mixer, предложенная Adams Russell

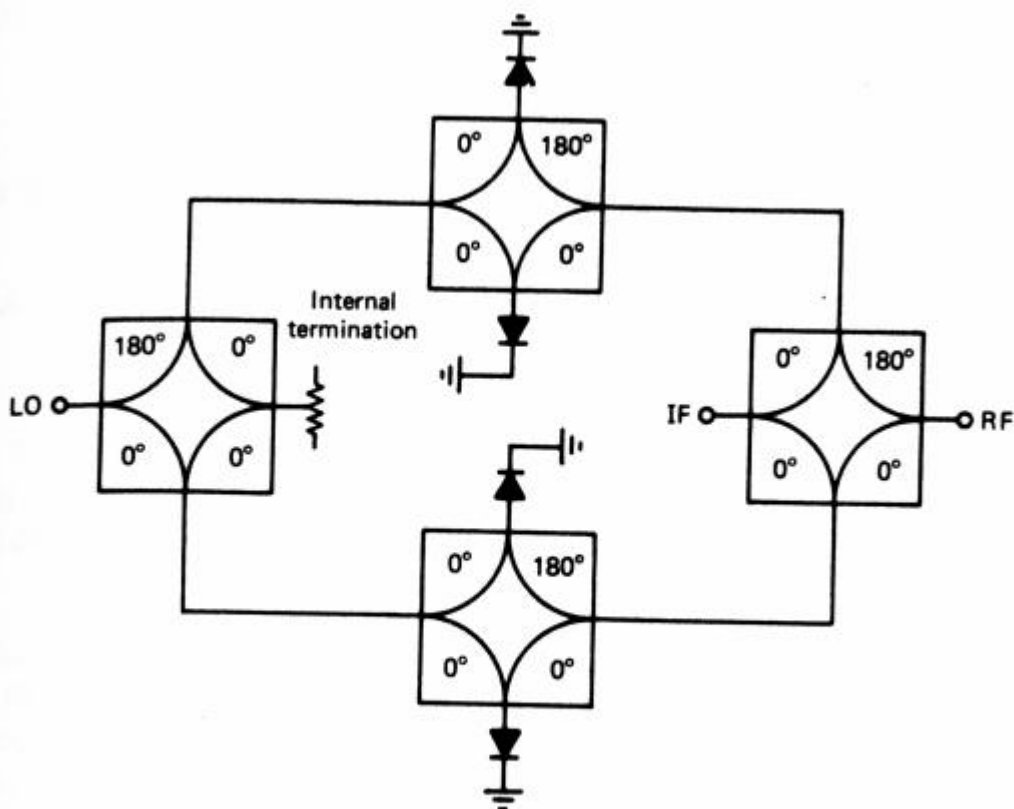
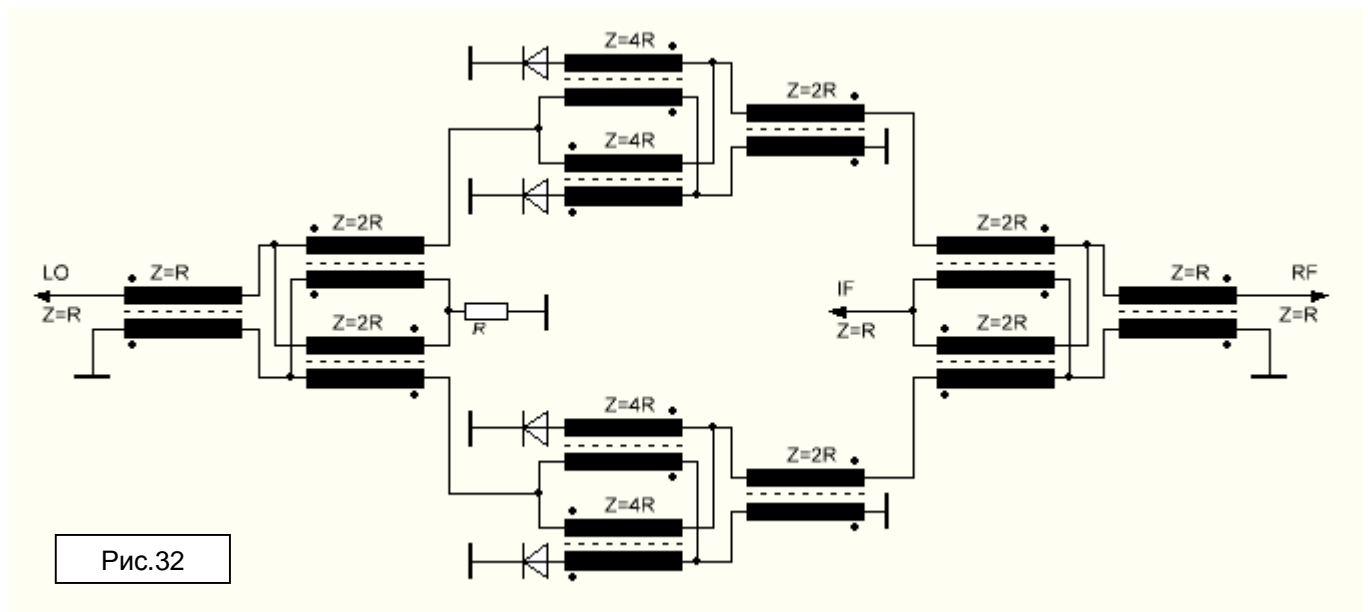


Рис.31

Division.)

Termination-insensitive mixer. (Courtesy of Adams Russell, Anzac

На Рис.32 приведена схема реализации этого смесителя на ТДЛ.

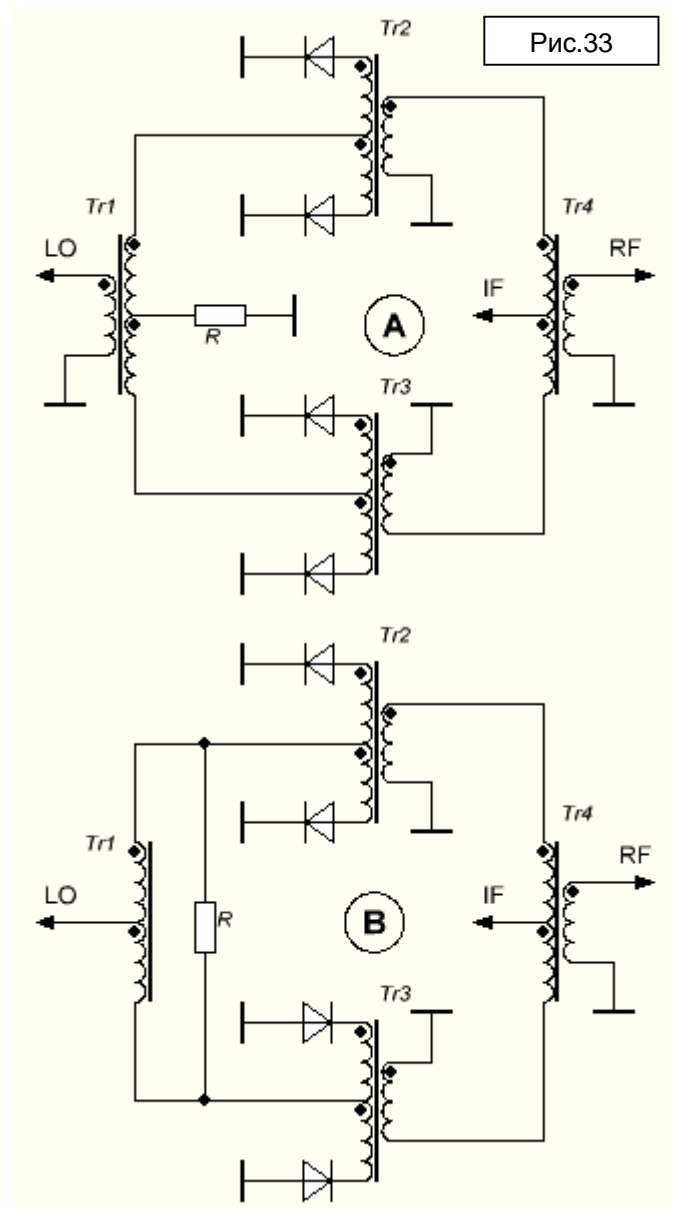


Если не требуется высокая широкополосность то смеситель можно реализовать на трансформаторах Рис.33.

Вариант Рис.33.А полностью соответствует приведенной выше блок-схеме смесителя и использует  $180^\circ$ -гибрид на трансформаторе.

Вариант Рис.33.В отличается тем, что по гетеродинному входу используется т.н. magic-tee гибрид, который не изменяет фазу сигнала. Это потребовало изменения полярность включения диодов в одном из плеч.

Результаты моделирования подтверждают, что если исключить гибрид в цепи гетеродина, то смеситель перестает быть **ТТ**-смесителем высокого уровня и ограничение сигнала на выходе наступает при амплитуде равной напряжению отсечки примененных диодов. В то же время если на входе присутствует гибрид, то ограничение наступает при амплитуде равной напряжению гетеродина.

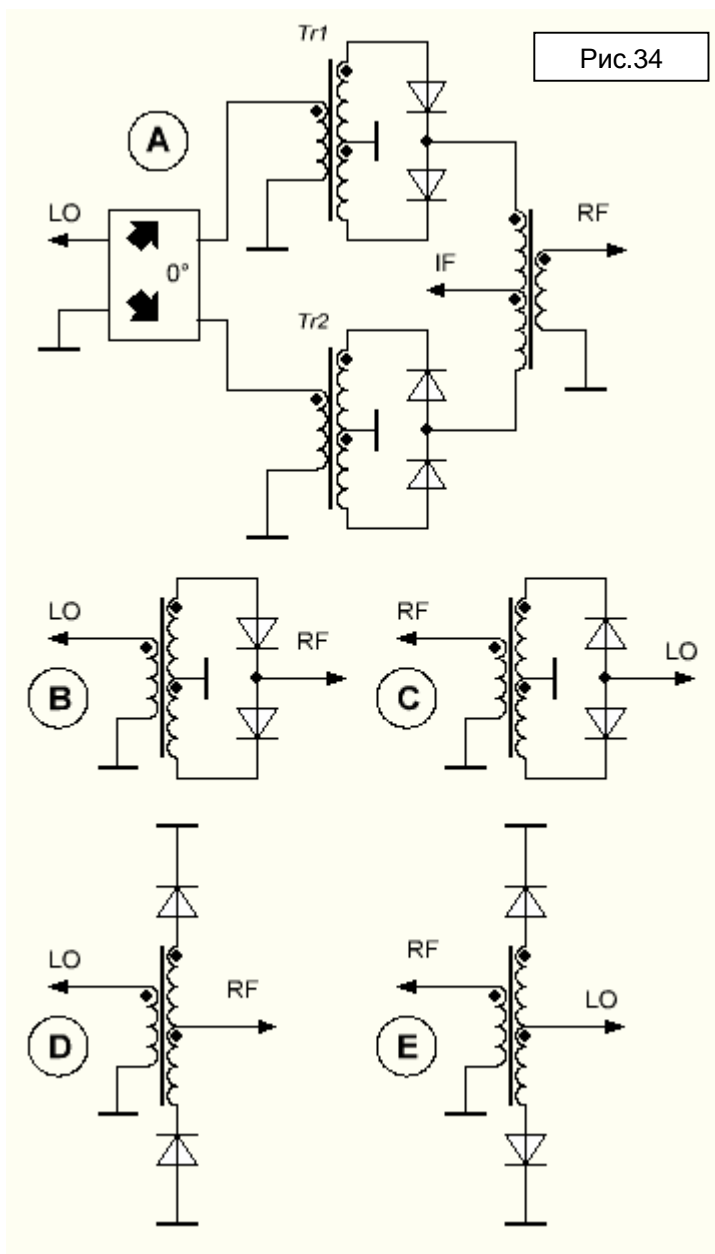


Для того чтобы было понятно каким образом были синтезированы смесители Рис.31-33, вспомним процесс синтеза **TIM** из **DBM** приведенный в начале главы на Рис.24. В начале главы мы не остановились на промежуточном результате и сразу перешли к рассмотрению ключей на диодных мостах. Рассмотрим более подробно промежуточный результат рис.34.А.

Обратим внимание на ключи образованные двумя диодами и трансформатором Рис.34.В. Они коммутируют вход RF на землю и обладают свойством изоляции портов, которая определяется неидентичностью диодов и асимметричностью используемого трансформатора.

При соответствующем изменении включения диодов мы можем изменить назначение входов Рис.34.С. Так же ничто не мешает нам заземлить точку соединения диодов, а сигнал подавать на средний отвод вторичной обмотки трансформатора и получить схемы Рис.34.Д и Е. А такое включение трансформатора является ничем иным как  $180^\circ$ -гибридом.

Таким образом мы показали, что смеситель предложенный Adams Russel Рис.31 является **TIM** и может быть синтезирован из обычного **DBM**.



Трижды балансная версия **TIM** изображена на Рис.35.А. В англоязычной литературе такая реализация известна под названием **H-mode mixer** [12].

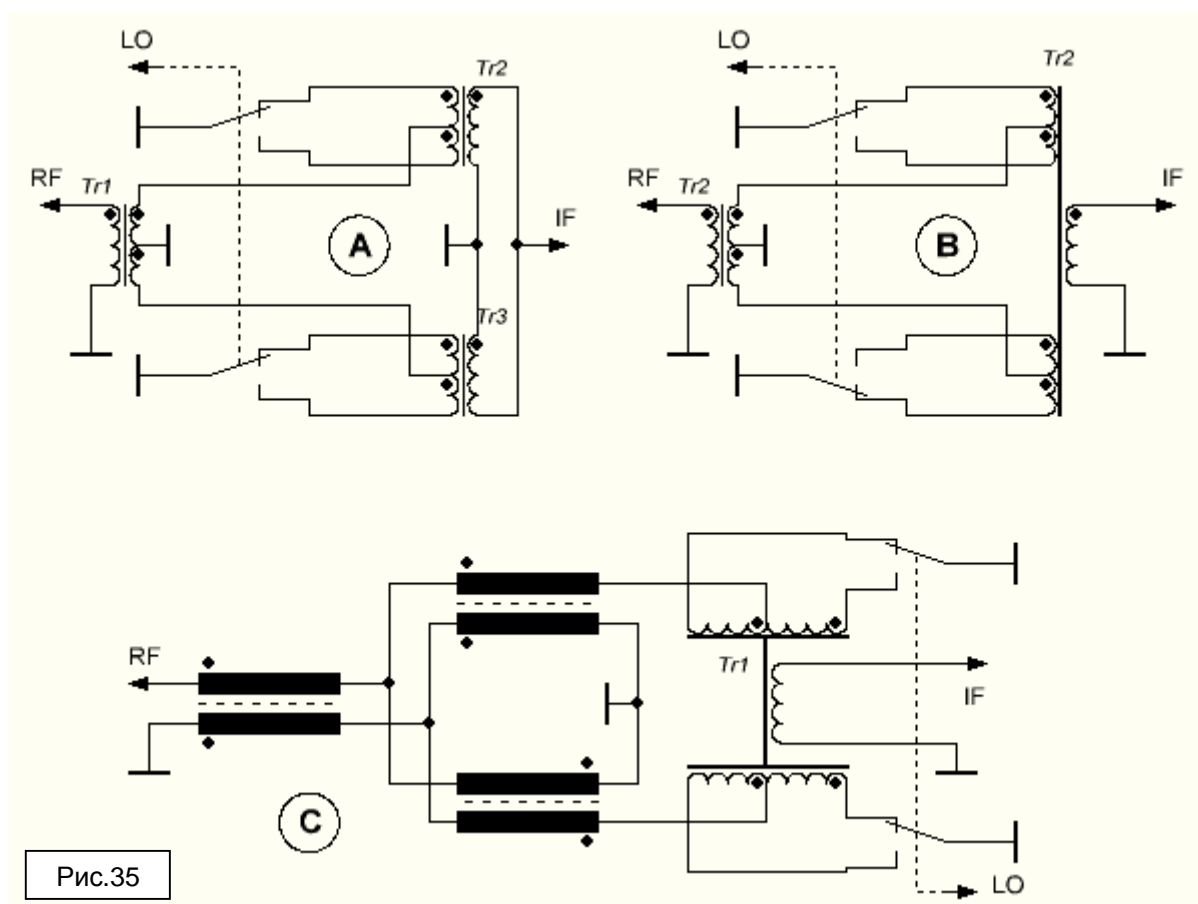
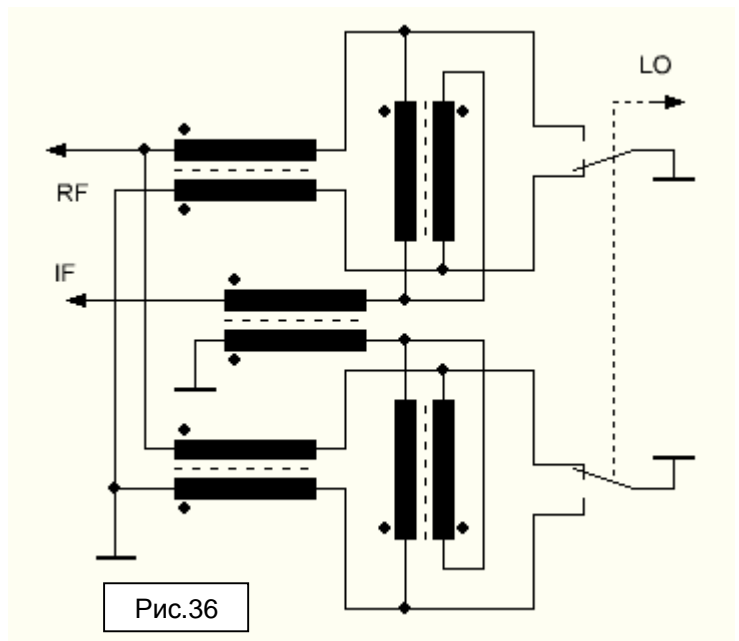


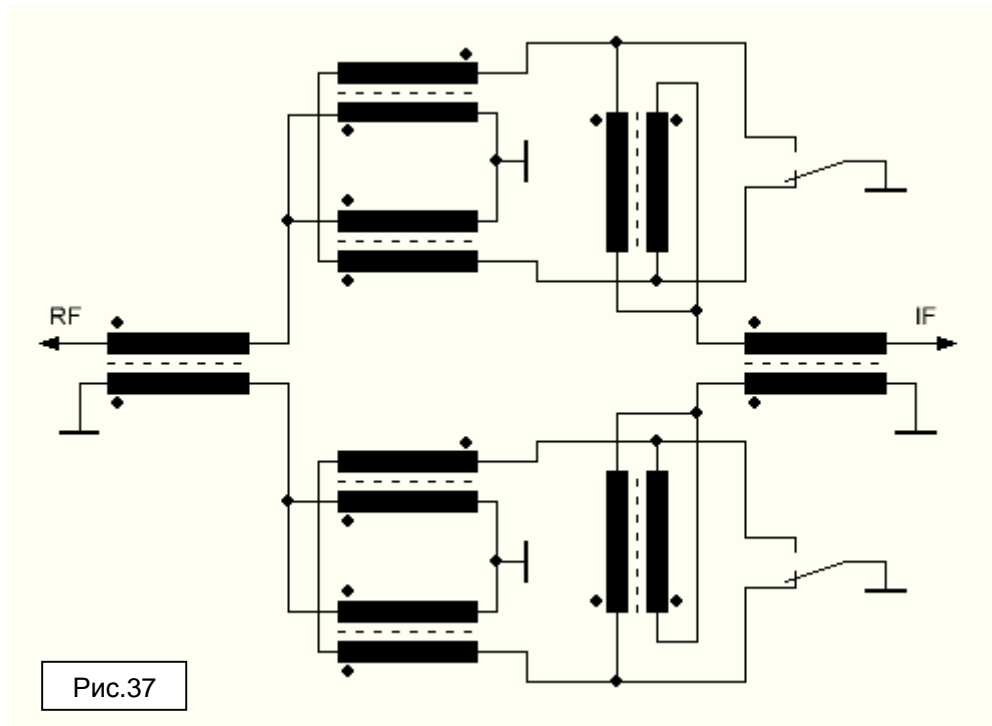
Рис.35

Используя интегральные ключи FST/FSA можно получить IP3 не хуже +40..+45dBm при потерях преобразования порядка 5dB [11]. Существует несколько различных вариантов данного смесителя отличающиеся реализацией трансформаторов. На Рис.35.В показана конфигурация известная под названием 2Т-Н-Mode [30]. Г.Брагин в трансивере MiniYES [29] предложил заменить входной симметрирующий трансформатор на Guanella balun, а Tr1 выполнить на бинокле Рис.35.С.

На Рис.36 показана реализация “True” TLT H-mode mixer конструкции О. Скидан [31]. Практически аналогичную схему предложил ранее И.Усихин RW3FY в [37], которая отличается наличием дополнительных ТДЛ для обеспечения лучшей симметрии смесителя.



Используя балун конструкции Chris Trask [41] можно построить H-mode смеситель Рис.37 [36].



## 9. Широкополосное согласование портов

Следует понимать что пассивный смеситель трансформирует импеданс нагрузки к своему входу, причем как и выходной импеданс источника сигнала к выходу. Поэтому подключение нагрузки которая имеет частотнозависимый импеданс (например КФ) и/или использование источника с частотнозависимым выходным импедансом (например полосовые фильтры) приводят к несогласованности импедансов по портам смесителя и ухудшению его параметров, в частности IP3.

Исследования модели 8ми резонаторного кварцевого QER-фильтра из [57] в моделировщике RFSimm99 показывает, что при отстройке на частоту равную частоте пропускания фильтра его импеданс составит  $168k\Omega || 25pF$ . При более сильных отстройках импеданс фильтра становится полностью реактивным. Например при отстройках  $\pm 1MHz$  он составляет  $7pF$ . В ближней зоне на скатах АЧХ наблюдаются существенные всплески реактивности. Например, на нижнем скате точка  $-10dB$  импеданс составит  $127\Omega || 260pF$ . Аналогичный всплеск наблюдается и на верхнем скате, но с противоположным знаком реактивности (т.е. она имеет индуктивный характер).

Исследуя в RFSimm99 двухконтурный полосовой фильтр диапазона 40м с емкостными делителями по входу/выходу можно обнаружить, что вне полосы при значительных отстройках порядка нескольких MHz его выходной импеданс имеет полностью реактивный емкостный характер с величиной порядка  $2..4nF$ . При этом предполагалось, что источник имеет постоянный выходной импеданс  $50\Omega$ . В реальных условиях источником сигнала у нас обычно является резонансная антенна, для которой это условие не выполняется. Но несмотря на это расчеты в моделировщике показывают что реактивность антенны вне резонансной частоты влияет на выходной импеданс системы антенна+ДПФ крайне незначительно и этим можно пренебречь.

Известные методы широкополосного согласования портов смесителя:

1. **Аттенюатор.** Пожалуй самый простой метод приведения импеданса источника/нагрузки к требуемому активному. Часто используется при измерении параметров смесителя. В приемных трактах используется обычно только на низкочастотных диапазонах т.к. приводит к падению чувствительности.
2. **Диплексер.** Достаточно распространенное решение по согласованию выхода смесителя с входом КФ. Позволяет получить очень хорошее согласование на больших отстройках. Не работает при малых отстройках. Алгоритмы расчета диплексера можно найти в [2,3,53,54].
3. **Схема с двумя квадратурными каналами.** Описание есть в [2] Рис.2.86. Суть метода в том что после смесителя ставят пассивный двунаправленный квадратурный разветвитель (гибрид) [58, 59] который формирует два канала с взаимным сдвигом фаз в  $90^\circ$ . Каждый из каналов поступает на свой КФ с идентичными характеристиками. Выходы КФ объединяются посредством квадратурного сумматора. Суть метода заключается в том, что отраженные в КФ сигналы проходя обратно через квадратурный гибрид оказываются в противофазе и взаимно компенсируются, не попадая в смеситель. Метод работает достаточно хорошо как на малых, так и на больших расстройках. Из практических реализаций можно отметить [43, 60].
4. **Каскад усиления с частотнонезависимым импедансом по входу/выходу.** Обычно это каскад на ПТ по схеме с ОЗ, хотя возможны и другие варианты схемотехники. Метод обеспечивает согласование в широкой полосе частот.

Чаще всего по выходу смесителя применяются варианты (2) и (4) в различных комбинациях. Метод (3) используется сравнительно редко, т.к. требует наличия двух КФ с очень близкими параметрами, что не всегда достижимо в любительских условиях.

Важно отметить, что увлекаясь согласованием смесителя по выходу часто забывают о необходимости согласования по входу. В [52] проводится детальное исследование работы

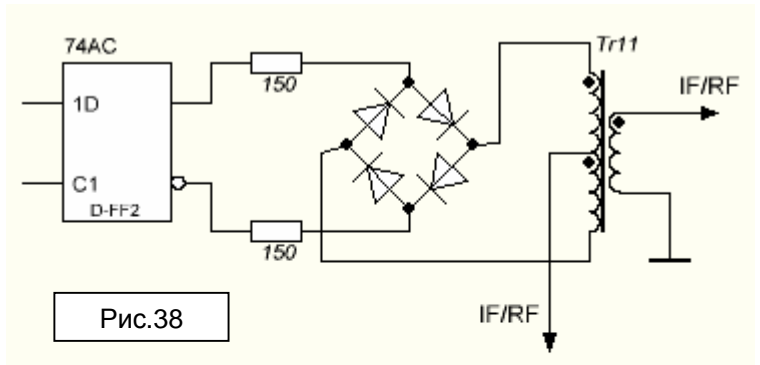
классического кольцевого DBM в условиях рассогласования по входу/выходу. В частности отмечается тот факт, что при идеальном согласовании выхода смесителя использование в качестве источника сигнала ДПФ без принятия мер по широкополосному согласованию стыка ДПФ-смеситель приводит к уменьшению  $IP_3$  на 9dB.

Из практических вариантов согласования смесителя по входу с ДПФ можно отметить использование не отключаемого УВЧ [27,29,61,62]. Также существенно улучшить ситуацию с согласованием может применение аттенюатора между ДПФ и смесителем. Обычно такая мера применяется на низкочастотных диапазонах, где чувствительность тракта избыточна, а требования к ДД повышены.

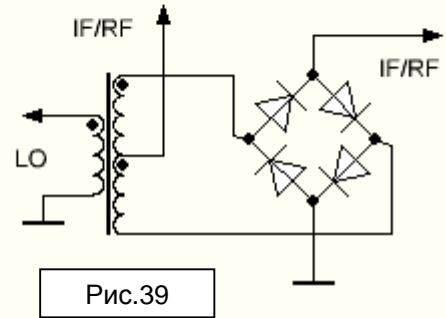
Все ранее сказанное в полной мере справедливо для классических кольцевых диодных смесителей. Насколько все это справедливо для высокоуровневых «нечувствительных к нагрузке смесителям» - вопрос открытой и требует детального исследования. Так например О.Скидан в [63] исследуя зависимость  $IP_3$  смесителя на двух КП905 в режиме пассивных ключей подключенного непосредственно к ДПФ отметил что подключение КФ без использования диплексера дает значение  $IP_3=+4.5dBm$ , использование диплексера с терминированием 50ohm дает  $IP_3=+15..+19.5dBm$ , а использованием диплексера с zero termination дает  $IP_3=+30..+42dBm$ . Является ли такая зависимость типичной для **ТМ** или это свойство конкретной реализации – к сожалению опубликованные данные экспериментов не позволяют однозначно ответить на этот вопрос.

## 10. Ошибки и нерабочие схемы

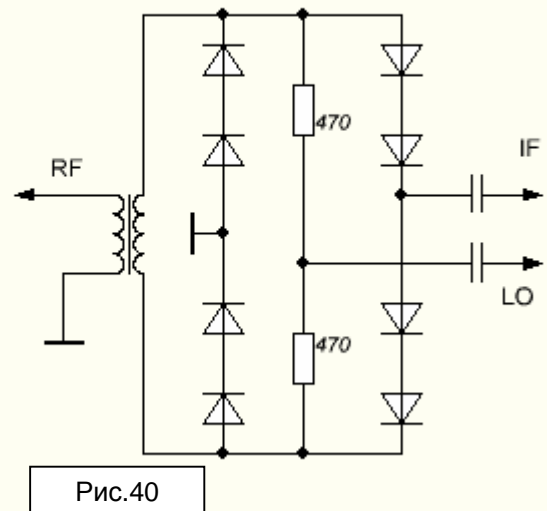
В свое время желание автора упростить кольцевой смеситель и сэкономить на трансформаторах в InfraSDR [22] привело к появлению схемы Рис.38. Ее нельзя назвать удачной, т.к. в цепь сигнала оказывается включенным сопротивление  $150/2=75\Omega$ , что приводит к потерям в Кпер и рассогласованию по портам.



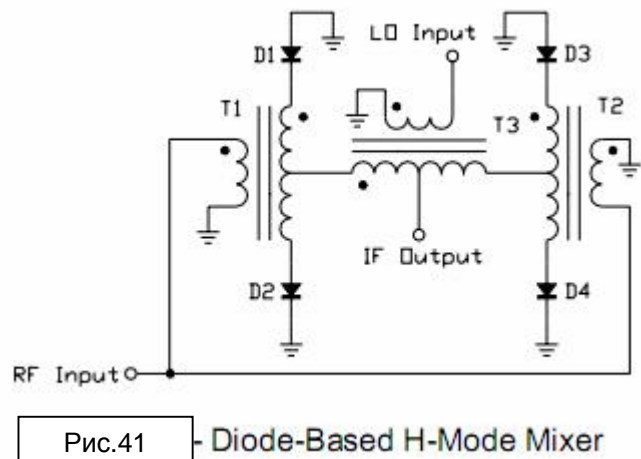
На Рис.39 приведена схема смесителя популярного трансивера BITX [23]. В процессе работы смесителя при положительной полуволне открываются верхние два диода, при отрицательной – нижние. В результате смеситель работает как обычный ключ и имеет потери на 6dB больше чем обычный DBM. Справедливости ради стоит отметить, что в последующем доработанном варианте BITX20A смеситель заменен на классический DBM.



Следующая схема Рис.40 из конструкции RX9CDR [24]. Неискушенный радиолюбитель может подумать, что мы имеем дело с качественным высокоуровневым смесителем – аж целых восемь диодов! Ничего подобного. Смеситель ограничивает выходной сигнал при амплитуде равной удвоенному напряжению отсечки примененных диодов. Но и это не самое главное. Существенным недостатком этого смесителя является проникновение сигнала гетеродина на порт IF с достаточно высоким уровнем (порядка несколько сотен mV). При этом в схеме тракта порт IF смесителя подключен непосредственно к каскаду с ОЗ без диплексера. Таким образом сигнал гетеродина проникает с высокой амплитудой в первый каскад УПЧ. Ни о какой динамике этого решения не может быть и речи.



И на закуску – фрагмент схемы Chris Trask из [5] Рис.41. Автор приводит эту схему в качестве аргумента, критикуя H-mode mixer. Дескать, вот я сделал H-mode mixer на диодах, измерил его IP3 и оказалось что он такой же, как и у классического кольцевого DBM. Отсюда автор делает вывод, что H-mode топология не имеет никаких преимуществ перед обычной кольцевой. На самом деле если внимательно посмотреть на схему смесителя то становится очевидно, что он не является высокоуровневым **ТИМ**, т.к. ограничение наступает уже при амплитуде на выходе равной напряжению отсечки диодов. Соответственно и параметры этого смесителя не могут кардинально отличаться от параметров обычного кольцевого DBM.



## 11. Литература

1. Б.М.Богданович, Радиоприемные устройства с большим динамическим диапазоном, 1984
2. Э.Ред, Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике, 1990
3. M.Wilson, Mixers, Modulators and Demodulators, ARRL Handbook, <http://mxh.strefa.pl/pliki/tech/book2006/11.pdf>
4. PassiveMixers by Ali M.Niknejad, [http://rfic.eecs.berkeley.edu/~niknejad/ee142\\_fa05lects/pdf/lect20.pdf](http://rfic.eecs.berkeley.edu/~niknejad/ee142_fa05lects/pdf/lect20.pdf)
5. "Mixer Musing and the KISS Mixer" by Chris Trask N7ZWY [http://www.mikrocontroller.net/attachment/146369/Mixer\\_Musings.pdf](http://www.mikrocontroller.net/attachment/146369/Mixer_Musings.pdf)
6. Патент US4637069, Doubly balanced diode mixer by Roger Charbonnier 1985
7. AVAGO AppNotes 5380, Double balanced diode mixer using the HSMS-2822, <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1100EN>
8. Патент US4119914, Double balanced mixer using single ferrite core by John Duncan 1977
9. LA7MI mixer experiments, <http://www.agder.net/la8ak/12345/n16.htm>
10. Патент US6041223, High level diode mixer by Robert McLaren Thomas 2000
11. H-mode mixer home <http://martein.home.xs4all.nl/pa3ake/hmode/>
12. A "Double Balanced "H-mode" mixer for HF" Sergio Cartoceti, IK4AUU, QEX Jul/Aug 2004, <http://www.ab9il.net/software-defined-radio/h-mode-mixer-ik4auy.pdf>
13. Analog Switches as Mixers, <http://www.oelira.at/sl/mix.html>
14. "Notes on the Basic Operation of Commutative Mixers" by Andrew Smith G4OEP. [http://g4oep.atSPACE.com/mixers/notes\\_on\\_the\\_basic\\_operation\\_of.htm](http://g4oep.atSPACE.com/mixers/notes_on_the_basic_operation_of.htm)
15. H-MODE HIGH LEVEL MIXER FOR HF WITH bus switch ICs [http://ik4auy.xoom.it/h-mode\\_links.htm](http://ik4auy.xoom.it/h-mode_links.htm)
16. H-mode mixer implementation by G3OOU, <http://www.qsl.net/g3oou/solidstatecircuits9.html>
17. Патент US4727596, High dynamic range mixer by Aubrey Jaffer 1988, <http://people.csail.mit.edu/jaffer/Mixer/>
18. Патент US4224572, Broadband doubly balanced mixer having improved termination insensitivity characteristic, Peter Will, 1980
19. НОВЫЙ СМЕСИТЕЛЬ НА TLT, Г.Брагин RZ4HK, <http://www.cqham.ru/forum/showthread.php?t=6206>
20. 180grad RF Hybrid by Michael Ellis, <http://michaelgellis.tripod.com/180hybrid.html>
21. Magic "T" combiner-splitter by W8JI, [http://www.w8ji.com/combiner\\_and\\_splitters.htm](http://www.w8ji.com/combiner_and_splitters.htm)
22. InfraSDR by А.Н.Белоконь UR5FFR, <http://dspview.com/viewtopic.php?f=9&t=15>
23. BITX TRX by Ashhar Farhan [http://www.cqham.ru/BITX\\_rus.htm](http://www.cqham.ru/BITX_rus.htm)
24. Основная плата КВ радиостанции RX9CDR, <http://www.cqham.ru/op38.htm>
25. Transformers and Hybrids [http://www.ece.jcu.edu.au/subjects/ee4306/lectures/RF\\_Electronics\\_Kikkert\\_Ch3\\_RFTransformers.pdf](http://www.ece.jcu.edu.au/subjects/ee4306/lectures/RF_Electronics_Kikkert_Ch3_RFTransformers.pdf)
26. Коротковолновый трансивер "Дружба-М". С.Тележников RV3YF, <http://www.cqham.ru/druzba-m.htm>
27. Коротковолновый трансивер HT-981, А.Л.Белянский US2II, <http://www.cqham.ru/ht981.htm>
28. Основная плата трансивера 4Z5KY, [http://www.cqham.ru/trx75\\_23.htm](http://www.cqham.ru/trx75_23.htm)
29. MiniYES Одноплатный тракт трансивера, Г. Брагин, RZ4HK, <http://www.cqham.ru/MiniYES.htm>
30. 2-Transformer H-Mode mixer, <http://martein.home.xs4all.nl/pa3ake/hmode/2t-hmode.html>
31. The "True" TLT H-mode Mixer by Oleg Skydan UR3IQO, QEX Jul/Aug 2010 [http://neon.skydan.in.ua/downloads/The\\_True\\_TLT\\_H-mode\\_Mixer.pdf](http://neon.skydan.in.ua/downloads/The_True_TLT_H-mode_Mixer.pdf)
32. С.Г.Бунин, Л.П.Яйленко, Справочник радиолюбителя-коротковолновика, 1984
33. Новый смеситель на ШТЛ, Г. Брагин RZ4HK, [http://www.cqham.ru/trx86\\_49.htm](http://www.cqham.ru/trx86_49.htm)
34. TLT-mode mixer by RZ4HK, <http://martein.home.xs4all.nl/pa3ake/hmode/tlt-hmode.html>
35. Патент US3383601, MIXER CIRCUIT EMPLOYING LINEAR RESISTIVE ELEMENTS by William K. Squires 1968
36. TLT-mixer by UR5FFR, <http://dspview.com/viewtopic.php?f=13&t=105>

37. Смесители с трансформаторами на длинных линиях. И.Усихин RW3FY, ж-л РадиоДизайн №25, 2008/2009
38. Трансивер SW2012 от UR3LMZ, <http://www.cqham.ru/forum/showthread.php?t=19271>
39. Ключевой смеситель на микросхеме ADG774, С.Макаркин RX3АКТ, [http://www.cqham.ru/mix\\_akt.htm](http://www.cqham.ru/mix_akt.htm)
40. A high-dynamic-range MF/HF receiver front end, Jacob Makhinson N6NWP, QST №2/1993, <http://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/qst/1993/02/page23/index.html>
41. A Single-Core 4:1 Current Balun of Improved Performance, Chris Trask N7ZWY, <http://home.earthlink.net/~christrask/Trask4to1Balun.pdf>
42. Taking the mystery out of diode double-balanced mixers By Shankar Joshi, QST №12/1993, <http://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/qst/1993/12/page32/index.html>
43. HGCR2010 - General Coverage Receiver (5 kHz - 30 MHz), <http://www.qth.at/oe3hbw/Projects/HGCR2010/HGCR2010.htm>
44. Bert C.Henderson, Mixers: Theory and Technology, [http://www-atom.fysik.lth.se/QI/laser\\_documentation/Selected\\_articles/wj%20Mixers\\_part\\_2.pdf](http://www-atom.fysik.lth.se/QI/laser_documentation/Selected_articles/wj%20Mixers_part_2.pdf)
45. Peter Riml OE9PMJ, Low cost high performance mixer up to 2500MHz, Dubus 1/87, <http://www.qsl.net/o/ok1cdj/dubus/8701-4.pdf>
46. Daxiong Ji, Low temperature co-fired ceramic double balanced mixer, <http://www.strutpatent.com/patent/07027795/low-temperature-co-fired-ceramic-double-balanced-mixer>
47. Патент US7013122, Ultra high isolation mixer, Doron Gamliel, 2006
48. Wideband transformers by YO3IU, <http://yo3iu.ro/blog/?p=513>
49. TLT introduction by Bob J. van Donselaar ON9CVD, <http://sharon.esrac.ele.tue.nl/~on9cvd/E-Ferriet.html>
50. Some Broad-Band Transformers by C.I. Ruthroff, <http://www.qsl.net/kp4md/ruthroff.pdf>
51. 45 MHz Aufwärtsmischer (Schaltmischer), Reinhold «KubiK», <http://www.qrpforum.de/index.php?page=Thread&postID=39046#post39046>
52. Reducing IMD in high-level mixers by J. Stephensen, KD6OZH, [http://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/qex/2001/05\\_06/page45/index.html](http://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/qex/2001/05_06/page45/index.html)
53. Диплексеры, Wes Hayward, W7ZOI, <http://www.cqham.ru/diplex8.htm>
54. Diplexer Supplemental Page by Wes Hayward, W7ZOI, [http://www.qrp.pops.net/dip\\_sup.asp](http://www.qrp.pops.net/dip_sup.asp)
55. Understanding Mixers From a Switching Perspective by Gary Breed, [http://highfrequencyelectronics.com/Archives/Apr06/HFE0406\\_tutorial.pdf](http://highfrequencyelectronics.com/Archives/Apr06/HFE0406_tutorial.pdf)
56. Analyzing the Performance of a Switching Mixer by Gary Breed, [http://rfti.com/wp-content/uploads/2012/04/RFTI0412\\_Tutorial.pdf](http://rfti.com/wp-content/uploads/2012/04/RFTI0412_Tutorial.pdf)
57. Трансивер «Стрекоза», А. Белоконь UR5FFR, <http://dspview.com/viewtopic.php?f=8&t=25>
58. Transmission Line and Lumped Element Quadrature Couplers by Gary Breed, [http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Nov09/HFE1109\\_Tutorial.pdf](http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Nov09/HFE1109_Tutorial.pdf)
59. The Twisted-Wire Quadrature Hybrid by John Seboldt, K0JD, [http://www.seboldt.net/k0jd/phase\\_notes.html](http://www.seboldt.net/k0jd/phase_notes.html)
60. The CDG2000 Transceiver, [http://www.warc.org.uk/cdg2000/the\\_cdg2000\\_transceiver.htm](http://www.warc.org.uk/cdg2000/the_cdg2000_transceiver.htm)
61. Белоусов Ю.М. RA3PEM, Всеволновый КВ трансивер Роса, <http://padabum.com/d.php?id=20486>
62. В. Удовенко UT6LU, Основная плата КВ трансивера «Sloboda – M», <http://www.cqham.ru/sloboda.htm>
63. The T03DSP High Performance Transceiver with DSP IF processing by Oleg Skydan UR3IQO, <http://t03dsp.skydan.in.ua/>

## **12. Благодарности**

Хочу выразить благодарность В.Демидову и Г.Брагину за конструктивную дискуссию по тематике статьи, а так же А.Смирнову за бесплатно предоставленный симулятор NL5 <http://nl5.sidelinesoft.com>.

## **13. История версий**

- 1.0 20.01.2013 Первоначальный релиз
- 1.1 7.02.2013 Статья существенно переработана и расширена
- 1.2 8.02.2013 Добавлен анализ синтеза смесителя Adams Russel Рис.34. Устранены некоторые ошибки нумерации рисунков.

## **14. Авторские права и условия распространения**

Все права на текст данной статьи принадлежат А.Н.Белоконь UR5FFR.

Схемы, приведенные в статье, являются собственностью их авторов.

Данная статья может распространяться свободно, если

- 1) это не приводит к получению коммерческой прибыли
- 2) при условии отсутствия правок/модификации документа
- 3) распространение не подразумевает передачу либо отказ от авторских прав

Просьба все замечания, пожелания и дополнения к данной статье присылать по адресу [relayer@hack-off.com](mailto:relayer@hack-off.com).