

УДК 621.372.6

Активный разветвитель для цепей деления опорного сигнала кварцевого генератора

*Чушов И.Ф., студент
кафедра «Радиоэлектронные системы»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Овечкин В.С., ассистент
кафедра «Радиоэлектронные системы»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
main@rl1-11.bmstu.ru*

Стабильность частоты является критическим параметром многих радиоэлектронных систем – навигационных, измерительных, радиолокационных, поэтому улучшение параметров систем напрямую связано с повышением стабильности частото задающих генераторов.

Кварцевые генераторы являются основными типами задающих генераторов в подавляющем большинстве современных приборов, поскольку они позволяют добиться наименьших флуктуаций частоты генерируемого сигнала в результате изменения температуры и напряжения источника питания, механических вибраций и деформации деталей, дрейфа параметров активных и пассивных элементов. Радиоэлектронные системы содержат десятки устройств, работающих в определенной последовательности, и нуждаются в высокостабильных первичных источниках и надежной системе распределения сигнала синхронизации. В цепи синхронизации для получения постоянства характеристик системы в целом целесообразно использовать один генератор, а для увеличения количества тактируемых устройств применять схемы деления опорного сигнала.

В связи с этим, актуальной является задача создания активных разветвителей для цепей деления опорного сигнала кварцевого генератора. К разрабатываемому устройству предъявляются следующие требования:

- рабочая частота 100 МГц;
- КСВн не более 1,2;
- минимальные потери в пассивной части;

– коэффициент усиления активной части должен компенсировать потери на деление и активные потери;

– минимальный результирующий фазовый шум;

– развязка между выходами не менее 20 дБ;

– уровень побочных составляющих спектра не более -40 дБн;

– количество каналов 3;

– возможность создания на базе разработанной схемы разветвителей с произвольным числом выходов.

Функционально разрабатываемое устройство делится на два блока: усилитель мощности и делитель мощности. Усилитель мощности компенсирует потери на деление и активные потери. В качестве основного усилительного элемента в активной части разветвителя взят операционный усилитель (ОУ). ОУ является перспективным типом активных приборов универсального назначения за счет возможности обеспечения высоких технических показателей, практически не зависящих от параметров элементов, из которых состоит ОУ.

В данном устройстве используется ОУ фирмы Texas Instruments – ОРА843, представляющий собой очень широкополосный (800 МГц) стабильный усилитель с полевыми транзисторами на входах, и позволяющий строить усилители с широким динамическим диапазоном и высоким входным импедансом. К особенностям усилителя можно отнести низкий уровень гармоник (-96 дБн при 5 МГц), спектральная мощность шумов $2 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, малый входной ток ($\pm 10 \text{ пА}$) и большой выходной ток 100 мА.

Принципиальная схема разработанного усилителя представлена на рисунке 1.

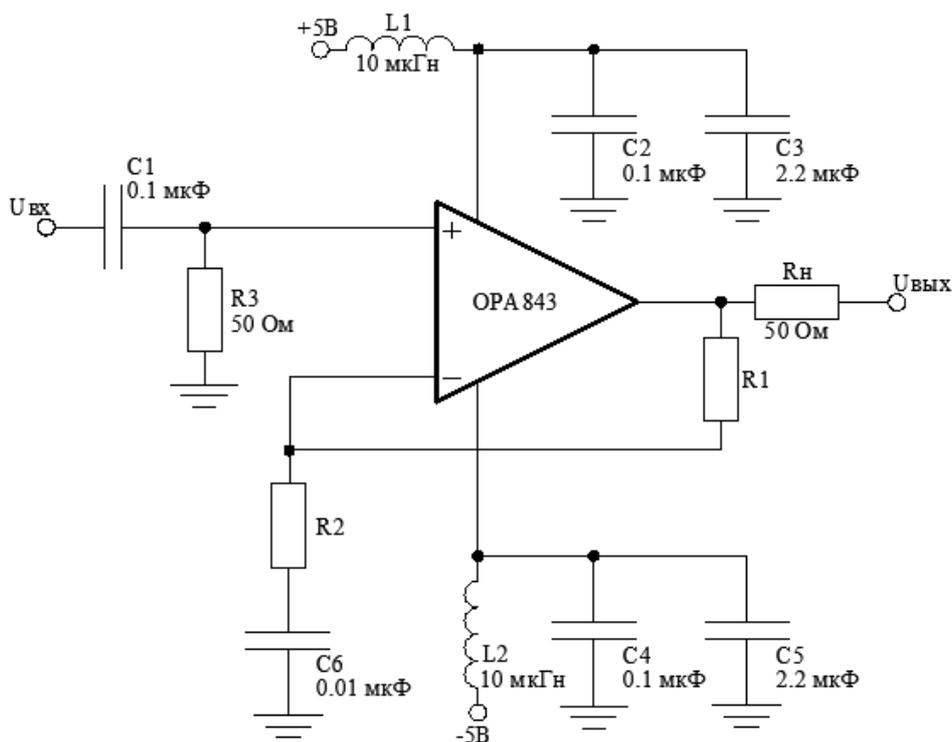


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя мощности

Представленная схема позволяет использовать ОУ в качестве неинвертирующего усилителя, причем коэффициент усиления всей схемы по напряжению жестко задается с помощью резисторов $R1$ и $R2$, которые образуют цепь обратной связи. Сопротивления $R1$ и $R2$ образуют делитель напряжения с очень малой нагрузкой, в силу того, что ток, необходимый для управления усилителем, очень мал. Следует заметить, что номиналы этих резисторов определяются так, чтобы общий ток нагрузки с учетом этого сопротивления не превышал максимального выходного тока усилителя. Конденсатор $C1$ блокирует протекание постоянной составляющей входного сигнала через усилитель. Входное сопротивление операционного усилителя очень большое, поэтому для согласования входа усилителя с источником сигнала, сопротивление которого 50 Ом, служит резистор $R3$. В данной схеме применяется оптимальное для ОУ симметричное двуполярное питание. Цепи питания содержат блокировочные индуктивности и емкости для развязки источников постоянного и переменного сигналов и для предотвращения просачивания паразитных высокочастотных сигналов в усилитель по цепям питания. Нагрузка в виде резистора $Rн$ представляет собой последующий делитель мощности.

Любой N -канальный M -ступенчатый делитель мощности можно представить набором фазосдвигающих четырехполюсников и развязывающих резисторов (рисунок 2).

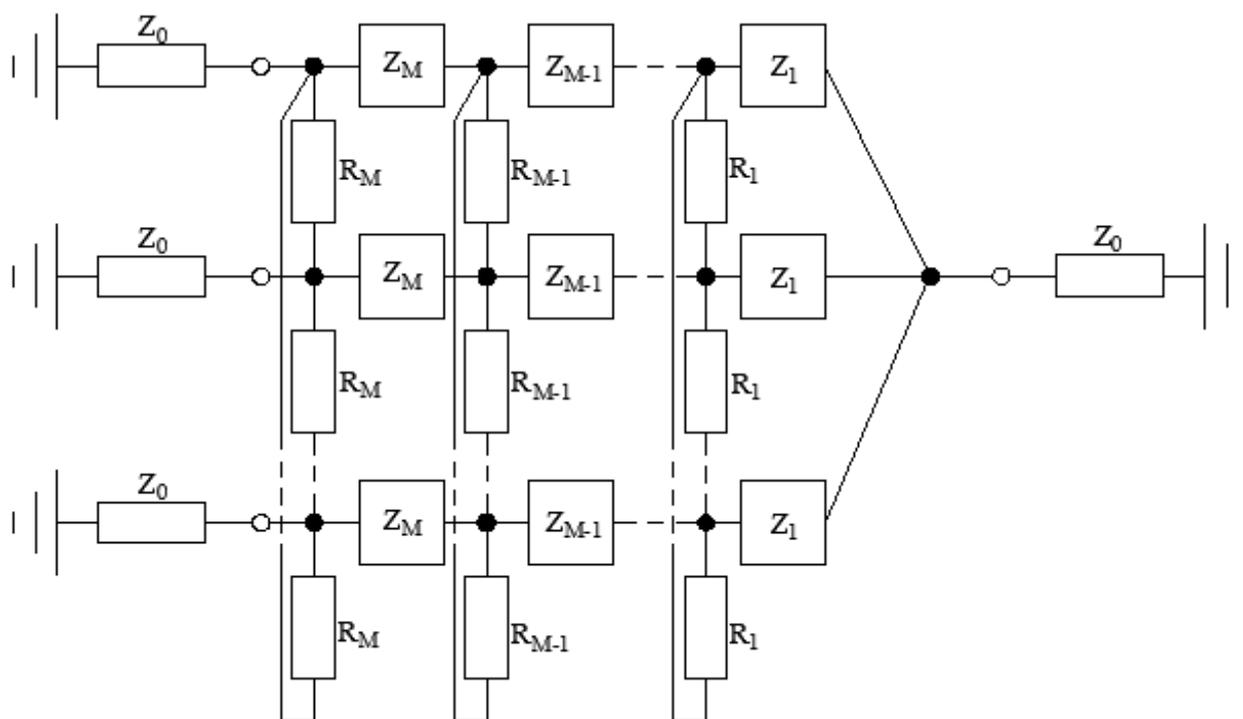


Рис. 2. Принципиальная схема делителя мощности

На представленном выше рисунке $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ - волновые сопротивления линий, питающих порты, Z_M, Z_{M-1}, Z_1 - волновые сопротивления фазосдвигающих четырехполюсников, R_M, R_{M-1}, R_1 - сопротивления развязывающих резисторов.

Число ступеней используемых в делителе мощности определяется исходя из числа каналов, допуска на рассогласование и полосы пропускания. Для исследования делителей можно использовать метод четных и нечетных колебаний [1, 2], который позволяет определить элементы матрицы рассеяния и рабочие характеристики устройства [3]. В соответствии с этим методом каждый делитель имеет ось симметрии, что позволяет разделить его на два несвязанных четырехполюсника и исследовать их по отдельности. Для этого делитель при четном возбуждении «разрезается» по оси симметрии плоскостью из идеального диэлектрика, в результате получается ЧП, изображенный на рисунке 3.

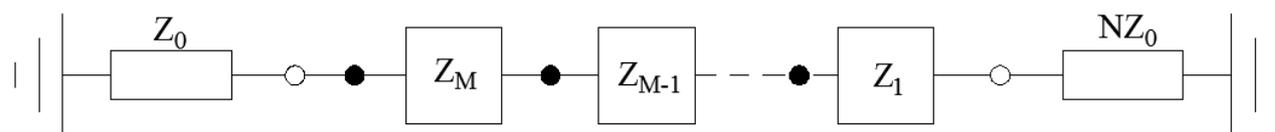


Рис. 3. Схема делителя, эквивалентная четному возбуждению

При нечетном возбуждении делитель «разрезается» по оси симметрии плоскостью из идеального проводника, в результате получается четырехполюсник, изображенный на рисунке 4.

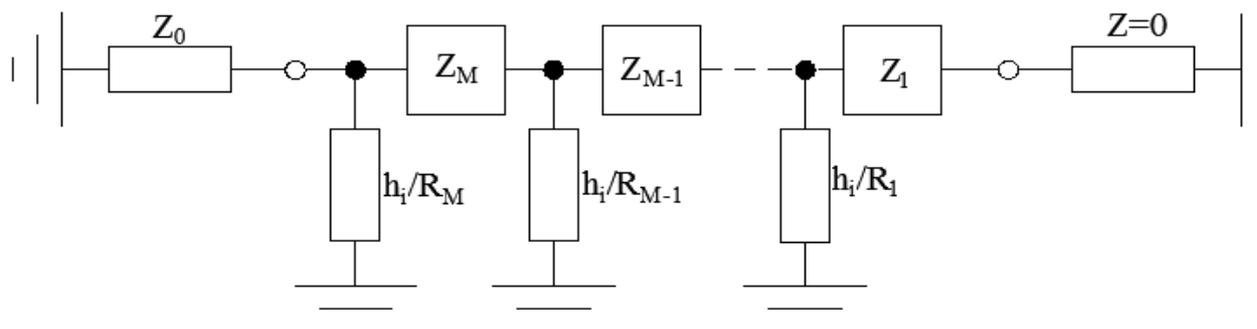


Рис. 4. Схема делителя, эквивалентная нечетному возбуждению

Коэффициенты при развязывающих сопротивлениях вычисляются по формуле 1

$$h_i = 2 - 2 \cdot \cos[\pi \cdot (i - 1) \cdot N]. \quad (1)$$

Можно заметить, что при четном возбуждении эквивалентная схема делителя представляет собой многоступенчатый трансформатор, который рассчитывается на первом этапе синтеза устройства для центральной частоты рабочего диапазона. На втором этапе волновые сопротивления фазосдвигающих четырехполюсников считаются фиксированными, а величины развязывающих резисторов находятся из условия обеспечения максимальной развязки между плечами делителя.

Рассмотрим трехканальный лучевой делитель с равным делением, волновым сопротивлением плеч $Z_0 = 50$ Ом и центральной частотой 100 МГц. В качестве фазосдвигающего четырехполюсника используем фильтры нижних частот на элементах с сосредоточенными параметрами, что обусловлено широким спектром воспроизводимых волновых сопротивлений и малыми габаритами устройства. Каждый фазосдвигающий четырехполюсник на центральной частоте рабочего диапазона должен вносить фазовый сдвиг $\varphi = \pm\pi/2$ и иметь волновое сопротивление Z_1 , мало изменяющееся в рабочем диапазоне. Рабочая полоса делителя достаточно узкая, следовательно, для ее реализации можно использовать однозвенные фильтры и схема делителя примет вид, представленный на рисунок 5.

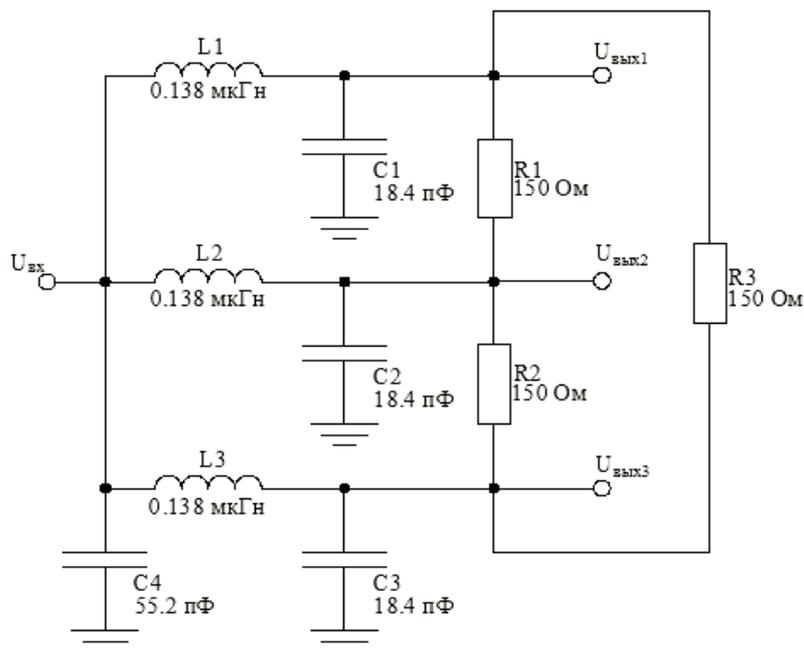


Рис. 5. Схема трехканального делителя мощности

Волновое сопротивление четырехполюсников Z_1 рассчитывается по формуле 2

$$Z_1 = Z_0 \cdot \sqrt{N} = 50 \cdot \sqrt{3} = 86,6 \text{ Ом.} \quad (2)$$

Зная волновое сопротивление ФНЧ, центральную частоту диапазона f_0 и вносимый фазовый сдвиг φ_0 , рассчитываем сосредоточенные индуктивные и емкостные элементы, исходя из формул 3 и 4:

$$L = \frac{Z_1 \cdot \sin(\varphi_0)}{2 \cdot \pi \cdot f_0} = 0,138 \text{ мкГн,} \quad (3)$$

$$C = \frac{\operatorname{tg}(\varphi_0/2)}{Z_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0} = 18,4 \text{ пФ.} \quad (4)$$

Так как рассчитывается делитель мощности с равным делением, то ФНЧ в каждом канале идентичны, поэтому

$$L_1 = L_2 = L_3 = L.$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C.$$

$$C_4 = 3 \cdot C = 55,2 \text{ пФ.}$$

Для улучшения согласования входного порта при отклонении нагрузок в выходных портах от величины $Z_0 = 50 \text{ Ом}$, между выходными портами ставится балластное сопротивление

$$R_1 = R_2 = R_3 = 3 \cdot Z_0 = 150 \text{ Ом.}$$

По результатам расчетов схем делителя и усилителя были разработаны и изготовлены печатные узлы пассивного и активного разветвителей. Их внешний вид представлен на рисунках 6 и 7. Активный разветвитель включает в свой состав соединенные последовательно рассмотренные выше усилитель и делитель мощности.



Рис. 6. Изготовленный пассивный разветвитель

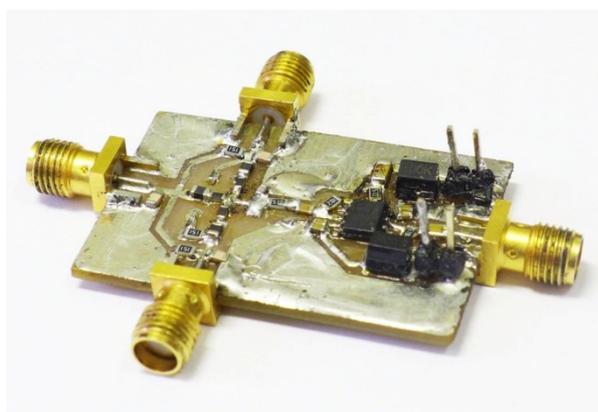


Рис. 7. Изготовленный активный разветвитель

На рисунках 8-11 приведены измеренные S-параметры разработанных устройств. Потери на деление в трехканальном делителе составляют $-4,77$ дБ. Согласно измерениям коэффициента передачи, результаты которых представлены на рисунке 8, его значение на рабочей частоте диапазона составляет 3 дБ. Следовательно, операционный усилитель компенсирует потери, а также позволяет получать результирующий коэффициент усиления, заданный цепью обратной связи. Падение коэффициента усиления с ростом частоты объясняется влиянием емкостей коллекторно-базового перехода транзисторов ОУ и емкостей монтажа. Емкость представляет собой частотно-зависимую отрицательную обратную связь. Сопротивление емкости по переменному току с ростом частоты падает, глубина отрицательной обратной связи увеличивается – коэффициент усиления уменьшается.

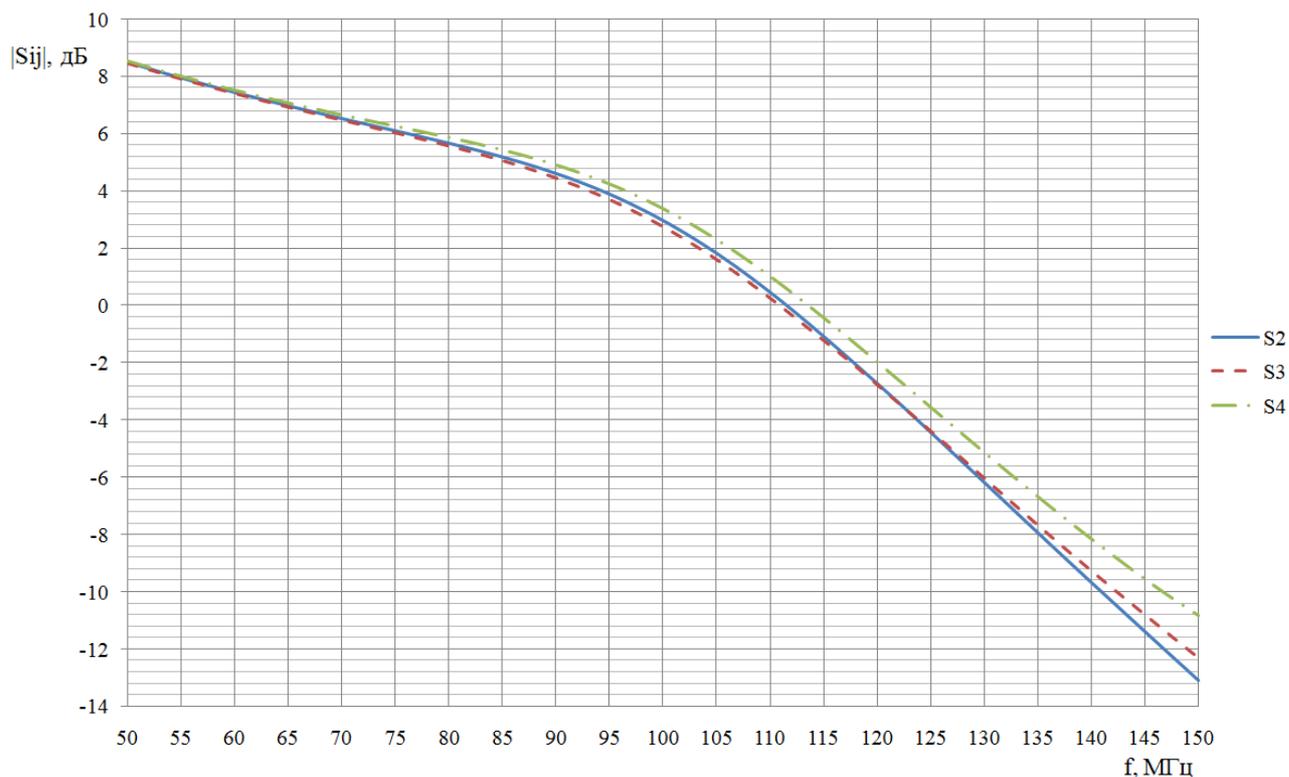


Рис. 8. Коэффициент передачи активного разветвителя

Из графиков зависимостей возвратных потерь активного разветвителя, представленных на рисунке 9, можно видеть, что на центральной рабочей частоте возвратные потери входа S11 составляют не более минус 30 дБ, а на выходах S22, S33, S44 – не более минус 20 дБ.

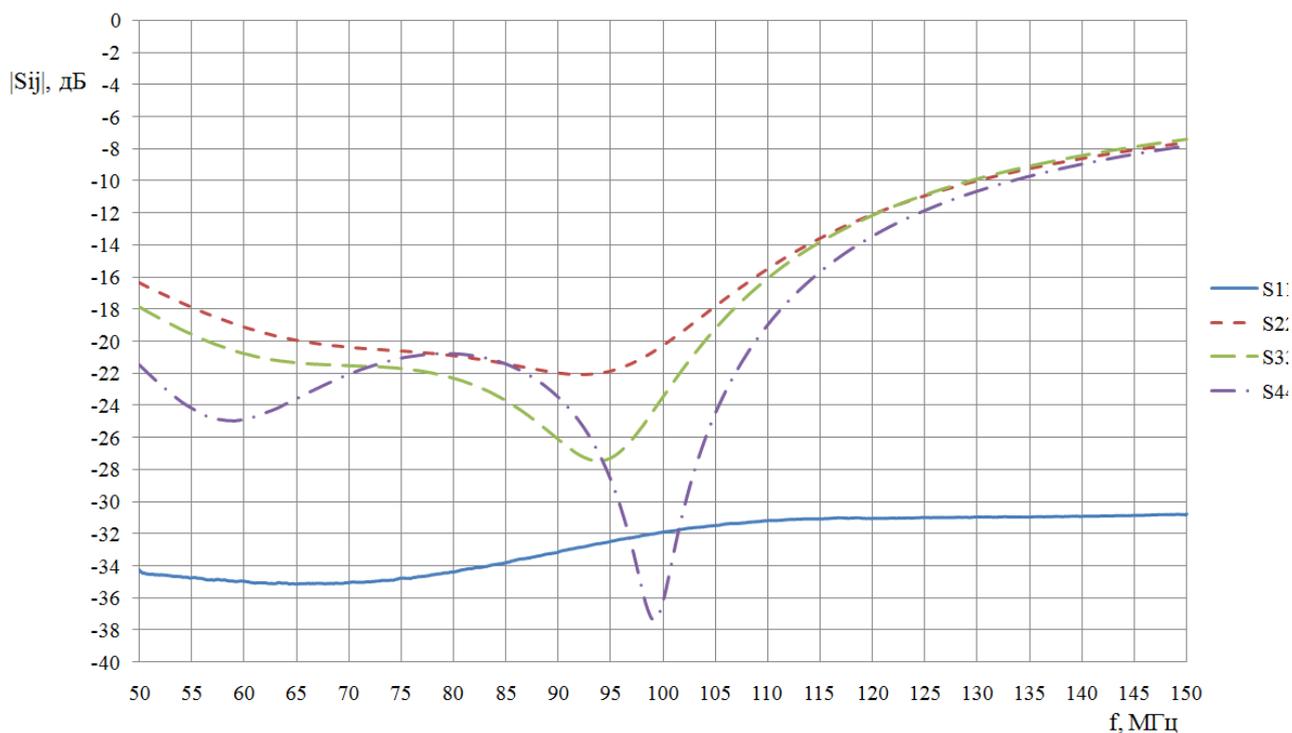


Рис. 9. Возвратные потери активного разветвителя

На рисунке 10 представлены зависимости фазы коэффициентов передачи активного разветвителя от частоты. По этому рисунку можно определить, что разница между фазами в каналах на рабочей частоте составляет не более 1° , что допускает когерентную работу системы.

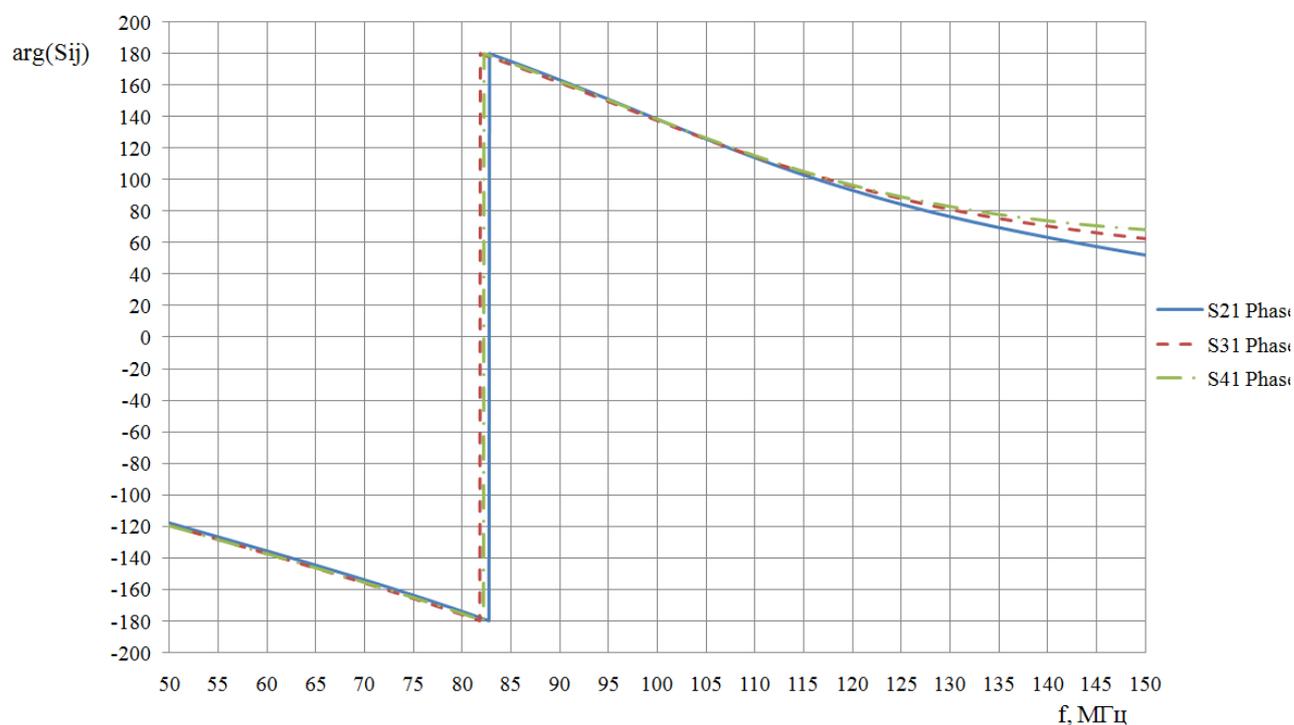


Рис. 10. Фаза в каналах активного разветвителя

На рисунке 11 представлены зависимости развязки между выходными каналами от частоты. По рисунку можно заметить, что развязка на центральной частоте диапазона не хуже -20 дБ. Измерения пассивного разветвителя показали, что усилитель оказывает существенное влияние на развязку, другие параметры рассеяния при этом остаются на том же уровне. Если сравнить зависимости развязки между выходными каналами активного разветвителя (рисунок 11) и пассивного разветвителя (рисунок 12) от частоты, можно заметить, что у пассивного разветвителя уровень развязки лучше приблизительно на 10 дБ.

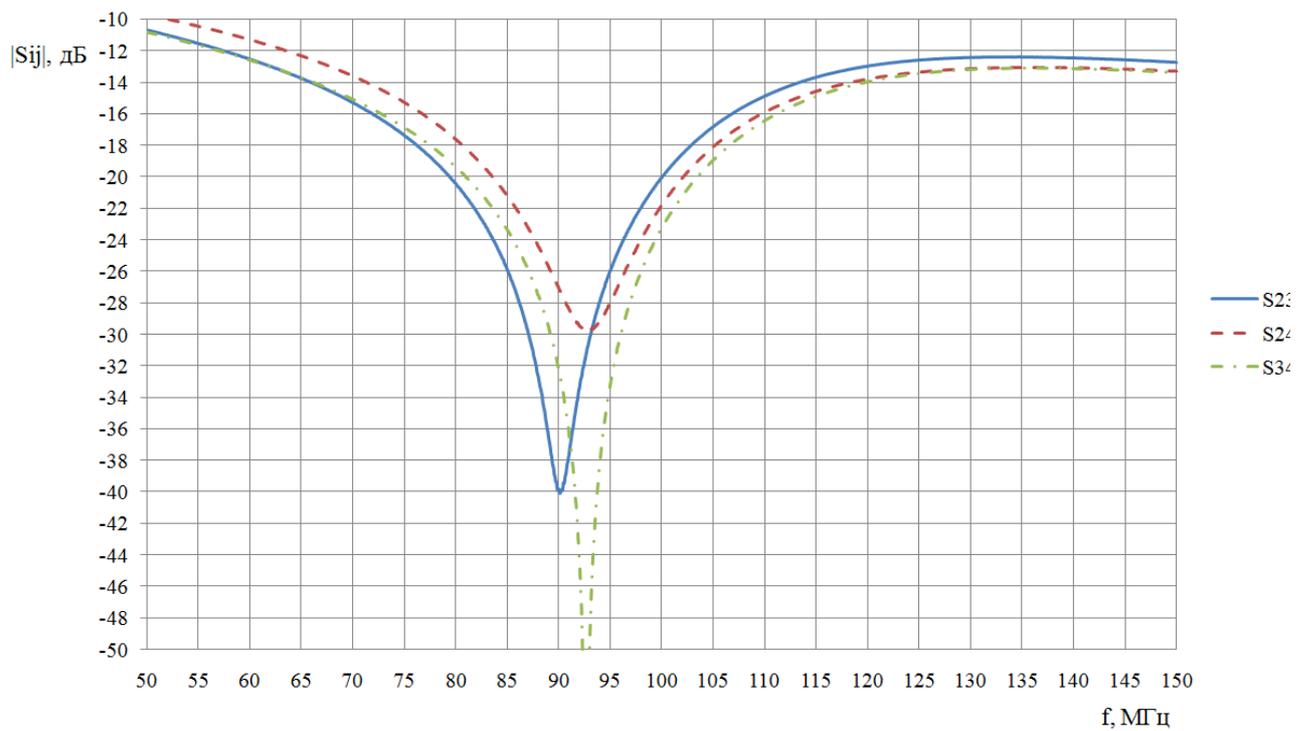


Рис. 11. Развязка между каналами активного разветвителя

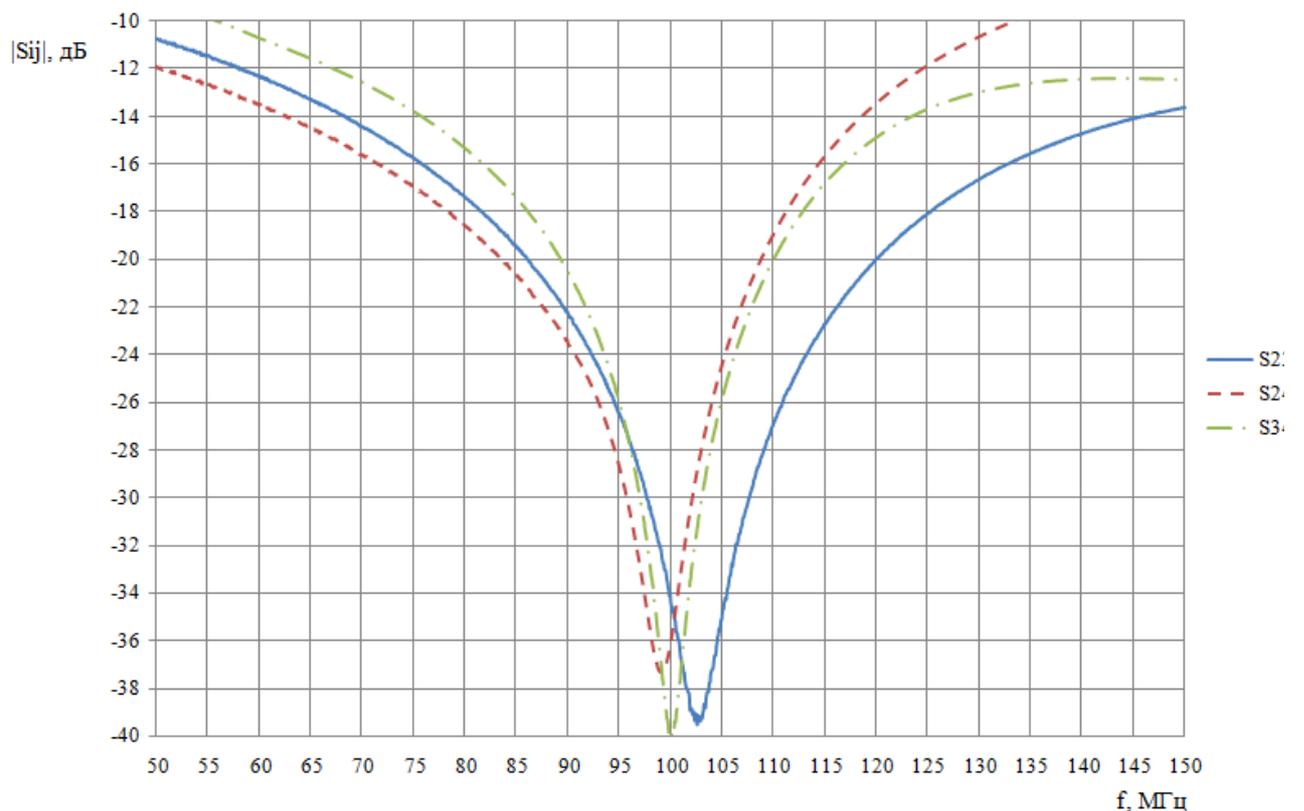


Рис. 12. Развязка между каналами пассивного разветвителя

Также были проведены измерения уровня ближайших гармоник и фазового шума. На рисунке 13 приведен спектр на выходе активного разветвителя. Из рисунка видно, что

уровень основной гармоники составляет 3,37 дБм, а ближайшей второй гармоники минус 41,70 дБм.

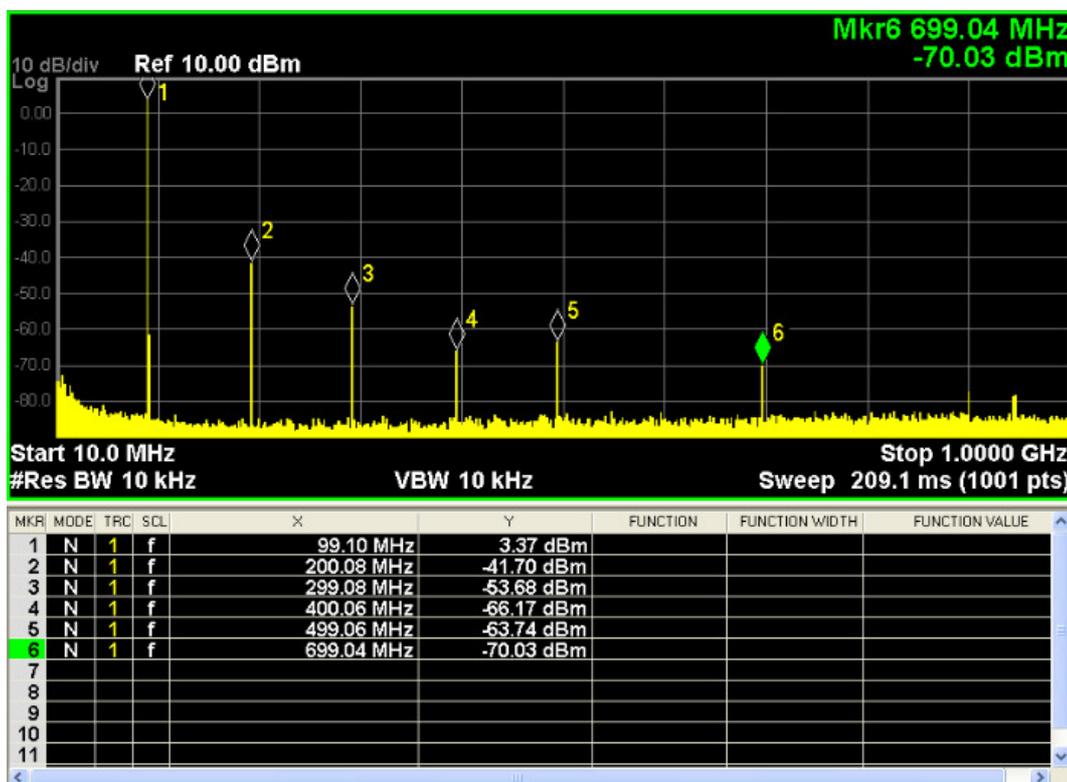


Рис. 13. Уровень побочных гармоник активного разветвителя

На рисунке 14 приведены зависимости фазовых шумов кварцевого генератора, разработанного усилителя и усилителя фирмы MiniCircuits. Из графиков видно при отстройке до 100 кГц ухудшение результирующего фазового шума на выходе разработанного генератора составляет 20 дБ относительно фазового шума генератора и 16 дБ относительно усилителя фирмы MiniCircuits. Однако данные результаты являются приемлемыми с точки зрения работы всей системы в целом.

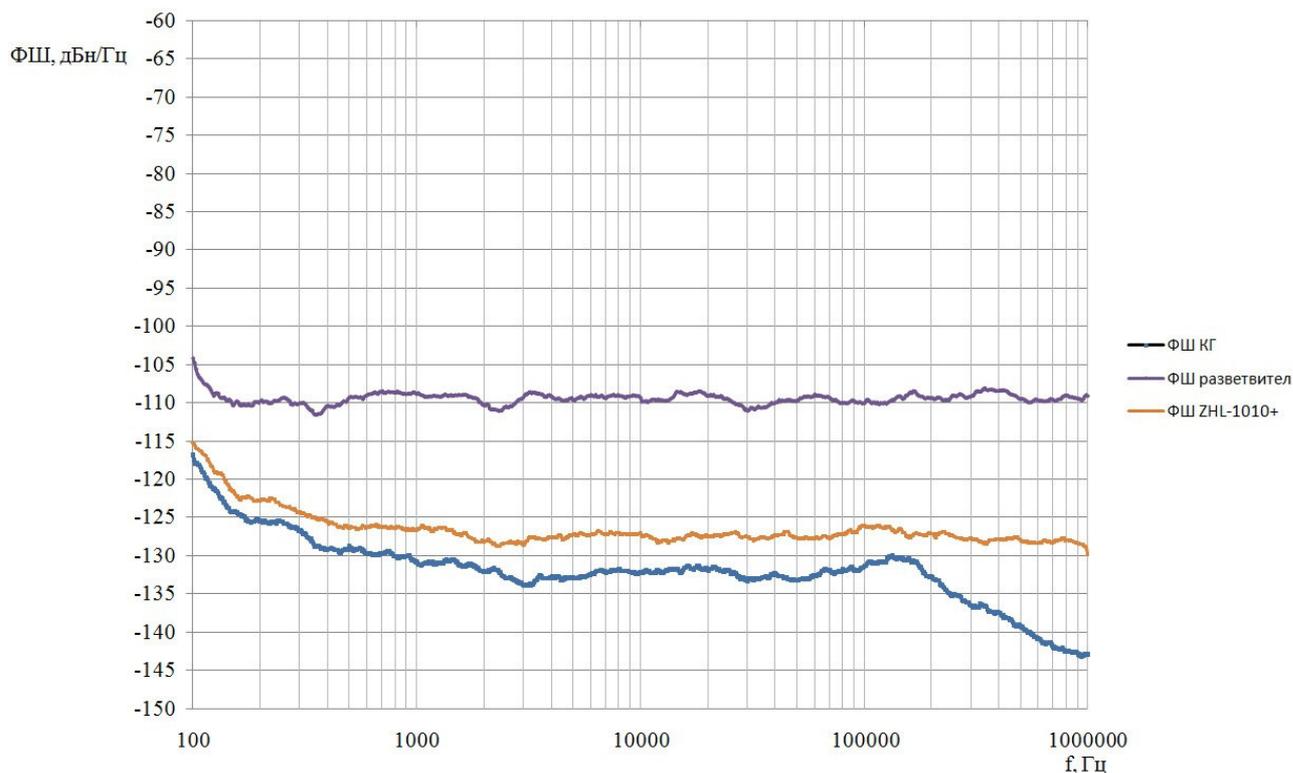


Рис. 14. Фазовый шум активного разветвителя

В результате было разработано устройство со следующими характеристиками:

- коэффициент передачи 3 дБ;
- потери в пассивной части -5 дБ;
- возвратные потери входа -32 дБ;
- возвратные потери выходов -20 дБ, -23,5 дБ, -36 дБ;
- развязка между выходами -20 дБ, -22 дБ, -24 дБ;
- разница между фазовыми характеристиками каналов не превышает 1 градуса;
- уровень второй гармоники -45,07 дБм;
- фазовый шум при отстройке 1 МГц -110 дБн/Гц.

На основе данного устройства можно изготовить активный разветвитель с произвольным числом каналов, изменив число каналов делителя и КУ усилителя.

Список литературы

1. Карпов В.М., Малышев В.А., Перевошиков И.В. Широкополосные устройства СВЧ на элементах с сосредоточенными параметрами / Под ред. В.А. Малышева. М.: Радио и связь, 1984. 104 с.
2. Справочник по элементам полосковой техники / О.И. Мазепова, В.П. Мещанов, Н.И. Прохорова, А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич / Под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.

3. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. М.: Сов. Радио, 1972. 168 с.
4. Yee H.Y., Chang F.C., Auden N.F. N-way TEM-mode broadband power dividers // IEEE Trans. on MTT. 1980. Vol. 18, № 10, P. 682-688.
5. Nagai N., Maekawa E., Ono K. New n-way hybrid power dividers // IEEE Trans. on MTT. 1997. Vol. 25, № 12, P. 1008-1012.