

## **Компьютерное проектирование монолитной интегральной схемы сверхвысокочастотного генератора на гетероструктурных полевых транзисторах**

*Белкин М. Е., Лопарев А. В.*

*Рассматриваются особенности построения МИС перестраиваемых генераторов СВЧ диапазона на основе гетероструктурных полевых транзисторов (HEMT), способы и схемы перестройки их частоты. Анализируются по критерию применимости в качестве гетеродина для смесителя с субгармонической накачкой узла понижающего преобразователя частоты интегрального тюнера КВЧ диапазона две схемы их построения: одноканальная на транзисторе с общим затвором и балансная на транзисторах с общим истоком. Приводятся методика и результаты проектирования принципиальной схемы и топологии монолитной интегральной схемы  $K_u$ -диапазона (12-18 ГГц) с помощью САПР AWR Microwave Office.*

### **Введение**

Рассматриваемый транзисторный сверхвысокочастотный (СВЧ) генератор является принципиальным структурным элементом узла понижающего преобразователя частоты (ППЧ) радиоприёмного устройства как телекоммуникационного, так радиолокационного назначений, и его параметры во многом определяют общие технико-экономические показатели современных радиосредств. В связи с этим исследованиям теоретических и практических аспектов его функционирования, а также схем его построения посвящено огромное количество публикаций. Тем не менее, современное развитие радиоэлектронной аппаратуры поставило перед её разработчиками новые задачи. В частности, требования по повышению пропускной способности систем передачи привели к необходимости освоения миллиметрового диапазона волн и, как следствие, вызвали интенсивное развитие техники СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) на арсенид-галлиевых гетероструктурных транзисторах. Этот процесс сопровождается не только ужесточением требований к традиционным параметрам СВЧ генератора [1]: мощности, полосе перестройки, частотным шумам, уровню гармоник, но и появлением новых критических параметров, характеризующих степень интегрирования, например, габаритных размеров МИС. Последний параметр должен выбираться на базе компромиссного решения с учётом технологических ограничений (площадь кристалла не должна превышать 10 мм<sup>2</sup>), современных тенденций по развитию многофункциональных СВЧ МИС, взаимодействия электромагнитных полей схемных элементов и т. д.

Из двух существующих классов гетероструктурных СВЧ транзисторов наибольшее применение в узле гетеродина современного приёмника СВЧ диапазона находят биполярные, достоинствами которых, как и традиционного гомоструктурного варианта [1], являются более простые условия возбуждения, широкая полоса перестройки, меньший уровень частотных шумов. Однако по мере дальнейшего повышения рабочих частот радиоприёмных устройств и перехода при разработке их тюнера от набора микросхем к созданной по единой технологии однокристалльной МИС роль гетероструктурных полевых транзисторов (ГПТ) значительно возросла. Причина состоит в том, что их более высокие граничные частоты, меньший коэффициент шума и больший коэффициент усиления позволяют оптимизировать остальные узлы понижающего преобразователя частоты, в состав которого входит рассматриваемый генератор, и, следовательно, общие

---

характеристики устройства.

Хорошо известно, что увеличение рабочей частоты генератора неизбежно приводит к ухудшению его основных характеристик, например, к уменьшению выходной мощности, увеличению частотных шумов [2], что влияет на общие характеристики приёмного устройства. Поэтому в ППЧ современных приёмников миллиметрового диапазона получил развитие так называемый резистивный смеситель с субгармонической накачкой (sub-harmonic pumping), в котором для смешения частот используется чётная гармоника сигнала гетеродина. Анализ и выбор схемы его построения рассмотрены в [3].

Цель данной работы состоит в выборе оптимальной схемы построения гетеродина на базе ГПТ для смесителя миллиметрового диапазона с накачкой на его удвоенной частоте с учётом монолитного исполнения и рабочих частот в  $K_u$ -диапазоне.

#### ***Общие схемотехнические принципы***

Задачей настоящей работы являлось компьютерное проектирование оптимальной монолитной СВЧ МИС генератора, управляемого напряжением (ГУН), на гетероструктурных полевых транзисторах в диапазоне 15-18 ГГц. При этом согласно [3] полоса перестройки должна быть не менее 250 МГц, выходная мощность – не менее 10 мВт, подавление второй гармоники – более 15 дБ, а третьей – более 25 дБ. Дополнительно следует обеспечить минимальные уровни частотного шума, ток потребления и габариты МИС.

В ходе проектирования схемы в качестве генераторного и регулирующего элементов использован один и тот же разработанный в ИСВЧПЭ РАН GaAs гетероструктурный полевой транзистор с двумя затворами длиной порядка 0,1 мкм и шириной 75 мкм (частота отсечки порядка 60 ГГц). Прежде всего, была выбрана нелинейная модель транзистора. Оценки показали, что среди стандартных моделей полевых транзисторов в библиотеке элементов Microwave Office оптимальной для данного случая является так называемая модель Ангелова (Angelov2), которая широко применяется при моделировании СВЧ монолитных усилителей мощности и генераторов [4]. Определение параметров эквивалентной схемы транзистора (выполнено Ю. В. Фёдоровым) осуществлялось стандартным методом в режиме большого сигнала путём согласования данных расчёта и измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик при различных смещениях на затворе и стоке и малосигнальных S-параметров в рабочем частотном диапазоне. Верификация модели, проведённая на постоянном токе и в СВЧ диапазоне, показала отклонение расчётных и измеренных характеристик в пределах 5%.

Проектирование ГУН осуществлялось по следующей общей методике [5]:

- выбор структуры схемы генератора и способа обратной связи;
- выбор режима постоянного смещения, при котором обеспечивается требуемая выходная мощность;
- выбор схемы и регулировка цепи обратной связи для получения требуемого отрицательного сопротивления или проводимости на границе прибор-схема;
- выбор схемы и регулировка граничного импеданса цепи нагрузки для выполнения баланса амплитуд и фаз.

Для построения принципиальных схем ГУН на ГПТ выбрана общепринятая для диапазона выше 10 ГГц схема Колпитца («ёмкостная трёхточка»), в которой в качестве одного из ёмкостных элементов используется ёмкость сток-исток транзистора [5].

#### ***Проектирование одноконтурного СВЧ генератора на ГПТ с общим затвором***

Для проектирования генератора из двух известных схем включения полевого транзистора выбрана схема с общим затвором, поскольку в ней легче обеспечиваются

условия генерации и перестройка частоты осуществляется без её срывов в более широких пределах [2]. Схема наиболее простого по конфигурации одноконтурного генератора на ГПТ разрабатывалась таким образом, чтобы средняя частота генерации (16,65 ГГц) находилась в центральной области заданного частотного диапазона (15-18 ГГц). В соответствии с вышеприведённой общей методикой проектирование данного генератора включало в себя четыре этапа, в результате выполнения которых была реализована его принципиальная электрическая схема, показанная на рис. 1. Схема может быть разделена на пять взаимосвязанных цепей: цепь генерации, цепь регулировки частоты генерации, цепи постоянного смещения затвора и стока активного элемента, выходная цепь.

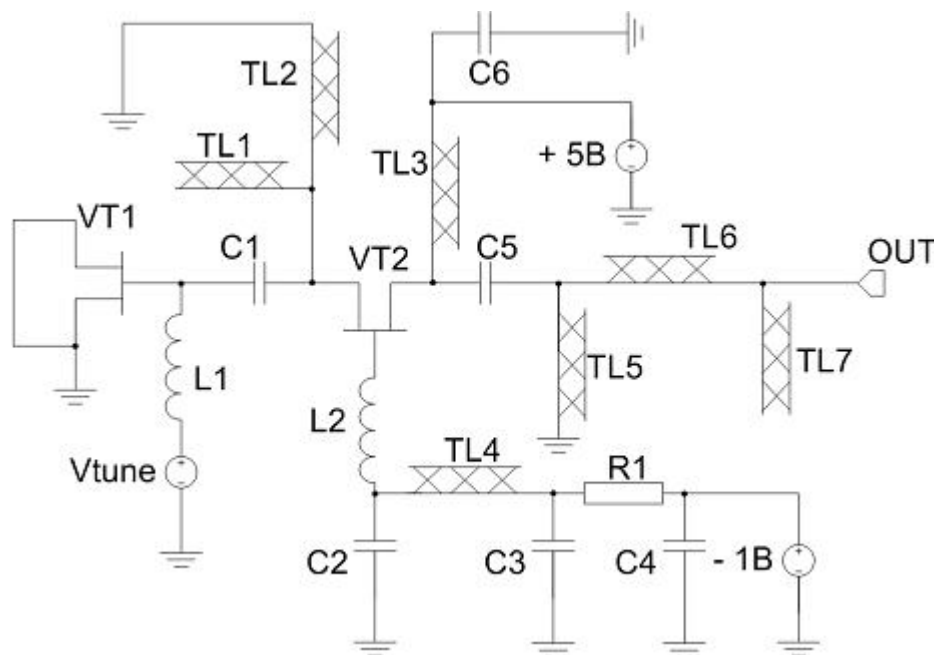


Рис. 1

Принципиальная схема одноконтурного СВЧ генератора на ГПТ с общим затвором

Цепь генерации содержит ГПТ VT2 с индуктивностью L2 в цепи затвора и микрополосковыми шлейфами TL1 и TL2 в цепи истока. Для реализации схемы с общим затвором второй вывод L2 заземлён по переменному току с помощью конденсатора C2. Подключенная к истоку генераторного транзистора цепь регулировки частоты содержит варикап VT1, который ввиду монолитного исполнения реализован на базе аналогичного ГПТ с закороченными истоком и стоком, и цепь его постоянного смещения через индуктивность L1. Хотя также известен более простой способ перестройки частоты за счёт изменения напряжения смещения затвора [2], в данном случае, основываясь на результатах моделирования, был выбран вариант с внешним регулирующим элементом, поскольку при этом обеспечиваются оптимальные условия генерации и более широкая полоса перестройки при практически постоянном уровне выходной мощности.

Цепь постоянного смещения затвора включает RC-фильтр на основе R1, C3 и C4 и шлейф TL4 для обеспечения развязки на частоте генерации. Цепь постоянного смещения стока включает блокировочный конденсатор C6 и шлейф TL3 также для обеспечения развязки на частоте генерации. Выходная цепь содержит микрополосковый шлейф TL5, обеспечивающий подавление второй гармоники генератора, и шлейфы TL6, TL7 для согласования с нагрузкой.

На первом этапе производится регулировка отрицательного активного и реактивного сопротивлений цепи генерации. Для этого параметры L2, TL1 и TL2 подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение коэффициента отражения по входу на частоте генерации первой гармоники. При этом должно быть обеспечено отрицательное значение активной составляющей импеданса в требуемом диапазоне перестройки частоты на стоке ГПТ. Причём его абсолютное значение должно превышать сопротивление нагрузки (50 Ом), а реактивной части – находиться вблизи нуля. В результате оптимизации параметров соответствующих элементов значение импеданса генератора по входу на частоте генерации 16,65 ГГц составило для активной составляющей -132 Ом, а реактивной -20 Ом (рис 2).

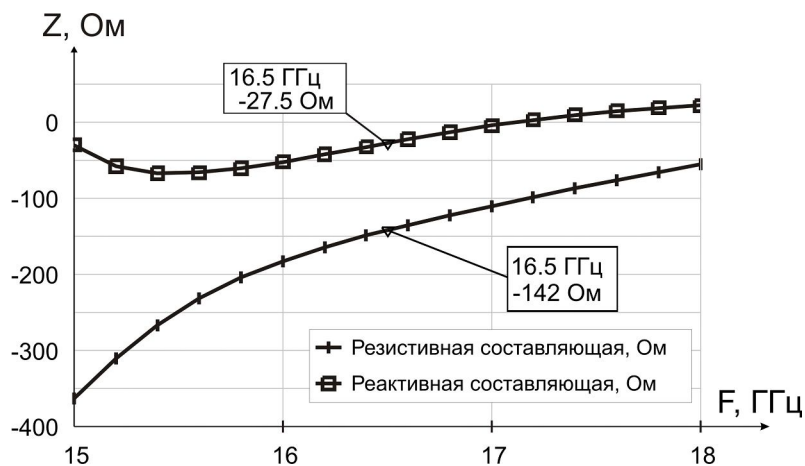


Рис. 2

Выходной импеданс схемы цепи генерации

На втором этапе производится предварительная оценка выходной мощности спроектированной цепи генерации, для чего она непосредственно подключается к нагрузке. Выходная мощность рассчитывается в нелинейном режиме методом гармонического баланса. В результате определяется требуемый для обеспечения заданной мощности генерации импеданс выходной цепи. На третьем этапе к цепи генерации подключается цепь регулировки частоты и производится согласование выходного импеданса генератора с сопротивлением нагрузки путём оптимизации параметров шлейфов TL5-TL7. Определение рабочей частоты и значения генерируемой мощности производится в режиме большого сигнала в частотной области с помощью элемента Oscarprobe из библиотеки Microwave Office, подключённого к затвору транзистора VT2.

На заключительном этапе производится модельная верификация указанных выше основных параметров генератора и сопоставление их с целевыми показателями. При необходимости осуществляется подстройка параметров схемных элементов.

Основные параметры спроектированного генератора представлены в таблице, чертёж топологии МИС – на рис. 3.

### Проектирование балансного СВЧ генератора

Согласно [3] в смесителе с накачкой на двукратной частоте гетеродина должна быть обеспечена противофазная подача гетеродинного сигнала на затворы смесительных транзисторов, в связи с чем представляет интерес применение балансной схемы генератора, что приведёт к существенному упрощению общей схемы понижающего преобразователя частоты в интегральном исполнении. Помимо противофазных выходов

важным достоинством балансной схемы является подавление синфазных помех [6].

Для реализации балансного СВЧ генератора использовались те же транзисторы, что и в предыдущей схеме. Для построения принципиальной схемы каждого плеча выбрана та же ёмкостная трёхточечная схема, но для упрощения её в данном случае использовано включение активных элементов по схеме с общим истоком. Методика проектирования каждого плеча данного генератора полностью соответствует вышеописанной. Результаты проектирования принципиальной электрической схемы балансного генератора с центральной частотой 16,65 ГГц представлены на рис. 4.

Таблица

Сравнение основных параметров спроектированных генераторов

	Мощность первой гармоники, дБм	Подавление второй и третьей гармоник, дБ	Полоса перестройки частоты, МГц	Уровень ЧМ-шумов при отстройке частоты генерации на 100 кГц, дБ/Гц	Ток потребления, мА	Габариты МИС, мм
Однотактный генератор на ГПТ с общим затвором	15,9	II: 51 III: 55	750	-95	65	1,4x2,5x0,1
Балансный генератор на ГПТ с общим истоком	14,6	II: 11 III: 28	560	-105	138	1,4x1,8x0,1

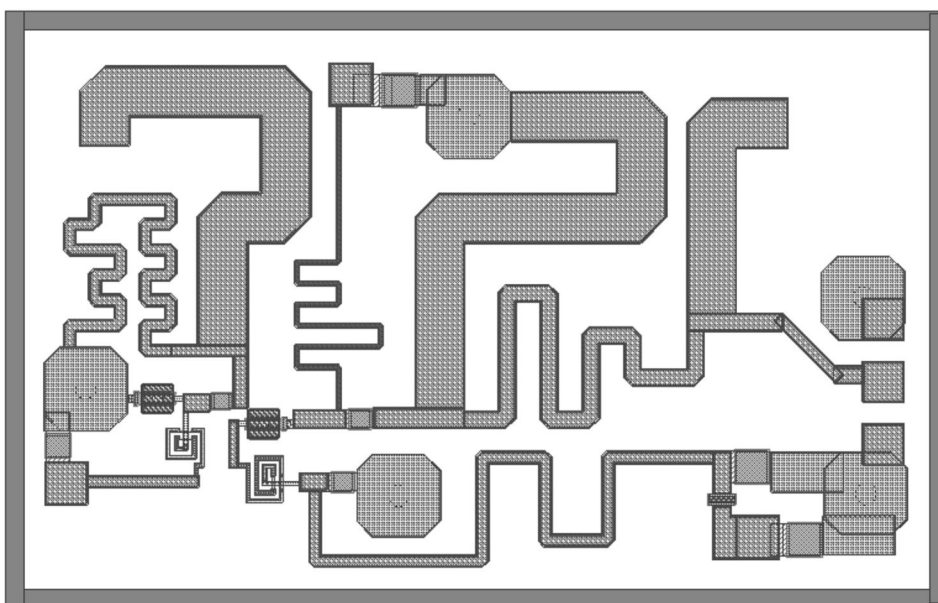


Рис. 3

Топология МИС однотактного генератора на ГПТ с общим затвором

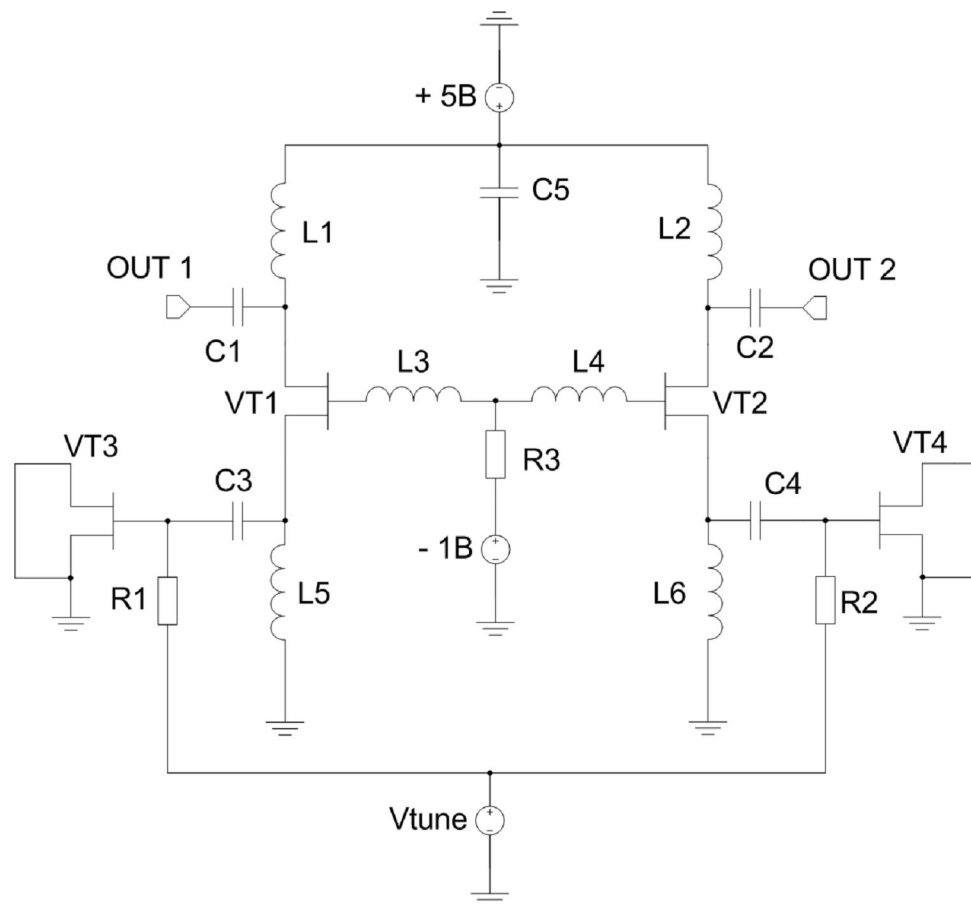


Рис. 4

Схема балансного СВЧ генератора на ГПТ с общим истоком

Схема состоит из двух идентичных плеч, в которых обеспечивается режим противофазной генерации. Перестройка частоты генерации в каждом плече осуществляется независимо с помощью соответствующего варикапа, который, как и в предыдущем случае, реализован на базе аналогичного ГПТ с закороченными истоком и стоком. При этом требуемая для обеспечения условий генерации ёмкость в цепи истока [5] формируется за счёт настройки резонансного контура L5-VT3 (либо L6-VT4) ниже частоты генерации. Существенное топологическое отличие данной схемы от рассмотренной в предыдущем разделе состоит в использовании пассивных цепей с сосредоточенными параметрами, что сделано с целью уменьшения габаритов МИС.

#### *Сравнительный анализ параметров генераторов*

Выше были рассмотрены два варианта построения генераторов  $K_u$ -диапазона на гетероструктурных полевых транзисторах для резистивного смесителя миллиметрового диапазона с субгармонической накачкой. Использование одних и тех же транзисторов и идентичные частоты генерации и напряжения питания позволяют корректно осуществить прямое сопоставление их основных параметров и характеристик.

В частности, на рис. 5 приведены результаты сравнения спектральных характеристик генераторов: однотактного на ГПТ с общим затвором и балансного на ГПТ с общим истоком. Кроме того, на рис. 6 представлены результаты сравнения их шумовых характеристик для рабочей частоты генерации. Конкретные значения параметров сопоставляемых генераторов приведены в таблице.

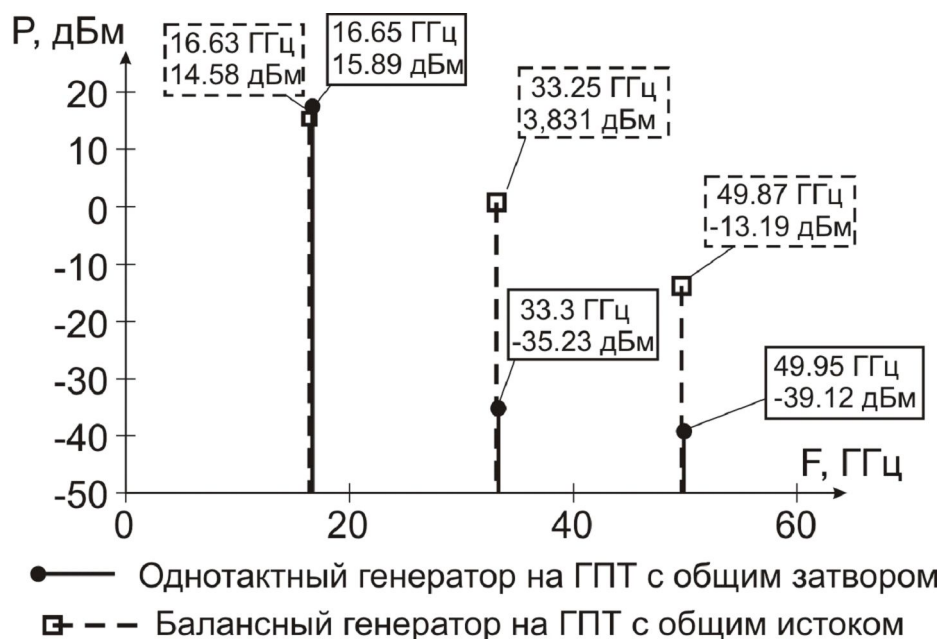


Рис. 5

Спектры однотактного СВЧ генератора на ГПТ с общим затвором и балансного генератора на ГПТ с общим истоком

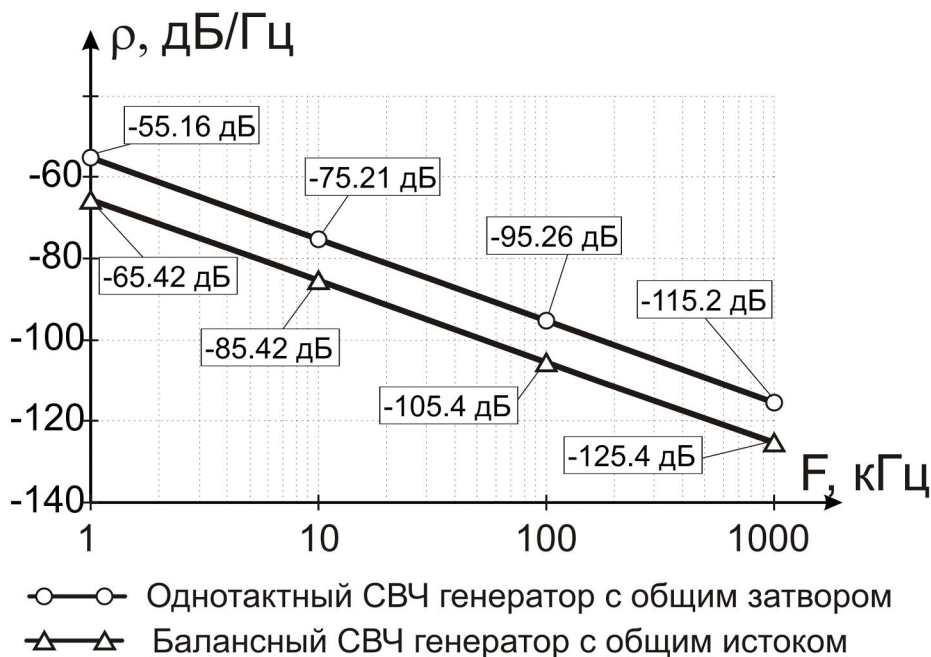


Рис. 6

Характеристики частотного шума однотактного генератора на ГПТ с общим затвором и балансного генератора на ГПТ с общим истоком

Из рисунков и таблицы можно сделать следующие выводы:

- однотактный вариант построения генератора обладает существенно (на 30%) большей мощностью первой гармоники, что можно объяснить более тщательной настройкой его схемы и большими потерями в использованных в балансном варианте пассивных цепях с сосредоточенными параметрами;

- вторая и третья гармоники спроектированного однотактного варианта подавлены соответственно на 51 и 55 дБ, а балансного – соответственно на 11 и 28 дБ. Такая

---

разница объясняется принятием в схеме одноконтного генератора специальных мер по подавлению высших гармоник (шлейф TL5 на рис. 1);

- полоса перестройки частоты одноконтного генератора на 30% больше по сравнению с балансным вариантом, что наиболее вероятно объясняется принятой в нём схемой включения транзистора с общим затвором;

- уровень ЧМ-шумов одноконтного генератора на 10 дБ больше, что является следствием применения во втором варианте балансной схемы;

- ток потребления балансной схемы примерно в два раза больше, что объясняется наличием в ней двух активных элементов;

- площадь кристалла МИС балансного генератора более чем на 30% меньше, что является преимуществом реализации пассивных схемных элементов на основе цепей с сосредоточенными параметрами.

### *Заключение*

ассмотрены два варианта схемы построения гетеродина на базе арсенид-галлиевых гетероструктурных полевых транзисторов для смесителя миллиметрового диапазона с накачкой на двукратной частоте сигнала гетеродина: одноконтный ГУН на ГПТ с общим затвором и балансный ГУН на ГПТ с общим истоком. Обе спроектированные МИС генераторов  $K_u$ -диапазона в целом обладают необходимыми основными техническими показателями для применения в качестве гетеродина в составе понижающего преобразователя частоты современного СВЧ радиоприёмного устройства телекоммуникационного либо радиолокационного назначения. Одноконтный вариант следует применять в случаях, когда основными критериями оптимизации являются мощность гетеродина, полоса перестройки и к. п. д., а балансный - когда необходимо оптимизировать шумовые характеристики и габаритные размеры МИС понижающего преобразователя частоты.

Авторы выражают благодарность Ю. В. Фёдорову за разработку модели и предоставление экспериментальных данных по использованному транзистору.

### *Литература*

1. Гассанов Л. Г., Липатов А. А. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи – М.: Радио и связь, 1988, 288 с.
2. Данилин В. Н., Кушниренко А. И., Петров Г. В. Аналоговые полупроводниковые интегральные схемы СВЧ. - М.: Радио и связь, 1985, 192 с.
3. Белкин М. Е., Белкин Л. М. Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2010, вып. 1(224), с. 98-104.
4. RF and microwave circuits, measurements, and modeling. / Editor-in-chief M. Golio. – CRC Press, 2008, 876 pp.
5. Maas S. A. Nonlinear Microwave and RF Circuits. – Artech House, 2003, 582 pp.
6. Baek D., et al. Ku-Band InGaP-GaAs HBT MMIC VCOs with balanced and differential topologies. - IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, v. 52, No. 4, p. 1353-1359.