

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Институт электроники и телекоммуникаций

На правах рукописи

**Егоров Егор Владимирович**

**Исследование и разработка малошумящего высокостабильного опорного  
автогенератора сантиметрового диапазона, стабилизированного  
диэлектрическим резонатором**

Направление подготовки: 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи»

Направленность: 11.06.01\_01 «Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения»

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Автор работы: *Егоров Егор Владимирович*

Научный руководитель: *профессор, д.т.н.*

*Макаров Сергей Борисович*

Санкт-Петербург – 2021 г.

Научный доклад выполнен в Высшей школе прикладной физики и космических технологий (ВШПФиКТ) Института электроники и телекоммуникаций (ИЭиТ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Директор ВШ:

*Гельгор Александр Леонидович*

*к.т.н., доцент*

Научный руководитель:

*Макаров Сергей Борисович*

*д.т.н., профессор*

Рецензент:

*Кузьмин Сергей Викторович*

*к.ф-м.н., доцент Санкт-Петербургский  
государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-  
Бруевича*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

## Оглавление

<b>ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ</b> .....	4
Актуальность работы.....	4
Цель и задачи исследования .....	5
Научная новизна .....	6
Теоретическая и практическая значимость .....	6
Апробация работы .....	7
Публикации .....	8
Основные положения научного доклада .....	8
<b>Содержание работы</b> .....	9
Разработка малошумящего усилителя .....	9
Разработка резонансной системы на основе ДР .....	11
Разработка малошумящего опорного автогенератора .....	13
Модель расчёта НЧ шумов ОАГ по известным параметрам МШУ .....	18
<b>Заключение</b> .....	23
<b>Список работ, опубликованных по теме научного доклада</b> .....	25
Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК .....	25
Публикации в изданиях, рецензируемых SCOPUS .....	25
Публикации в изданиях, рецензируемых РИНЦ .....	25
<b>Список литературы:</b> .....	27

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

Маломощный опорный автогенератор (ОАГ) является фундаментальным элементом систем связи, от радиолокационных систем и оптической связи до контрольно-измерительного оборудования [1-5]. Типичный ОАГ содержит активный элемент (АЭ) и пассивную резонансную систему, которая определяет частоту генератора. Основопологающим качественным показателем любого ОАГ является его фазовый шум (ФШ) [6-7]. Уменьшение уровня фазового шума ОАГ важно, как для цифровых, так и для аналоговых систем связи. Предельные параметры аналоговых систем связи, такие как чувствительность и избирательность определяются в конечном итоге уровнем ФШ устройств тактирования. В системах связи с цифровой модуляцией рост уровня ФШ приводит к увеличению вероятности ошибочного приема или неприема бита информации [8]. В доплеровских системах РЛС ФШ влияет на точность определения объекта в пространстве и его скорость. Наиболее жесткие требования к уровню ФШ предъявляются к контрольно-измерительному оборудованию.

У серийных малогабаритных опорных автогенераторов, работающих вблизи частот 10 ГГц, уровень фазового шума (ФШ) редко достигает -115 дБн/Гц на частотах отстройки от несущей 10 кГц (эта и более низкие частоты относятся к так называемому «фликкерному» диапазону) [9-13]. Уникальные ОАГ, выполненные с применением лейкосапфировых диэлектрических резонаторов (ДР) и работающие в режиме «шепчущей галереи» могут достигать весьма низких значений ФШ [14-16]. Например, в [15] приведена схема, использующая два генератора и ДДР, которая позволяет достигнуть уровня -155 дБн/Гц на частотах отстройки 1 кГц. Главным недостатком таких генераторов является их сильная зависимость резонансной частоты и добротности от температуры. Габариты, необходимость термостабилизации и сложность настройки частоты резонанса заметно ограничивает их массовое применение [17].

Существует большое количество способов уменьшения ФШ генераторов [14-18]. Наиболее понятные методы – снижение фазовых шумов усилителей, входящих в ОАГ и увеличение нагруженной добротности резонансной системы. Снижение шумов усилителей во фликкерном диапазоне осуществляется как выбором активного элемента, например, маломощных транзисторов, выполненных по SiGe технологии, так и за счет выбора режима работы активного элемента и создания дополнительных обратных связей [14,18,19]. Применяют также параллельное включение транзисторов [14,20]. Применяют и более

сложные схемы усилителей с элементами компенсации. Это известная схема с прямой связью (feedforward) [14,18]. Она требует сложных схем регулировки баланса. На практике часто используют схемное увеличение эквивалентной добротности резонатора на порядок, используя схему «комбинированной» стабилизации частоты (КСЧ), в которой стабилизирующий резонатор используется одновременно, как частото задающий резонатор, так и как дискриминатор дополнительной системы автоподстройки частоты (АПЧ) [14,17]. Поэтому снижение ФШ ОАГ другими и более простыми методами является актуальной задачей.

Для практики важно построение малогабаритного высокостабильного генератора с низким уровнем ФШ. В диапазоне сантиметровых длин волн в качестве частото задающего элемента используются резонансные системы (РС) на диэлектрических резонаторах. Такие резонаторы выпускаются отечественными производителями, например, ООО Керамика [21]. В связи с проводимой политикой импортозамещения все более актуальным становится создание радиоустройств на отечественной элементной базе.

#### **Цель и задачи исследования**

В соответствии с изложенными выше способами построения высокостабильного опорного автогенератора наиболее эффективным методом будет построение ОАГ на SiGe биполярных транзисторах или микросхемах МШУ, с высокодобротным диэлектрическим резонатором в качестве частото задающей цепи. С учетом выше сказанного была сформулирована **цель работы:**

*Разработка и исследование перестраиваемого по частоте механическим и электрическим способом опорного полупроводникового автогенератора сантиметрового диапазона на диэлектрическом резонаторе в гибридном исполнении с низким уровнем ФШ, а также создание методики их проектирования в современных САПР.*

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- 1) Разработка маломощного усилителя (МШУ) и подбор режима его работы, обеспечивающего наименьший ФШ на ближних частотах отстройки.
- 2) разработка макетов плат маломощных усилителей на транзисторах, зарубежных и отечественных микросхемах МШУ.
- 3) Разработка модели малогабаритной высокодобротной резонансной системы на основе отечественного диэлектрического резонатора с электрической перестройкой частоты в САПР для электромагнитного анализа.
- 4) Макетирование и анализ характеристик полученной резонансной системы.

5) создание модели опорного автогенератора в САПР и расчет предварительных параметров.

6) создание макетов автогенераторов и их исследование по основным характеристикам.

7) создание методики определения НЧ шумов опорных автогенераторов на основе измерения ФШ усилителя.

### **Научная новизна**

- 1) Проведено исследование влияния параметров активного элемента, в частности его фликкерных источников шума, на фазовые шумы автогенератора.
- 2) Разработана модель малошумящего усилителя и определены его параметры для получения минимального уровня ФШ.
- 3) Разработаны модели резонансных систем на основе отечественных диэлектрических резонаторов и исследованы их прототипы.
- 4) Разработана методика по проектированию и исследованы схемы высокостабильных опорных автогенераторов, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн.
- 5) Разработана методика по проектированию и определению низкочастотных шумов опорных автогенераторов на основе измеренных фазовых шумов активных элементов.

### **Теоретическая и практическая значимость**

- 1) Проведенное исследование малошумящего усилителя на SiGe транзисторах позволило подобрать оптимальный с точки зрения минимального уровня фазовых шума режим работы усилителя.
- 2) Построение электромагнитной модели резонансной системы и ее исследование позволило подобрать параметры камеры и расположения диэлектрического резонатора внутри нее, а также определить степень связи РС с активной частью схемы.
- 3) Разработанная модель определения низкочастотных шумов опорных автогенераторов по измеренным ФШ усилителей (особенно это важно для усилителей на монолитных интегральных схемах), дает практическое совпадение шумов модели и его экспериментального макета. Использование в составе малошумящего генератора готовых серийных микросхем в качестве усилителей может упростить их практическое применение.
- 4) Разработанная модель ОАГ с учетом моделей активных и пассивных компонентов, предлагаемых производителями, и электромагнитный анализ

топологии в среде EmSight демонстрирует совпадение результатов с экспериментом.

- 5) На основе предложенной методики построения сверхмаломощных опорных автогенераторов в сантиметровом диапазоне могут быть разработаны аналогичные генераторы.
- 6) Механическая и электрическая подстройка опорных автогенераторов позволяет использовать их в составе ФАПЧ для долговременной стабильности.

### **Апробация работы**

Описанные в данной работе исследования прошли апробацию на следующих конференциях:

- 1) XLV Научно-практическая Конференция с международным участием «Неделя науки 2016», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 14- 19 ноября 2016 г.
- 2) XLVI Форум с международным участием «Неделя науки 2017», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 13- 19 ноября 2017 г.
- 3) XLII Научно-практическая Конференция с международным участием «Неделя науки 2018», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 19- 24 ноября 2018 г.
- 4) 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation, September 27-28, 2018.
- 5) International Conference on Electrical Engineering and Photonics - IEEE EExPolytech-2019, Congress Center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation, October 17-18, 2019.
- 6) Форум с международным участием «Неделя науки 2019», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 18- 23 ноября 2019 г.
- 7) Всероссийская конференция «Неделя науки ИФНиТ 2020», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 16- 20 ноября 2020 г.
- 8) International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies (YETI-2020), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, July 10-11, 2020.

- 9) International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies (YETI-2021), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, July 22-23, 2020

### **Публикации**

По исследованию, описанному в данном научном докладе опубликовано 11 работ. Список с опубликованными работами размещен в приложении 1.

### **Основные положения научного доклада**

- 1) Разработана модель малошумящего транзисторного усилителя с низким уровнем фазовых шумов в фликкерной области отстройки от несущей.
- 2) Построена электромагнитная модель резонансной системы на основе высокочастотного диэлектрического резонатора и создан ее экспериментальный прототип.
- 3) Исследована модель опорного автогенератора сантиметрового диапазона длин волн позволяющая построить малогабаритный автогенератор со сверхнизким уровнем фазовых шумов.
- 4) Развита модель определения низкочастотных шумов опорных автогенераторов по измеренным ФШ усилителей (особенно это важно для усилителей на монолитных интегральных схемах), которая позволяет точно оценить уровень ФШ на этапе проектирования автогенераторов.

# Содержание работы

## Разработка малошумящего усилителя

В автогенераторе в качестве активного элемента может использоваться либо микросхема МШУ, либо усилитель на транзисторах. В настоящее время при проектировании МШУ с низким уровнем ФШ применяются малошумящие SiGe транзисторы. Среди отечественных производителей такие транзисторы для диапазона частот 10 ГГц и выше не выпускаются, поэтому в работе был разработан и исследован малошумящий усилитель на транзисторе фирмы Infineon BFP843 [22]. МШУ был создан по схеме с общим эмиттером, обеспечивающим наилучшие энергетические и шумовые характеристики усилителя.

Моделирование МШУ было проведено в среде AWR MWO. Для получения более точного результата при проектировании использовались модели реальных компонентов, предлагаемые производителями. Проходные характеристики модели и полученного макета приведены на рис.1.

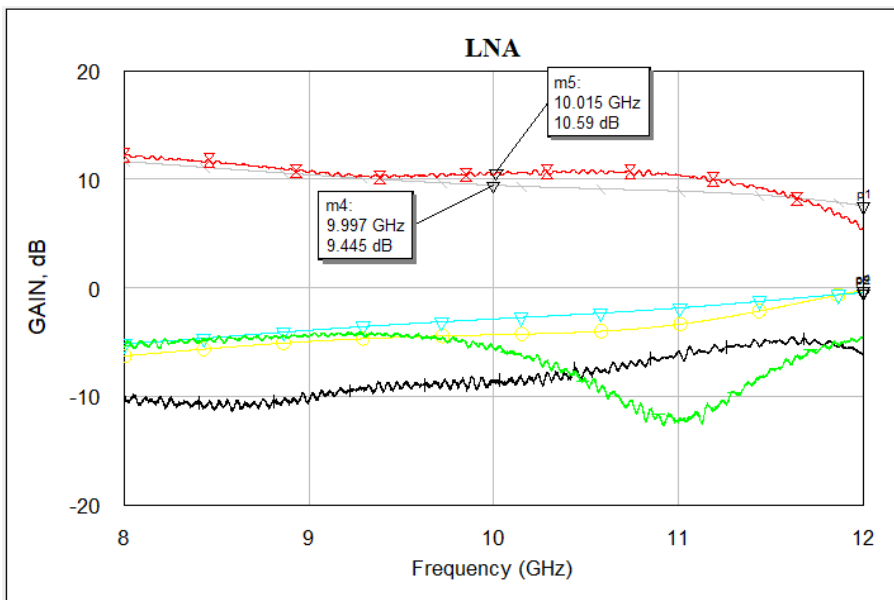
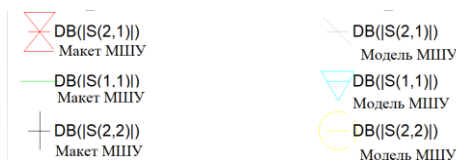


Рис. 1 – Проходные характеристики МШУ:



Параметры полученного усилителя:

- 1)  $K_u = 10,5$  дБ
- 2)  $K_{ш} = 2,6$  дБ
- 3) точка однодецибельной компрессии по выходу: +1.7дБм.

В работе также были спроектированы МШУ на зарубежных и отечественных МИС, таких как НМС3653 (GaAs биполярные транзисторы с гетеропереходом (БГТ)), НМС606 ( GaAs, InGaP, БГТ), TGA2567 (GaAs pHEMT транзисторы с длиной затвора  $L_g$  0,15 мкм ). Отечественный МШУ на полевых транзисторах (GaAs pHEMT транзисторах с  $L_g$  0,25 мкм ) разработан в АО Светлана-Рост. Эти МШУ использовались в макетах ОАГ с внешней положительной обратной связью (ВПОС). Фотографии макетов приведены на рис. 2.

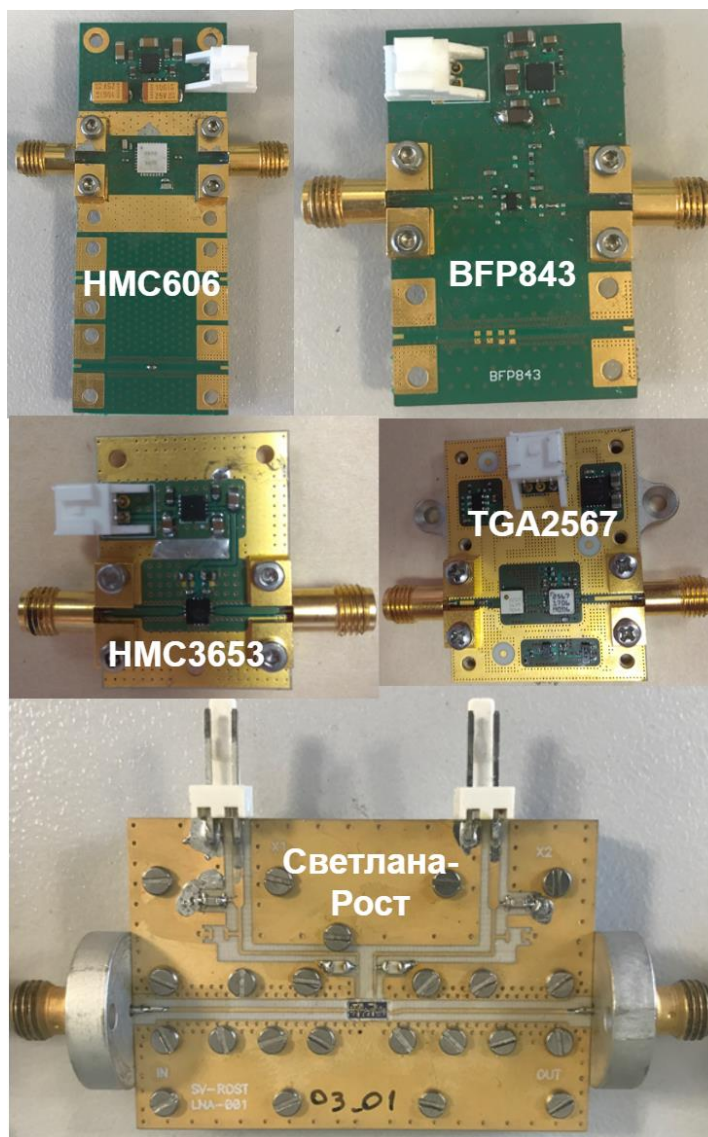


Рис. 2 – Макеты МШУ

### Разработка резонансной системы на основе ДР

В качестве обратной связи АГ используется разработанная высокодобротная резонансная система на основе диэлектрического резонатора фирмы ООО Керамика [23].

В РС (рис.3) предусмотрена механическая и электрическая перестройка резонансной частоты  $f_0$ . В алюминиевой полости (2) на многослойной печатной плате (1) расположен диэлектрический резонатор (4) на подставке (5). Внешняя схема расположена на нижней стороне платы. Связь ДР с внешней схемой, осуществляется с помощью переходных металлизированных отверстий между микрополосковыми линиями (МПЛ) связи (9), расположенными на верхней и нижней сторонах печатной платы. Сквозные заземленные металлизированные отверстия, расположенные вдоль микрополосковых линий используются для обеспечения согласования. Для механической перестройки резонансной частоты используется настроечный винт (3). Электрическая перестройка частоты осуществляется с помощью варикапа. Дугообразная МПЛ (7) использовалась для обеспечения связи ДР с варактором. Такая конструкция позволяет изменять величину связи между ДР и варактором за счет углового размера дуги  $\Theta_{\text{arc}}$  и радиального расстояния  $\Delta R_{\text{arc}}$  между ДР и дугой. Для подачи питания на варактор (8) используется узкополосная цепь питания, состоящая из  $\lambda/4$ -разомкнутых и замкнутых отрезков МПЛ (6). ДР представляет дисковый резонатор с абсолютной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=30$ . Диаметр ДР 6 мм, высота 2.51 мм.  $Q_c$  резонатора равна 20000. Для получения достаточно высокой нагруженной добротности  $Q_n$  и малых потерь  $L$  на резонансной частоте  $f_p$  были подобраны размеры алюминиевой полости и размеры подставки (а также ее материал). Для высоты полости 10.9 мм и диаметра 33 мм параметры КС приведены в табл. 1. Для обеспечения незначительного уменьшения  $Q_n$  выбирался высокодобротный варактор МА46Н120 от фирмы MACOM Technology Solutions [24]. Чтобы обеспечить электрическую перестройку частоты  $df$  не менее 2 МГц был подобран угловой размер  $\Theta_{\text{arc}}=100^\circ$  и расстояние  $\Delta R_{\text{arc}}=0,5$  мм. Параметры резонатора для двух напряжений  $U_v$  на варакторе, также приведены в таблице 1. Видно, что  $df$  равна 2,4 МГц. При этом уменьшение  $Q_n$  по отношению к случаю отсутствия варактора не превышает 0,4 дБ.

Табл.1

Глубина настроечного винта $h_{ASD}$ , мм	Режим работы	$f_0$ , ГГц	$L(f_0)$ , дБ	$Q_H$	$(Q_{H_{Uv=0}}/$ $Q_{H_{Uv=15}})^2$ , дБ	$df$ , МГц	$(Q_{Hc}/$ $Q_{H_{Uv=15}})^2$ , дБ
0.3	Без варактора	9,8449	7,042	8561			
	$U_v=0V$	9,8445	7,446	8204	-0,147	2,4	0,223
	$U_v=15V$	9,8469	7,21	8344			
2.3	Без варактора	9,9576	8,398	8162			
	$U_v=0V$	9,9572	8,816	7840	-0,141	2,4	0,209
	$U_v=15V$	9,9596	8,512	7968			

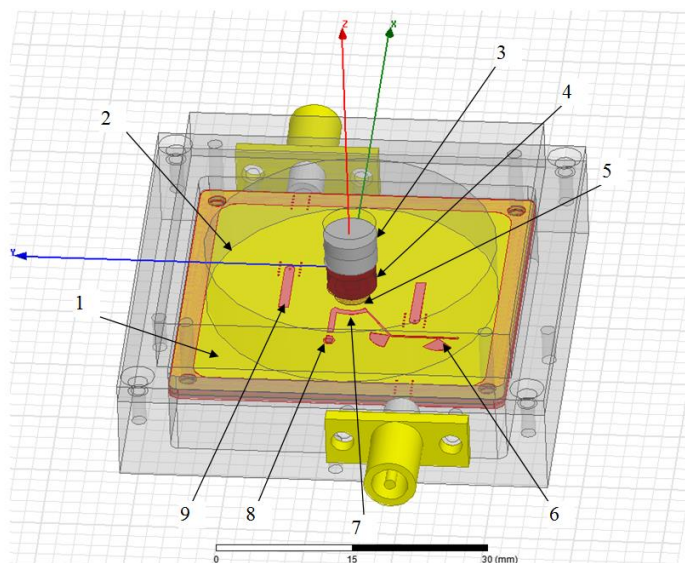


Рис.3 – Резонансная система с ДР

После моделирования РС был создан ее макет. Получена нагруженная добротность не менее 7000 во всем диапазоне электрической перестройки 2 МГц. На рис. 4, 5 приведены макет РС и его частотная зависимость модуля коэффициента передачи  $|S_{21}|$ .

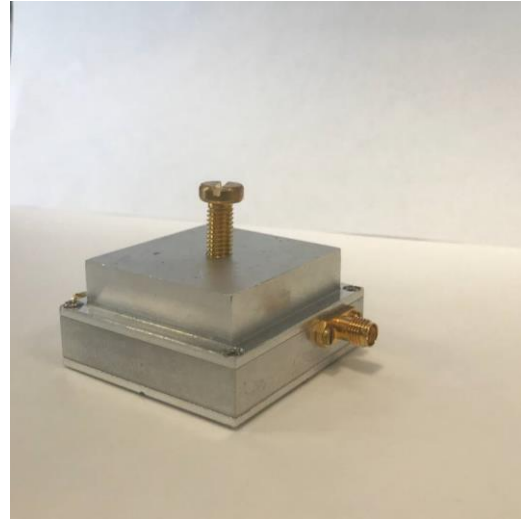
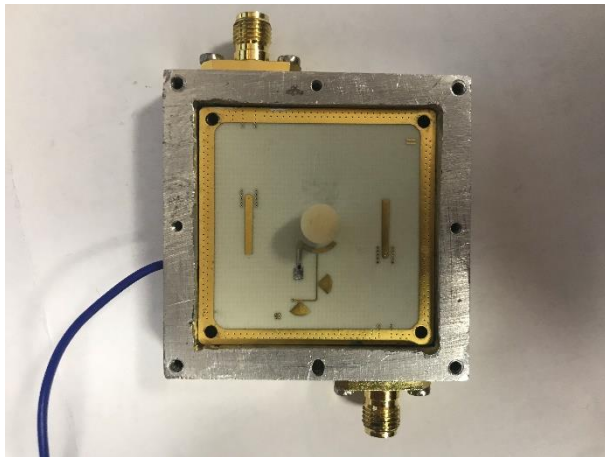


Рис.4 – Макет РС

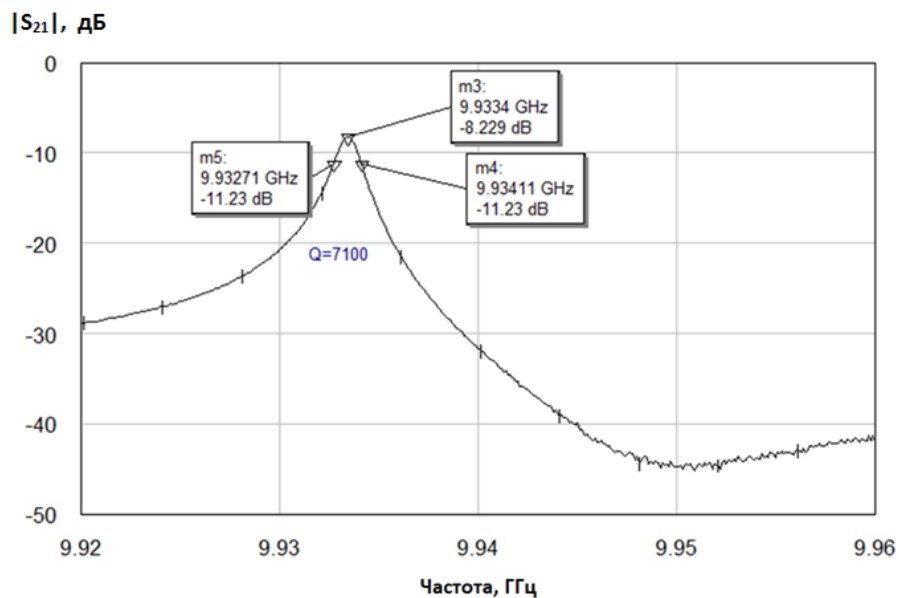


Рис.5 – Частотная зависимость модуля  $|S_{21}|$  макета РС

### Разработка маломощного опорного автогенератора

Моделирование опорного автогенератора проведено в САПР MWO. Схема и топология приведены на рис.6, 7. При проектировании использовались AWR и EmSight модели МШУ на транзисторах BFP843 и S-параметры реальной РС снятой в диапазоне близком к 10 ГГц при напряжениях на варакторе от 0 до 15В. Режим работы транзистора выбирался таким образом, чтобы обеспечить уровень выходной мощности более 0дБм и минимальный уровень ФШ. Для компенсации потерь в обратной связи использовалось два каскада усилителя. Условия самовозбуждения и минимального уровня ФШ [25] определялись длиной линий связи МШУ с РС. Результаты моделирования показали, что наиболее близкие к эксперименту параметры обеспечиваются при использовании EmSight

модели МШУ. На основе сравнения смоделированных и измеренных ФШ МШУ было установлено, что используемый в *spice* модели транзистора VFP843 один источник фликкерного шума не позволяет описать поведение ФШ как МШУ, так и АГ на частотах анализа ниже 10 кГц. Это потребовало проведение исследований по усложнению НЧ шумовой модели транзистора. В табл. 2 приведены результаты выходной мощности и уровня ФШ на частоте отстройки от несущей 10 кГц.

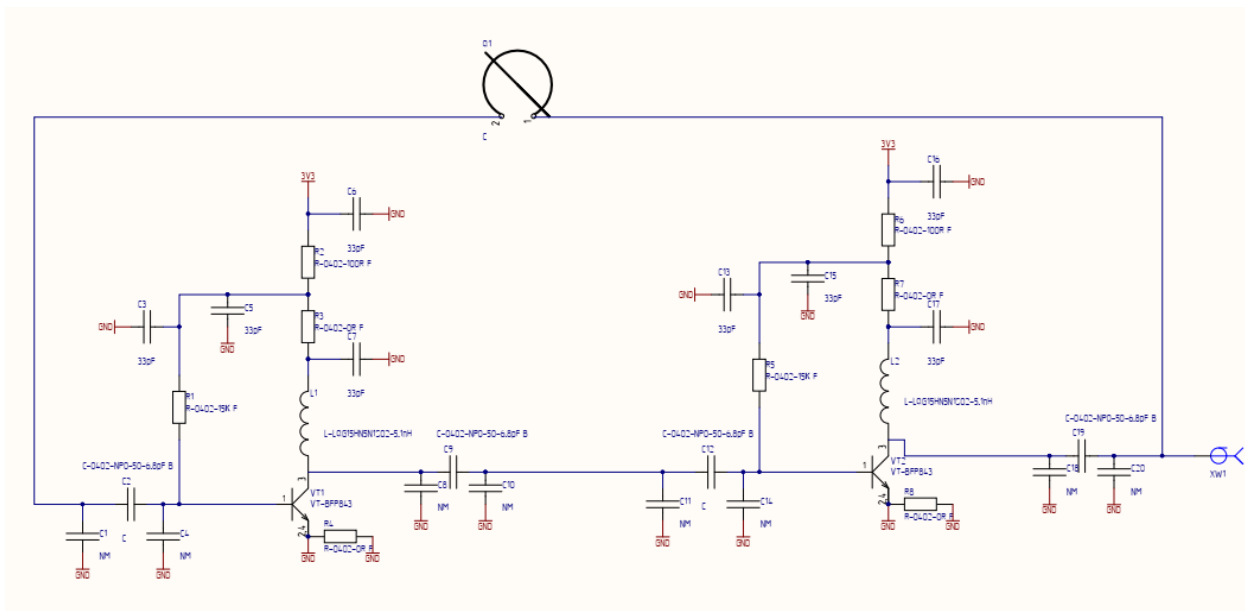


Рис. 6 – Схема ОАГ

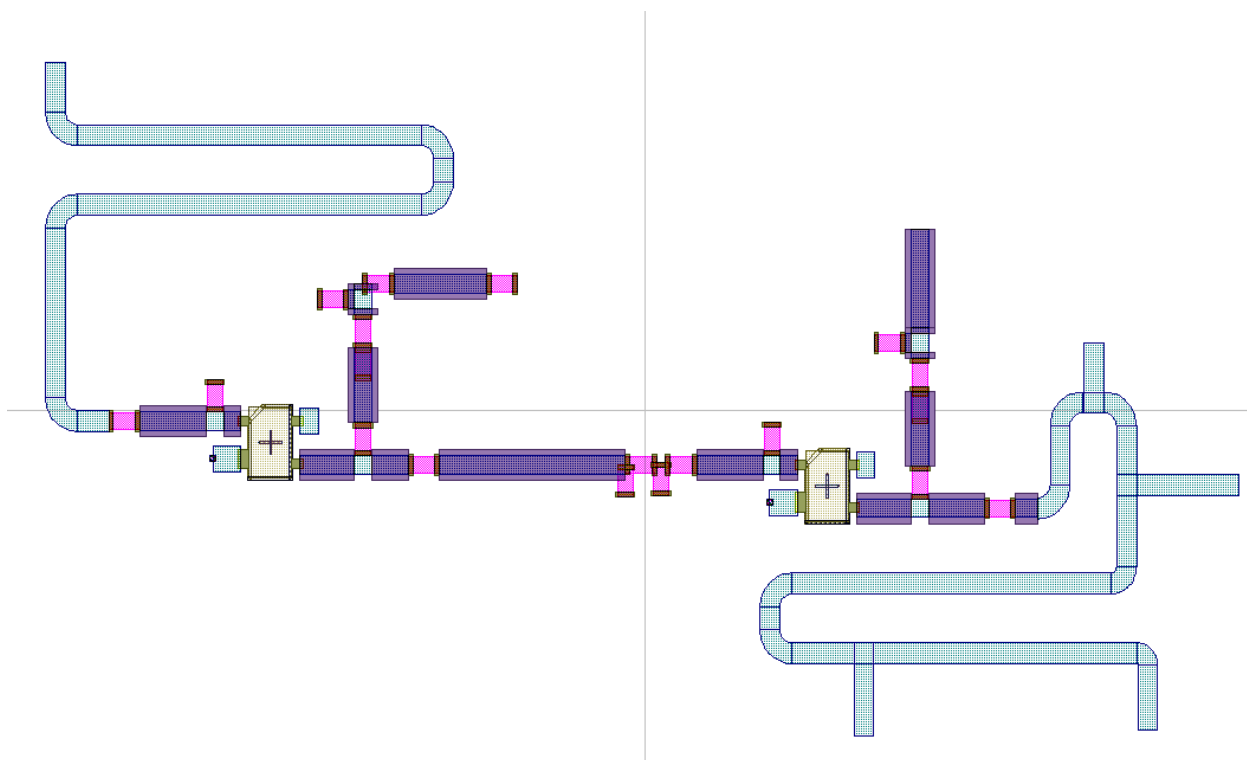


Рис. 7 – Топология модели ОАГ

Табл.2

Частота, ГГц	Напряжение на варакторе, В	ФШ в одной боковой полосе, на частоте анализа 10кГц, дБн/Гц	Выходная мощность, дБм
10,0085	0	122,5	0,8
10,0087	2	125,4	0,75
10,0087	4	126,4	0,75
10,009	6	126,5	0,8
10,0091	8	126,5	0,85
10,0095	10	125	0,85
10,0096	13	125,9	0,9
10,0096	15	124,4	0,9

Топология макета опорного малошумящего генератора приведена на рис. 8. Питание на ОАГ подается через линейный стабилизатор напряжения. Такой стабилизатор используется в первую очередь для уменьшения шума импульсного источника питания. ФШ полученного макета во всем диапазоне электрической перестройки не более -122 дБн/Гц (диапазон -122 – 123,2 дБн/Гц) на частоте анализа 10 кГц от несущей 10 ГГц. При этом выходная мощность не менее 2,5 дБм. Напряжение питания в диапазоне 4,5 – 16В, потребляемая мощность не более 135 мВт. На рис. 9 приведен спектр ФШ полученного ОАГ при напряжении на варакторе 7В.

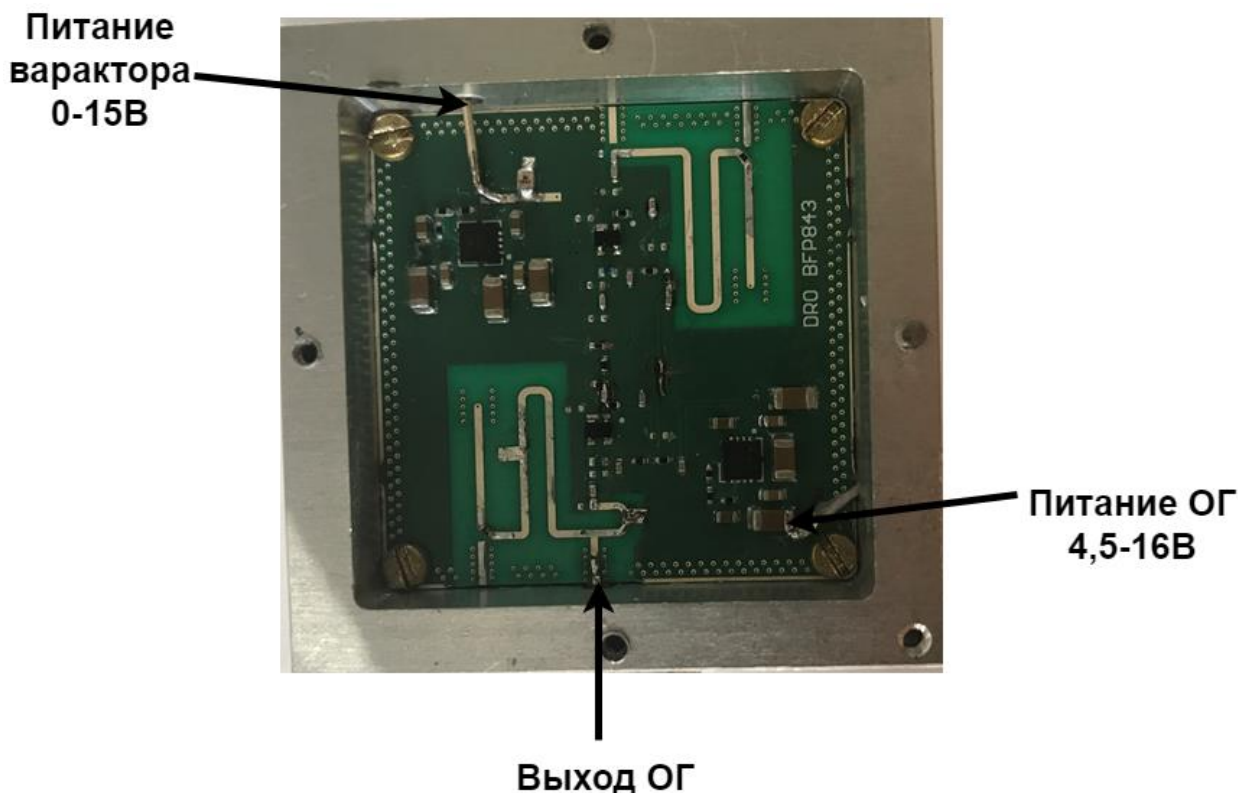


Рис.8 – Топология ОАГ на 10 ГГц

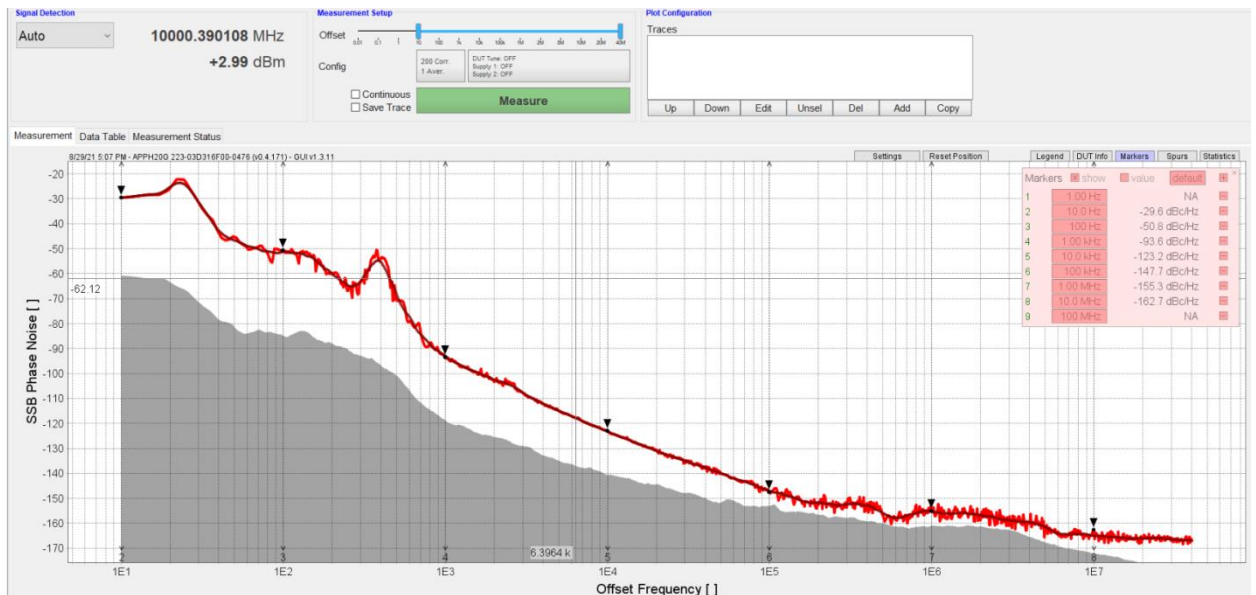


Рис.9 – Спектральная плотность мощности ФШ ОГ на 10 ГГц при напряжении на варакторе 7В

Особый интерес представляет проектирование ОАГ на отечественной элементной базе. Поэтому был исследован автогенератор на МШУ производства Светлана-Рост. Была собрана схема ВПОС, показанная на рис. 10. Минимум ФШ обеспечивается при определенных углах фазовращателя  $\phi$ . На рис. 11 приведена спектральная плотность мощности фазового шума модели АГ с использованием отечественного МШУ. При этом выходная мощность АГ составляет не менее 9 дБм. Достаточно высокий уровень ФШ относительно предыдущего ОАГ, обусловлен построением МШУ на полевых GaAs pHEMT транзисторах у которых уровень ФШ в фликкер области на десятки дБ выше, чем у кремне германиевых БГТ. Для уменьшения ФШ на полевых транзисторах могут быть применены схемы, описанные в [18].

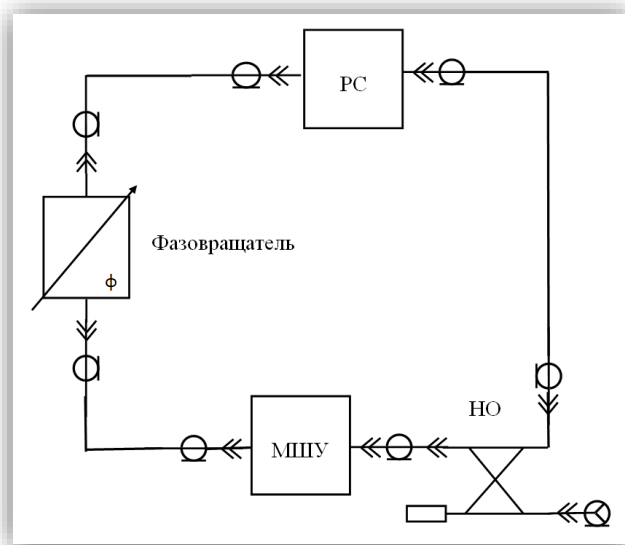


Рис. 10 – Схема ОАГ с ВПОС

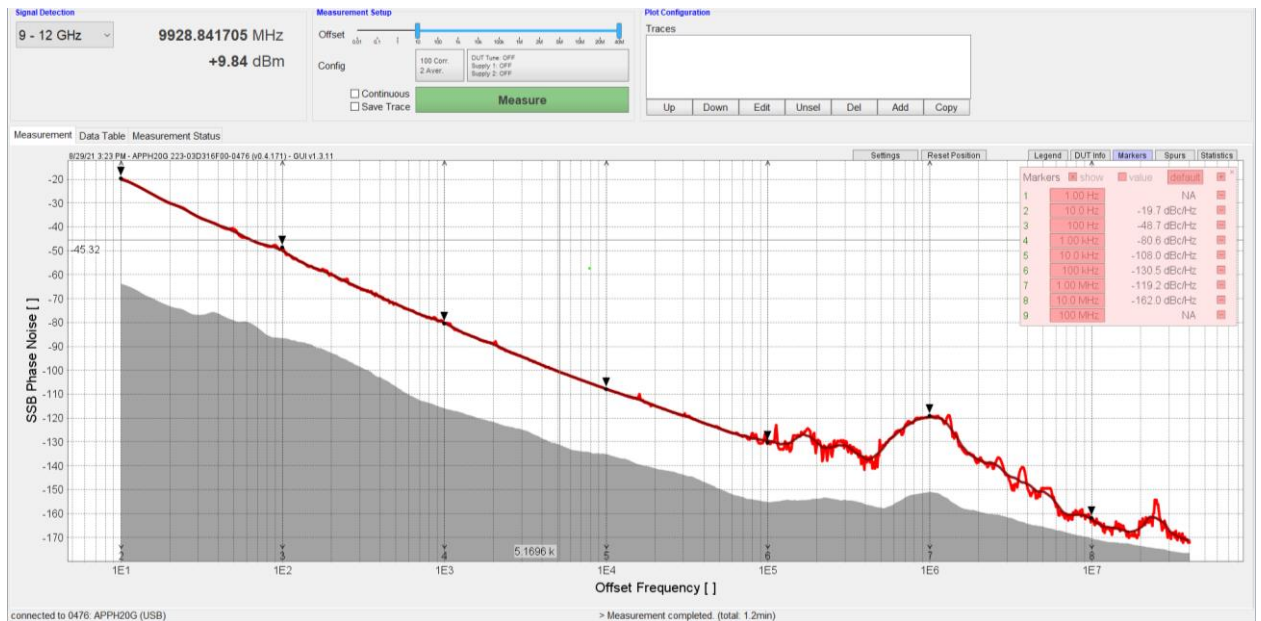


Рис. 11 – Спектральная плотность мощности ФШ ОАГ на отечественном МШУ

Измерения спектральной плотности мощности ФШ производилось на анализаторе ФШ AnaPico PNA20 [26]. Чувствительность данного прибора на частоте анализа 10 кГц от несущей 10 ГГц составляет -135 дБн/Гц при 1 корреляции. При увеличении корреляций до 100, чувствительность увеличивается на 10 дБ. Таким образом, результаты измерения можно считать адекватными. Точность измерений на частоте анализа 10 кГц равна  $\pm 2$  дБ[26].

Для сравнения на рис.12 приведена спектральная плотность мощности ФШ макета ОАГ на зарубежной микросхеме, относящейся к классу маломощных. Видно, что их уровень значительно меньше. Это указывает на необходимость предварительного отбора МШУ по ФШ и соответственно создание методики, позволяющей использовать эту характеристику при проектировании ОАГ.

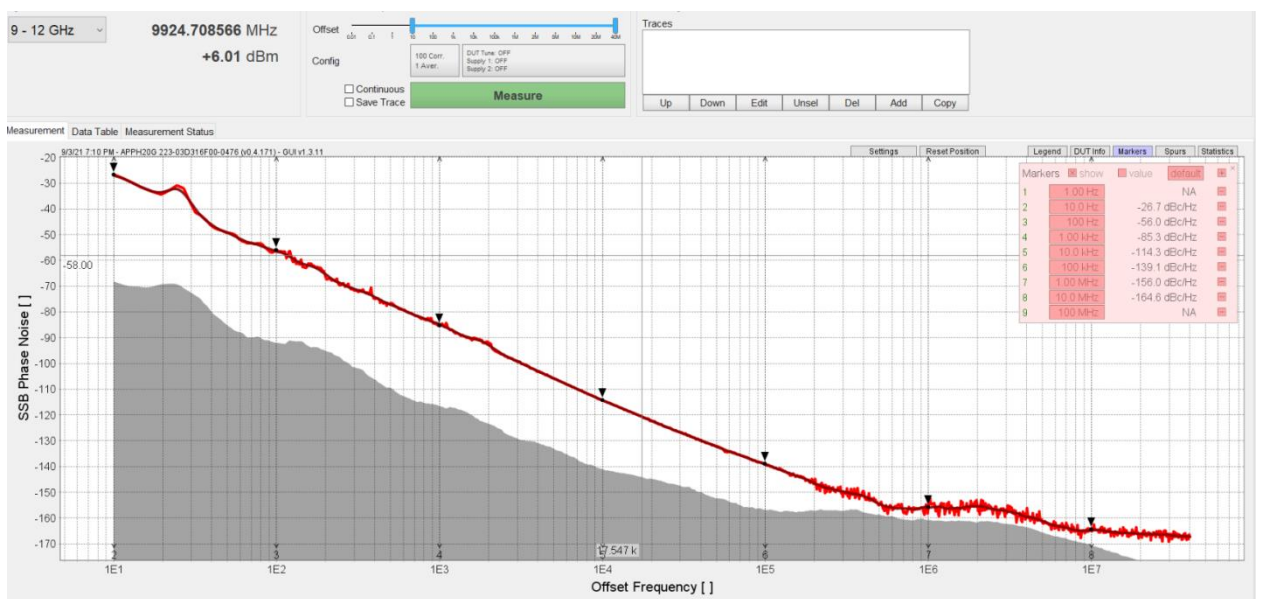


Рис. 12 – Спектральная плотность мощности ФШ ОАГ на зарубежном МШУ HMC3653

## Модель расчёта НЧ шумов ОАГ по известным параметрам МШУ

В настоящее время большое количество производителей, в том числе и отечественных, предлагают малошумящие усилители на монолитных интегральных схемах. Использование таких усилителей в составе ОАГ исключает необходимость самостоятельного проектирования на транзисторах. При проектировании ОАГ на МИС, требуется предварительная оценка уровня ФШ и выходной мощности. Для предварительной оценки параметров ОАГ была разработана модель регулируемого входной мощностью источника НЧ ФШ (РВМИФШ) усилителя, который располагается на его входе [27, 28].

В качестве модели нелинейного усилителя использовалась «Nonlinear Amplifier System Model (Closed Form): NL\_AMP» [29]. В эту модель подставлялись параметры реальных МИС: коэффициент усиления, точка однодецибельной компрессии P1dB, интермодуляция третьего порядка по выходу OIP3, коэффициент шума Кш, возвратные потери  $|S_{11}|, |S_{22}|$ , приведенные в таблице 3 для  $f_0=9,8$  ГГц. Параметры МИС TGA2567, НМС3653 взяты из работы [28], в которой приведены экспериментально измеренные значения этих параметров. Параметры усилителя НМС-С072 взяты из технических данных [30].

Табл. 3.

Параметры	TGA2567	HMC3653	HMC-C072
К <sub>у</sub> , дБ	15,7	14,6	12
P <sub>1dB</sub> , дБм	14.6	16.8	20
OIP <sub>3</sub> , дБм	28,5	28	34
Кш, дБ	3,9	6,3	4.5
S <sub>11</sub>  , дБ	-32.18	-15.04	-17
S <sub>22</sub>  , дБ	-21.62	-10.81	-21

AWR схема управляемого входной мощностью шумового источника тока, устанавливаемого на входе модели нелинейного усилителя, представлена на рис. 13.

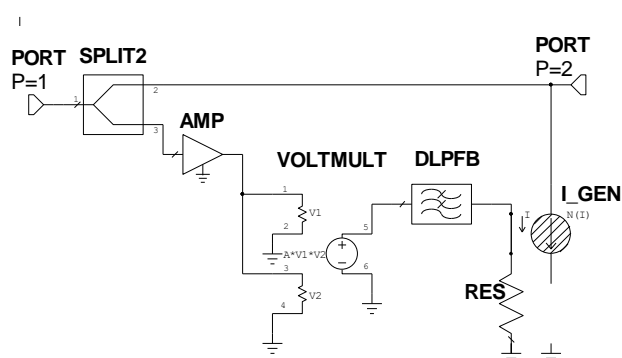


Рис.13 – Модель РВМИФШ

На линейный усилитель AMP поступает незначительная часть мощности через разветвитель SPLIT2 проходящая между портами P=1 и P=2. Детектор сигналов выполнен на идеальном умножителе (VOLTMULT) и фильтре низких частот DLPFB. Через входную цепь зависимого от смещения шумового источника тока I\_GEN и через нагрузку RES проходит постоянный ток  $I_{dc}$ , пропорциональный входной мощности сигнала. Спектральная плотность мощности токовых шумов этого источника шума зависит от  $I_{dc}$  следующим образом [10]:

$$S(F) = P1 * \frac{(I_{dc}^{P2})}{(P3 + P4 * F^{P5})} \quad (1)$$

где F- частота анализа спектра.

Изменяя в определенных пределах для заданной частоты анализа коэффициенты формулы (1), а также незначительно меняя коэффициент шума, можно подобрать близкую к экспериментальной зависимость фазовых шумов от входной мощности  $P_{in}$ . На рис.14 приведена такая зависимость для частоты F равной 10 кГц. Сплошными линиями представлены зависимости фазовых шумов модели усилителя, а точками показаны экспериментальные значения.

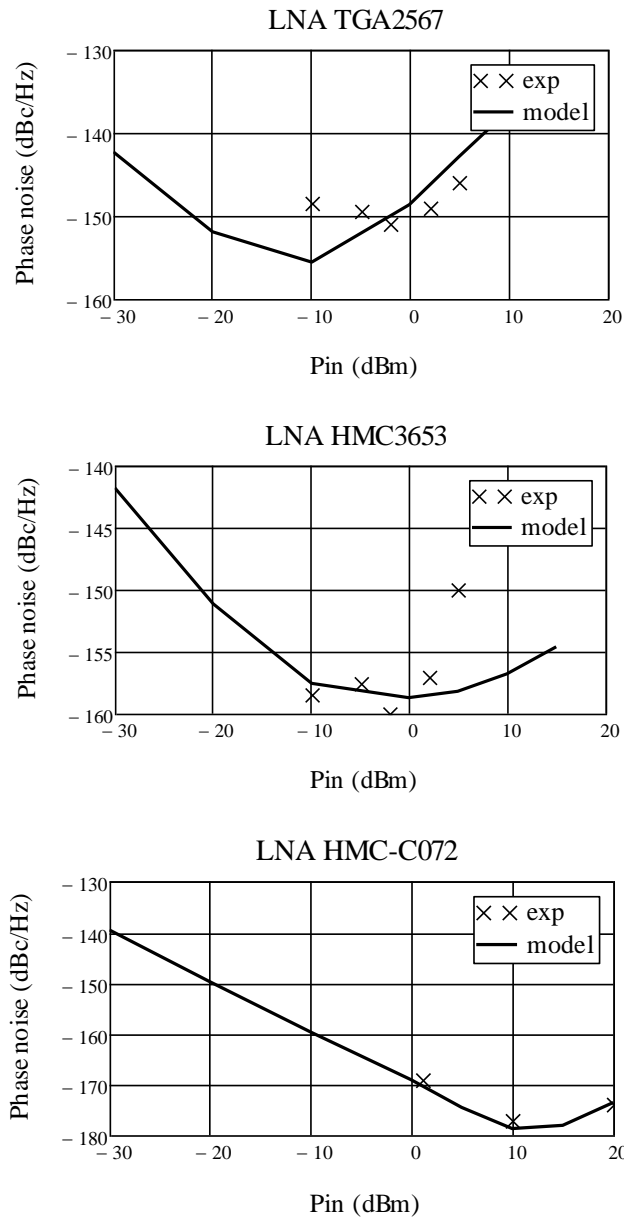


Рис.14 – Зависимость ФШ МШУ от входной мощности

Видно, что при малых значениях  $P_{in}$  фазовые шумы модели усилителя нарастают, что связано с известной обратно пропорциональной зависимостью равномерной составляющей спектра фазового шума усилителя от  $P_{in}$  [31].

Для РС с нагруженной добротностью  $Q_n = 1200$  и резонансной частоты 9,8 ГГц был спроектирован ОАГ на МИС HMC3653. Схема включения с внешней обратной связью показана на рис.10. На рис. 15 приведены экспериментальные характеристики для разных значений фазовращателя.

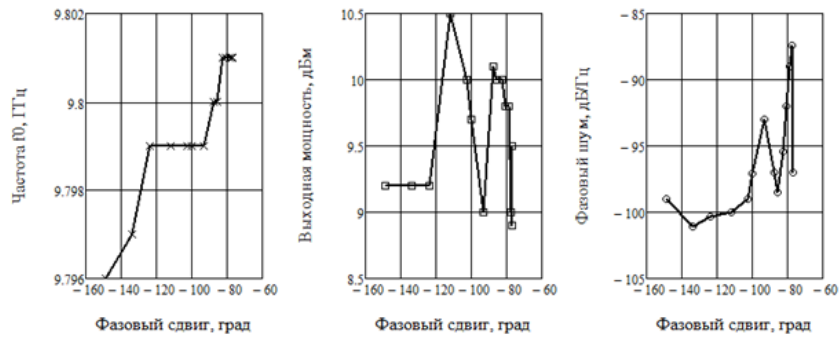


Рис. 15 – Экспериментальная зависимость частоты, выходной мощности и спектральной плотности мощности ФШ ОАГ от фазового сдвига

Результаты моделирования с вышеописанным источником шума, который устанавливается на входе МШУ и без него приведен на рис. 16. Для источников шума заданных в модели усилителя и определяемых величиной коэффициента шума Кш уровни ФШ модели на 10-20 дБ меньше экспериментальных. При использовании в модели дополнительного источника шума наблюдается достаточно хорошее совпадение расчетных значений  $S_{\phi}$  с экспериментальными результатами.

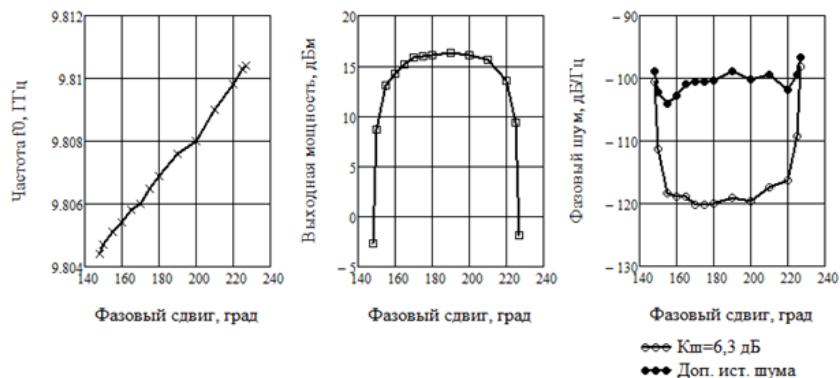


Рис. 16 – Зависимость частоты, выходной мощности и спектральной плотности мощности ФШ от фазового сдвига модели ОАГ

Как показали исследования [4], наверное, следует эту методику применить и к моделированию ФШ усилителей, собранных на транзисторах. Обычно производитель транзисторов приводит интенсивность одного фликкерного источника шума (в БГТ он расположен в эмиттерной области). Этот источник определяется из измерений шумов тока эмиттера. Однако, как показывают наши исследования [4] этого источника шума не достаточно для получения уровня ФШ усилителя и ОАГ, наблюдаемых в эксперименте. Введение дополнительного источника шума в базовую область позволяет получить интенсивность ФШ приближающихся к экспериментальным значениям усилителя. Однако достигнуть значений адекватных ФШ ОАГ не удастся, хотя и наблюдается некоторое совпадение в пределах 10 дБ. Разработанной модели НЧ шумов транзистора, дающей возможность адекватного расчета ФШ в настоящее время нет. Отдельные исследования, приводимые в литературе [32], говорят о воздействии на ФШ во фликкерной области и

других источников шума, например, флуктуаций барьерных емкостей. Поэтому и в случае проектирования ОАГ на транзисторах для расчета ФШ ОАГ следует воспользоваться предложенной выше методикой.

## Заключение

1) В процессе работы был разработан двухкаскадный МШУ на транзисторе BFP843. Использование такого МШУ в цепи ОС с высокодобротной резонансной системой позволяет построить АГ со сверх низким уровнем ФШ. В качестве усилительных элементов могут использоваться МШУ на транзисторах, а также готовые монолитные интегральные схемы, в частности, МИС усилителя фирмы Светлана-Рост. Однако для уменьшения ФШ ОАГ с использованием МИС может потребоваться усложнение схемы, например, введение обратной связи через фазовый детектор.

2) Разработана электромагнитная модель высокодобротной резонансной системы и ее прототип. Получена нагруженная добротность более 7000 с электрической перестройкой 2 МГц. В качестве резонатора использовался отечественный диэлектрический резонатор фирмы ООО Керамика.

3) В работе рассмотрен метод построение ОАГ сантиметрового диапазона длин волн. Моделирование всех частей генератора производится в современных САПР: MWO и ANSYS HFSS. При моделировании использовались реальные модели активных и пассивных компонентов, предлагаемые производителями. Дополнительный электромагнитный анализ топологии МШУ в среде EmSight демонстрирует совпадение результатов с экспериментом. Низкий уровень ФШ ОАГ менее -122 дБн/Гц (частота отстройки от несущей 10 ГГц равна 10кГц) по сравнению с серийными образцами был получен при использовании МШУ на SiGe БГТ транзисторах и резонансной системы с нагруженной добротностью более 6000.

4) Для получения более точных результатов спектральной плотности мощности модели ОАГ и МШУ на транзисторах BFP843 для частот анализа менее 10 кГц следует усложнить шумовую модель транзистора за счет введения дополнительных источников шума в базовый ввод транзистора. Однако усложненная модель требует измерений ФШ спроектированного усилителя, что по трудоемкости близко к разработанной методике определения НЧ шумов ОАГ на основе измеренных ФШ усилителя.

5) Разработанный опорный автогенератор на отечественной элементной базе с уровнем ФШ -108 дБн/Гц близким к серийным изделиям, говорит о перспективности разработки в данном направлении.

6) Разработана методика определения низкочастотных шумов автогенератора на основе измерения ФШ усилителя. Данный метод позволяет более точно определить уровень

ФШ автогенератора на этапе его моделирования и практически незаменим при создании АГ на основе МИС усилителей.

## Список работ, опубликованных по теме научного доклада

### Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК:

1) Малышев В.М., Егоров Е.В. Экранированная колебательная система опорного СВЧ генератора с торцевым возбуждением дискового диэлектрического резонатора. – Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. НТВ – ИТУ/2017, №2

### Публикации в изданиях, рецензируемых SCOPUS:

1) E.V. Egorov ; V.M. Malyshev Research of X-Band Reference Oscillator on the Monolithic Integral Schemes of Amplifiers. 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)

2) Egor V. Egorov; Victor M. Malyshev Phase Noise Simulation of Microwave Reference Oscillator Based on the MMIC Amplifier 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)

3) Egor V. Egorov, Anastasia V. Ivanova, Sergey B. Makarov, Victor M. Malyshev Ultra-Low-Noise Reference Oscillator Based on a Dielectric Resonator with Mechanical and Electrical Frequency Tuning. International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies pp 621-628

4) Egor Egorov, Sergey Makarov, Victor Malyshev. Research of an X-band Oscillator Based on a SiGe Amplifier with Dielectric Resonator. International Conference "INTERNATIONAL YOUTH CONFERENCE ON ELECTRONICS, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGIES" (YETI-2021).

### Публикации в изданиях, рецензируемых РИНЦ:

1) Егоров Е.В., Малышев В.М. Малошумящий опорный транзисторный автогенератор фиксированной частоты с диэлектрическим резонатором «Неделя науки СПбПУ», 2016 – С.21-23

- 2) Егоров Е.В. Малышев В.М. Малошумящий транзисторный СВЧ-Автогенератор фиксированной частоты с диэлектрическим резонатором. Сборник лучших докладов «Неделя науки СПбПУ», 2016
- 3) Е.В. Егоров, М.М. Франк, В.М. Малышев. Малошумящий опорный транзисторный автогенератор с диэлектрическим резонатором сантиметрового диапазона длин волн «Неделя науки СПбПУ», 2017
- 4) Е.В. Егоров, П.И. Маняхина, В.М. Малышев. Транзисторный свч-усилитель с низким уровнем фазовых шумов для опорного автогенератора «Неделя науки СПбПУ», 2018
- 5) ЕГОРОВ Е.В., ИВАНОВА А.В., МАЛЫШЕВ В.М. Электрически перестраиваемая высокочастотная колебательная система с диэлектрическим резонатором для малошумящего опорного генератора сантиметрового диапазона волн. неделя науки спбпу материалы научной конференции с международным участием. 2019
- 6) ЕГОРОВ Е.В. МАЛЫШЕВ В.М. Исследование опорного автогенератора сантиметрового диапазона волн. Неделя науки ИФНИТ, сборник материалов Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2020 Издательство: Политех-Пресс.

## Список литературы:

- 1) Chenakin, A.: Frequency Synthesis. Current status and Future Projections. *Microwave Journal*, vol. 60, No. 4, 22-36 (2017).
- 2) Nikitin, A. B., Khabitueva, E. I.: A 6-12 GHz wideband hybrid vco. In: 2018 IEEE Int. Conf. Electr. Eng. Photonics, EExPolytech 2018, pp. 37–39, St. Petersburg, Russia (2018).
- 3) Nikitin, A. B., Khabitueva E. I.: Microwave Ultra-Wideband VCO Design. In: 2018 Int. Conf. Actual Probl. Electron Devices Eng. APEDE 2018, pp. 108–112, Saratov, Russia (2018).
- 4) Khabitueva, E. I., Nikitin, A. B.: The PLL synthesizer based on 6-12 GHz wideband hybrid VCO. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1326 (2019).
- 5) Akhmetov, D. B., Korotkov, A. S., Rumyancev, I. A.: 2.4-2.5 GHz fractional-n frequency synthesizer with integrated VCO in 0.18 um CMOS for RFID Systems. In: 2018 IEEE Int. Conf. Electr. Eng. Photonics, EExPolytech 2018, pp. 64–68, St. Petersburg, Russia (2018).
- 6) Petrov, A. A., Shabanov, V. E., Zalyotov, D. V., Davydov, V. V., Bulyanitsa, A. L., Shapovalov, D. V.: Modernization of the frequency synthesizer of cesium atomic clock. In: 2018 IEEE Int. Conf. Electr. Eng. Photonics, EExPolytech 2018, pp. 52–55, St. Petersburg, Russia (2018).
- 7) Akhmetov, D. B., Korotkov, A. S.: The reference spur reduction technique for frequency synthesizers. In: 2018 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng., ElConRus 2018, pp. 164–166, Russia (2018).
- 8) How to Optimize Local Oscillator Phase Noise for EVM Measurements, [https://blogs.keysight.com/blogs/tech/rfmw.entry.html/2020/05/08/optimize\\_phase\\_noiseFYkg.html](https://blogs.keysight.com/blogs/tech/rfmw.entry.html/2020/05/08/optimize_phase_noiseFYkg.html), last accessed 2021/03/14.
- 9) Frequency generation products – MITEQ [Электронный ресурс] / Narda-MITEQ – 2018. – Режим доступа: [www.nardamiteq.com](http://www.nardamiteq.com)
- 10) Wireless, RF and Microwave Telecommunication Solutions [Электронный ресурс] / Raditek – 2018. – Режим доступа: <http://raditek.com> (15.06.2019).
- 11) Nexyn Corporation [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа: <http://www.nexyn.com> (15.06.2019).
- 12) Analog Devices | Semiconductors and Signal Processing ICs [Электронный ресурс] / Analog Devices – 2018. – Режим доступа: <http://www.analog.com> (15.06.2019).

- 13) Z-Communications, Inc. | The World Leader in VCOs & PLLs [Электронный ресурс] / Z-Communications, Inc. – 2018. – Режим доступа: <http://www.zcomm.com> (15.06.2019).
- 14) Царапкин Д. П. Методы генерирования СВЧ колебаний с минимальным уровнем фазовых шумов: дис. д-ра техн. наук 05.12.04 [Электронный ресурс]. Д. П. Царапкин : Москва, 2004. – 413 с. – РГБ ОД, 71:05-5/55. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com> (15.06.2019).
- 15) Ivanov E. N. Low Phase-Noise Sapphire Crystal Microwave Oscillators: Current Status/ E. N. Ivanov, M. E. Tobar// IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control. – 2009, vol. 56, no. 2. – P. 263-269.
- 16) McNeilage C. A Review of sapphire whispering gallery mode oscillators including technical progress and future potential of the technology/ C. McNeilage, J. H. Searls, E. N. Ivanov\*, P. R. Stockwell, D. M. Green, M. Mossammaparast// Frequency Control Symposium and Exposition, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International. . –23-27 Aug. 2004. – P. 210-218.
- 17) Гаревой А. В. Маломощные источники непрерывных сигналов СВЧ для измерительной техники: дис. на соискание к. т. н. 05.12.04 [Электронный ресурс]. А. В. Гаревой : Томск, 2017. – 118 с. – Режим доступа: <https://postgraduate.tusur.ru> (15.06.2019).
- 18) Ченакин А. Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы. Электроника: НТБ – 2011, №4. – с. 52-6
- 19) Плутешко А.В., Царапкин Д.П. Компенсация фазового фликкер-шума в усилителе мощности на биполярном транзисторе // Радиотехника и электроника. — 2012. — Т. 57, № 4. — С. 437–440.
- 20) Boudot R., E. Rubiola. Phase Noise in RF and Microwave Amplifiers/ R. Boudot, E. Rubiola. - Cambridge University Press, 2009. – 202 С.
- 21) Продукция ООО Керамика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ramics.ru/%d0%bf%d1%80%d0%be%d0%b4%d1%83%d0%ba%d1%86%d0%b8%d1%8f/>
- 22) Спецификация BFP843 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP843-DS-v01\\_00-en.pdf?fileId=db3a30433f9a93b7013f9f380d2c1f78](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BFP843-DS-v01_00-en.pdf?fileId=db3a30433f9a93b7013f9f380d2c1f78)
- 23) Е. В. Егоров, В. М. Малышев, “Экранированная колебательная система опорного СВЧ-генератора с торцевым возбуждением дискового диэлектрического резонатора”, Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 10:2 (2017), 45–57

- 24) MA46H120 Series. GaAs Constant Gamma Flip-Chip Varactor Diode, <http://www.macom.com>, last accessed 2019/04/09
- 25) Gungor C. E. Low Phase Noise Oscillator design and simulation using large signal analysis and low frequency feedback networks [Электронный ресурс]. Thesis submitted to the department of electrical and electronics engineering, 2013. – Режим доступа: <http://www.thesis.bilkent.edu.tr/0006605.pdf>
- 26) Спецификация Анапико PNA20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://anapico-russia.com/wp-content/uploads/2019/05/pna-datasheet.pdf>
- 27) Egorov, Malyshev. Phase Noise Simulation of Microwave Reference Oscillator Based on the MMIC Amplifier Conference: 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)
- 28) Е.В. Егоров, В.М. Малышев Исследование опорного автогенератора сантиметрового диапазона на монолитных интегральных схемах усилителей. 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018).
- 29) Microwave Office Element Catalog NI AWR Design Environment v13.03 Edition. Legal notices. 2017 // URL: <http://kb.awr.com/display/help/Documentation> (Accessed: 04.09.2019).
- 30) HMC-C072 ultra low phase noise , 6-12 GHz. Datasheet. Analog devices // URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/hmc-c072.pdf> (04.09.2019).
- 31) E. Rubiola, Phase noise and frequency stability in oscillators: Cambridge University Press, 2009.
- 32) Yakimov, A.V., Klyuev, A.V., Krevskii, M.A.: The Nature of Introduced Phase 1/f Noise in Microwave Oscillators. Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 65, No. 1, 84-89 (2020).