

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.314

Косяк  
Майя Александровна

Определение параметров и характеристик преобразователей частоты СВЧ и  
КВЧ диапазона

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-38 80 01 «Приборостроение, метрология и  
информационно-измерительные приборы и системы»

---

Научный руководитель  
Белошицкий Анатолий Павлович  
кандидат технических наук, доцент

---

Минск 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Преобразователи частоты (ПЧ) являются ключевыми компонентами многих приемных и приемо-передающих систем сверхвысоких (СВЧ) и крайневых частот (КВЧ). Область их применения простирается от мобильной связи до автомобильных приложений, например, таких как радар для определения расстояния до автотранспорта, обзорный локатор или спутниковая техника. Для эффективного использования ПЧ в этих системах необходимо знать их параметры с высокой точностью. Поэтому задачи и разработки измерительных комплексов (стендов) для определения параметров ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона и методик выполнения измерений с их помощью являются весьма важными и актуальными.

Для разработки измерительных стендов и методик выполнения измерений необходимо провести анализ схем и принципов построения ПЧ, особенностей и номенклатуры измеряемых параметров и характеристик, а также сформулировать требования к методам и средствам измерения их параметров.

Эти обстоятельства требуют разработки и исследования измерительного оборудования и научно-обоснованных методик выполнения измерений параметров и характеристик ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона, учитывающих особенности их конструктивного выполнения.

Целью настоящей работы является разработка измерительных комплексов (стендов) и методик выполнения измерений параметров преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазона и проведение на их основе экспериментальных исследований опытных образцов ПЧ.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ работы схем и конструкций преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазонов и их контролируемых параметров;
- проанализированы методы и средства измерений, используемые для определения параметров и характеристик преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазона;
- разработаны измерительные стенды для определения параметров ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона ;
- разработаны методики выполнения измерений параметров и характеристик ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона;
- проведены экспериментальные исследования опытных образцов ПЧ СВЧ и КВЧ диапазонов с использованием разработанных измерительных стендов и методик.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные измерительные стенды и методики выполнения измерений позволяют контролировать с высокой точностью параметры и характеристики ПЧ СВЧ и КВЧ диапазонов.

Библиотека БГУИР

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время разрабатываются новые образцы специальной техники микроволнового диапазона, основными компонентами которых являются приемо-передающие модули. Технические и эксплуатационные характеристики этих модулей во многом зависят от параметров ПЧ входящих в их состав.

Целью настоящей работы является разработка измерительных комплексов (стендов) и методик выполнения измерений параметров преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазона и проведение на их основе экспериментальных исследований опытных образцов ПЧ.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

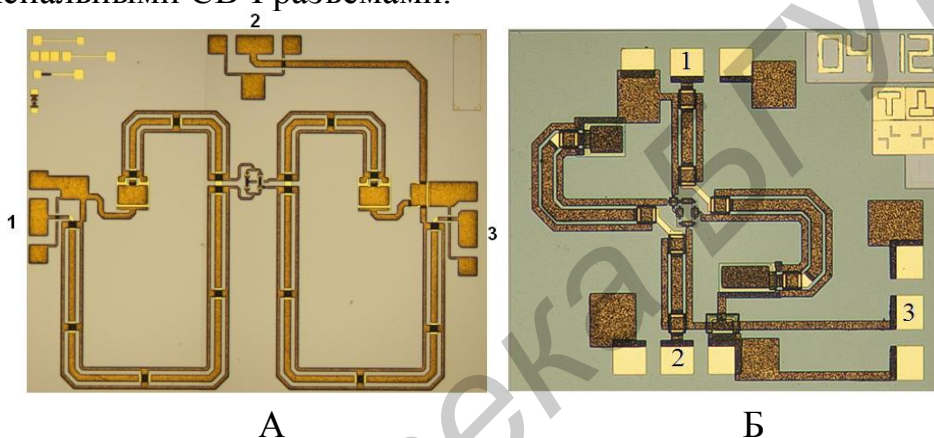
- проведен анализ работы схем и конструкций ПЧ СВЧ и КВЧ диапазонов и их контролируемых параметров;
- проанализированы методы и средства измерений используемые для определения параметров и характеристик ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона;
- разработаны измерительные стенды для определения параметров преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазона ;
- разработаны методики выполнения измерений параметров и характеристик преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазона;
- проведены экспериментальные исследования опытных образцов преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазонов с использованием разработанных измерительных стендов и методик.

Разработанные в рамках диссертационной работы измерительные комплексы (стенды) и методики выполнения измерений внедрены в эксплуатацию и используются для определения измерений параметров преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазонов в ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов».

Результаты работы были апробированы на Международной НТК, приуроченной к 50-летию МРТИ – БГУИР (Минск 18-19 марта 2014 г.) и опубликованы в материалах этой конференции.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ параметров и характеристик преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазонов и современных методов и средств их измерения. Рассмотрены принципы построения и схемы преобразователей частоты. Выявлено, что наиболее перспективным для использования в СВЧ и КВЧ диапазонах являются ПЧ на основе двойного кольцевого балансного смесителя на согласованных интегральных арсенид-галлиевых диодах Шоттки. Такие ПЧ могут быть выполнены как на подложке GaAs, так и в корпусе с коаксиальными СВЧ разъемами. На рисунках 1 и 2 представлены ПЧ выполненные на подложке GaAs и в корпусе с коаксиальными СВЧ разъемами.



А- ПЧ СВЧ диапазона ; Б- ПЧ КВЧ диапазона

Рисунок 1 – ПЧ ,выполненные на подложке GaAs

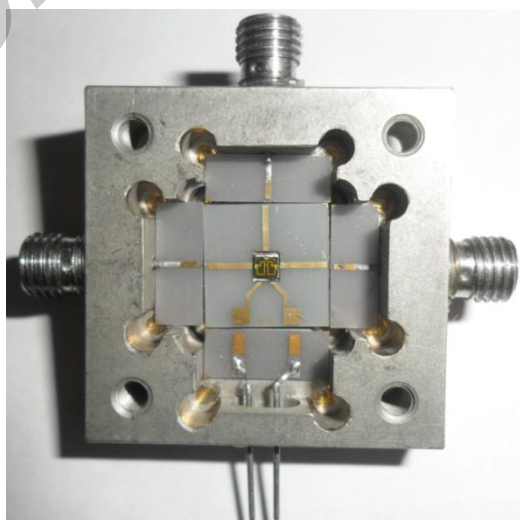


Рисунок 2 – Внешний вид преобразователя частоты СВЧ диапазона, выполненного в корпусе с коаксиальными СВЧ разъемами

Проанализированы наиболее важные характеристики ПЧ: такие как: диапазон рабочих частот, динамический диапазон, коэффициент шума, уровень сигнала гетеродина, КСВН входов и выходов преобразователя и определены основные требования к средствам их измерения.

Показано, что наиболее эффективными средствами измерения, позволяющими определять параметры ПЧ, являются векторные анализаторы цепей. Эти анализаторы представляют современные высокопроизводительные информационно-измерительные системы и позволяют провести необходимые измерения параметров устройств с гарантированной точностью в широких частотных диапазонах с соответствующей обработкой, представлением и хранением измеренной информации о параметрах и характеристиках испытываемых устройств.

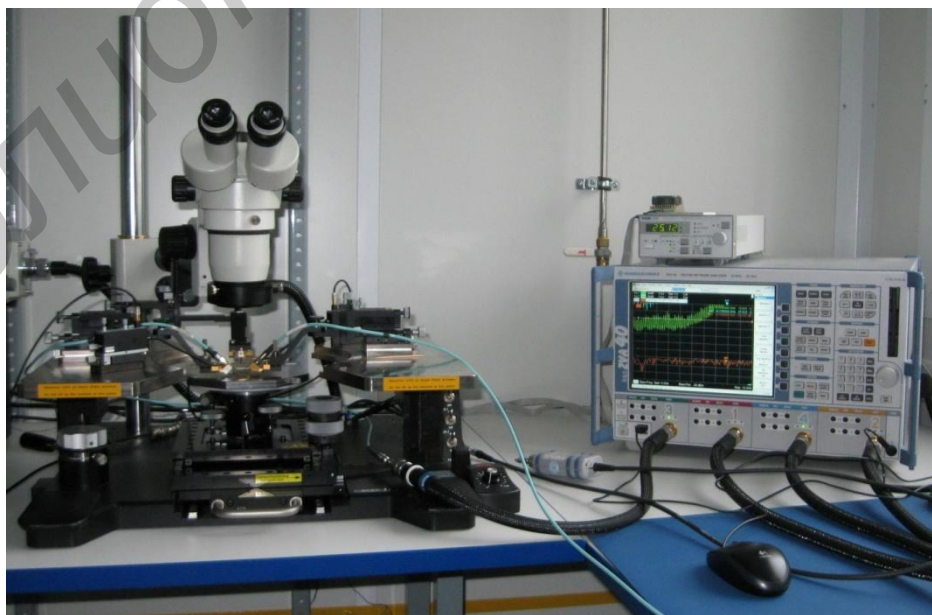
Во второй главе описываются разработанные измерительные стенды для определения параметров преобразователей частоты СВЧ и КВЧ диапазонов.

При выполнении ПЧ на подложке GaAs стенд для определения его параметров включает:

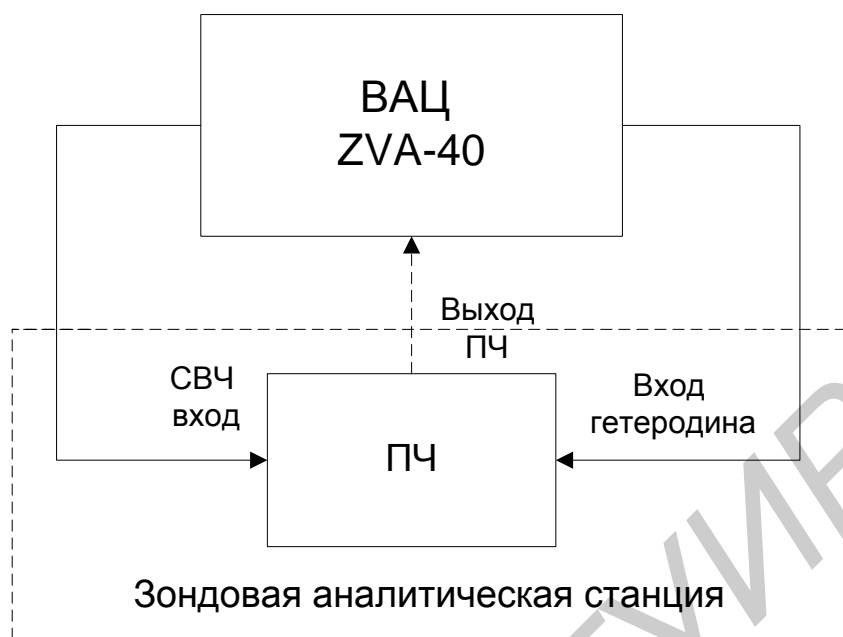
- зондовую аналитическую станцию *CASCADE MICROTTECH EP6 RF*;
- векторный анализатор электрических цепей фирмы *R&S ZVA-40*.

Структурная схема подключения ПЧ, выполненного на подложке GaAs, к ВАЦ ZVA-40 представлена на рисунке 3.

На рисунке 3 приведен внешний вид измерительного стенда для определения параметров ПЧ СВЧ диапазона, а на рисунке 4 схема подключения ПЧ, выполненного на подложке GaAs к векторному анализатору цепей ZVA-40



**Рисунок 3 – Внешний вид измерительного стенда для определения параметров ПЧ СВЧ диапазона**

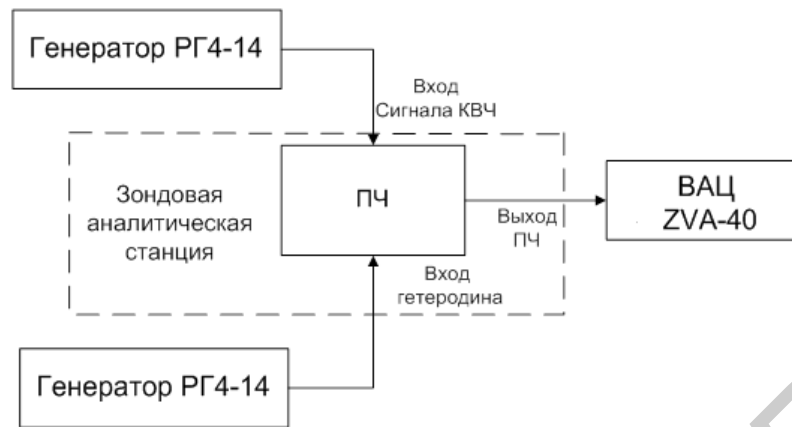


**Рисунок 4 – Схема подключения ПЧ, выполненного на подложке GaAs к векторному анализатору цепей ZVA-40**

Стенд для определения параметров преобразователя частоты КВЧ диапазона включает следующие средства измерений :

- высокочастотные генераторы РГ4-14 ;
- векторный анализатор цепей ZVA-40;
- зондовая аналитическая станция *CASCADE MICROTECH EP6 RF* в состав, которой входят :
  - зондовая станция с ручной регулировкой,
  - стереомикроскоп,
  - два высокоточных манипулятора,
  - комплект КВЧ кабелей Agilent 11500L,
  - КВЧ головки ACP115-A-GSG-150
  - СВЧ головка ACP40-A-GSG-150
  - Адаптеры Agilent W281C.

Структурная схема подключения ПЧ КВЧ диапазона для определения потерь преобразования представлена на рисунке 5.



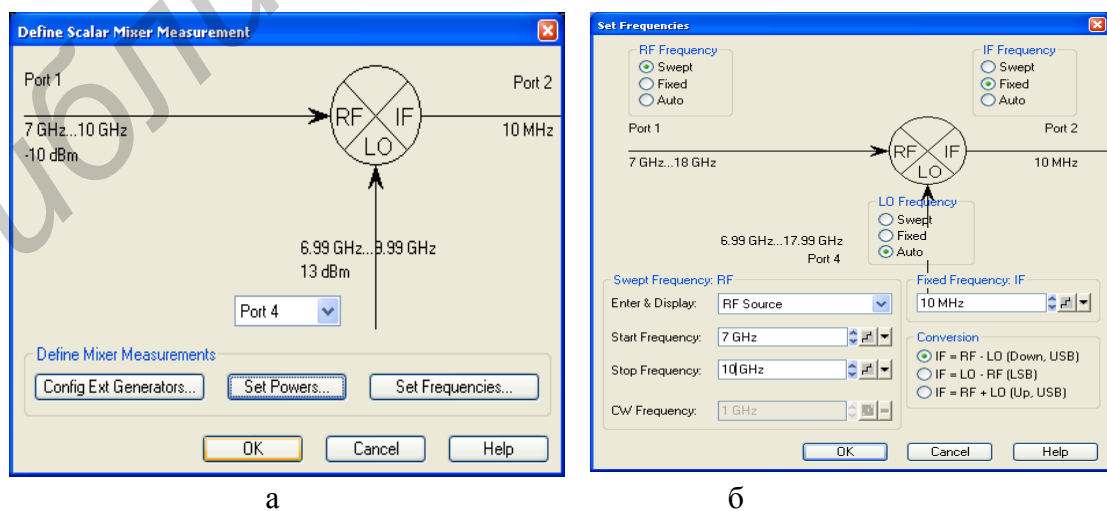
**Рисунок 5 – Схема подключения ПЧ КВЧ диапазона, выполненного на подложке GaAs**

В работе приведено описание используемых в измерительных стендах средств измерений, их технические характеристики, схемы и комплектующие.

В третьей главе приведена разработанная методика выполнения измерений КСВН и потерь преобразования преобразователя частоты СВЧ диапазона с использованием векторного анализатора цепей ZVA-40.

Комплексные значения S-параметров входа и выхода ПЧ и потерь преобразования измеряются методом прямых измерений в автоматическом режиме. Для проведения измерений необходимо задать частоту СВЧ сигнала и гетеродина, тип преобразования, уровни мощности входного сигнала и сигнала гетеродина.

На рисунке 6 представлены диалоговые окна настройки частоты и мощности входного сигнала и сигнала гетеродина.



**Рисунок 6 – Диалоговые окна настройки частоты и мощности входного сигнала и сигнала гетеродина**



Методика выполнения измерений устанавливает объём и последовательность операций, выполняемых при измерениях КСВН и потерь преобразования преобразователей частоты с помощью векторного анализатора цепей ZVA-40, а также включает оценку неопределённостей измерения КСВН и потерь преобразования преобразователей частоты.

Для оценки неопределённостей измерений указанных параметров были выбраны следующие модели измерений.

Модель измерения КСВН:

$$\text{КСВН} = \text{КСВН}_{\text{изм}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{и}} \quad (1)$$

где  $\text{КСВН}_{\text{изм}}$  - показания анализатора при измерении КСВН,

$\Delta_{\text{д}}$  - поправка дискретности анализатора

$\Delta_{\text{и}}$  - поправка обусловленная неточностью измерения КСВН с помощью анализатора.

Модель измерения потерь преобразования:

$$S_{21} = S_{21\text{изм}} + \Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{и}}, \quad (2)$$

где  $S_{21\text{изм}}$  - показания анализатора при измерении потерь преобразования,

$\Delta_{\text{д}}$  – поправка дискретности анализатора

$\Delta_{\text{и}}$  – поправка обусловленная неточностью измерения потерь преобразования с помощью анализатора.

Составлены бюджеты неопределённостей измерений КСВН и потерь преобразования и представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1- Бюджет неопределённости измерения КСВН

Величина x		$\Delta_{\text{д}}$	$\Delta_{\text{и}}$	КСВН
Единица измерения	отн.ед	отн.ед	отн.ед	отн.ед
Значение $x_i$		0	0	
Интервал $\pm r$	–			–
Тип неопределённости	A	B	B	–
Распределение вероятности	Нормальное	Равномерное	Равномерное	–
Стандартная неопределённость $U(x_i)$				–
Коэффициент чувствительности $c_i$				–
Неопределённость $U_i(y)$				

Таблица 2 - Бюджет неопределённости измерения потерь преобразования

Величина $x$	$S_{21\text{изм}}$	$\Delta_d$	$\Delta_{\text{и}}$	$S_{21}$
Единица измерения	дБ	дБ	дБ	дБ
Значение $x_i$	—	0	0	—
Интервал $\pm r$	—			—
Тип неопределённости	A	B	B	—
Распределение вероятности	Нормальное	Равномерное	Равномерное	—
Стандартная неопределённость $U(x_i)$	—			—
Коэффициент чувствительности $c_i$				—
Неопределённость $U_i(y)$	$U(S_{21})$			$(S_{21})$

Приведены результаты экспериментальных исследований ПЧ СВЧ диапазона полученные с использованием разработанных измерительных стендов и методик выполнения измерений.

В четвертой главе описывается разработанная методика выполнения измерений потерь преобразования преобразователя частоты КВЧ диапазона, с использованием СВЧ генераторов и ВАЦ.

Для оценки неопределённостей измерений потерь преобразования была выбрана следующая модель измерений:

$$L_p = \text{---} + \Delta_m, \quad (4.2)$$

где  $L_{p\text{изм}}$  - показания анализатора при измерении выходной мощности,  
 $\Delta_m$  - поправка измерений мощности.

Данная методика устанавливает объём и последовательность операций, выполняемых при измерении потерь преобразования преобразователя частоты КВЧ диапазона, а также включает оценку неопределённости этих измерений.

Для оценки неопределённости измерения потерь преобразования был составлен бюджет неопределённости, представленный в таблице 3.

Таблица 3 – Бюджет неопределённости при проведении измерения потерь преобразования

Величина $x$	изм		$\Delta_m$
Единица измерения	дБ	дБ	дБ
Значение оценки $x_i$	11,64	0,035	–
Интервал $\pm r$	–	–	0,1
Тип неопределённости	A	A	B
Распределение вероятности	Нормальное	Нормальное	Равномерное
Стандартная неопределённость $U(x_i)$	0,023	0,00066	0,071
Коэффициент чувствительности $c_i$	0,81	–	1
Неопределённость $U_i(y)$	0,19	0,00066	0,071

Приводятся результаты экспериментальных исследований опытных образцов ПЧ КВЧ диапазона полученные с использованием данной методики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы «Определение параметров и характеристик ПЧ СВЧ и КВЧ диапазонов» были решены научно-технические задачи, обеспечивающие создание измерительного стенда и методик выполнения измерений параметров ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона. Приведены и проанализированы принципы построения и схемы преобразователей частоты. Выявлено, что наиболее перспективным для использования в СВЧ и КВЧ диапазонах являются ПЧ на основе двойного кольцевого балансного смесителя на согласованных интегральных арсенид-галлиевых диодах Шоттки. Такие ПЧ могут быть выполнены как на подложке GaAs, так и в корпусе с коаксиальными СВЧ разъемами.

Основными характеристиками ПЧ являются КСВН входов и выходов и потери преобразования. По результатам анализа методов и средств измерения параметров ПЧ СВЧ и КВЧ диапазона были сформулированы требования к измерительному оборудованию и разработаны измерительные стенды для определения параметров и характеристик ПЧ.

Разработаны методики выполнения измерений параметров ПЧ СВЧ и КВЧ диапазонов с использованием этих измерительных стендов.

Предложены и обоснованы алгоритмы обработки результатов измерений и оценки неопределенности КСВН и потерь преобразования для преобразователей частоты СВЧ диапазона.

Результаты работы были апробированы на Международной НТК, приуроченной к 50-летию МРТИ – БГУИР (Минск 18-19 марта 2014 г.) и опубликованы в материалах этой конференции.

Разработанные в рамках диссертационной работы измерительные стенды и методики выполнения измерений внедрены и используются в ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов».

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1 - А. Белошицкий А.П. Измерение параметров преобразователей частоты сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн / А.П.Белошицкий, М.А. Косяк, А.А. Павлючик// // Материалы Международной НТК, приуроч. К 50-летию МРТИ – БГУИР в 2-х ч.Ч. 1 – Минск, 2014 – С.134 – 135.

Библиотека БГУИР