



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

Кафедра теоретических основ радиотехники

А. А. Данилин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“Измерения на СВЧ”

(электронный вариант)

Скалярный измеритель АЧХ СВЧ устройств

Санкт-Петербург

2025 г.

2. СКАЛЯРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ АЧХ СВЧ УСТРОЙСТВ

В лабораторной работе студенты знакомятся с компьютерным измерительным комплексом для измерения АЧХ СВЧ устройств. Он включает в себя синтезатор СВЧ-сигнала и измеритель мощности, соединённые с компьютером через интерфейс USB. Комплекс работает под управлением программы, реализующей различные алгоритмы измерения скалярных параметров матрицы рассеяния СВЧ-устройств.

Рассмотрим принцип действия основных компонентов лабораторной установки – синтезатора частоты и измерителя мощности СВЧ-диапазона.

2.1. Принцип действия синтезаторов СВЧ-диапазона

Синтезаторами частоты называют генераторы гармонических напряжений с дискретной перестройкой частоты. Они обеспечивают хорошую форму сигнала, его высокую спектральную «чистоту», точность установки и возможность программной перестройки частоты, стабильность, равную стабильности частоты опорного кварцевого генератора. Синтезаторы позволяют получать сетку частот выходного сигнала с дискретностью до сотых долей герц. По точности установки и стабильности частоты синтезаторы превосходят обычные измерительные генераторы с плавной перестройкой частоты. Они легко сопрягаются с автоматизированными информационно-измерительными системами.

Различают несколько основных способов построения синтезаторов частоты:

- Синтезаторы с прямым аналоговым синтезом частоты (Direct Analog Synthesizers):
- Синтезаторы с прямым цифровым синтезом (DDS - Direct Digital Synthesizers).
- Синтезаторы с косвенным синтезом частоты (Indirect Synthesizers) или синтезаторы с ФАПЧ (PLL - Phase Locked Loops);
- Синтезаторы гибридного типа PLL/DDS, совмещающие два последних метода синтеза частоты.

Приборы с *прямым аналоговым синтезом* частоты основаны на изменении частоты опорного колебания с помощью операций деления, умножения, сложения и вычитания частот его гармоник. Сигнал кварцевого генератора с помощью умножителей и делителей частоты преобразуется в набор гармонических составляющих, формирующих сетку опорных частот. С помощью коммутатора выбирают два сигнала, которые с помощью смесителя преобра-

зуются в гармонический сигнал с суммарной (или разностной) частотой, равной выходной частоте синтезатора. Очистку результирующего сигнала от побочных колебаний проводят с помощью узкополосных фильтров.

Достоинством таких генераторов является высокая скорость перестройки частоты и низкий фазовый шум, недостатком – значительный уровень побочных гармоник, ограниченный частотный диапазон, сложность схемы (особенно, если требуется малый шаг перестройки). В настоящее время такие приборы в измерительной практике применяют в основном в качестве источника НЧ и ВЧ сигналов для синтезаторов с косвенным принципом формирования частоты (синтезаторы с ФАПЧ).

Синтезаторы с *прямым цифровым синтезом* (DDS) используют для формирования сигнала быстродействующий цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). При этом форма синтезируемого сигнала может быть произвольной. На практике такие синтезаторы, помимо синусоидального сигнала с заданной фазой, могут генерировать прямоугольный и треугольный сигналы, амплитудно-модулированный и частотно-модулированный сигналы с периодическим законом изменения «модулирующего сигнала». Несомненное достоинство такого метода формирования сигналов – высокая стабильность и низкий фазовый шум. Эти параметры определяются только характеристиками задающего генератора. В отличие от системы ФАПЧ синтезаторы с ПЦС не добавляют новых частотных компонентов вблизи рабочей частоты, но могут создавать довольно большие побочные гармоники. Недостатком является сложность реализации ЦАП, работающего на высоких частотах (1 ГГц и выше), невозможность формирования частоты выше половины частоты дискретизации, а также значительная потребляемая мощность.

Синтезаторы, основанные на применении ФАПЧ (PLL – Phase Locked Loops) более компактны. Простейший однопетлевой синтезатор ФАПЧ включает в себя генератор, управляемый напряжением (ГУН или VCO – Voltage Controlled Oscillator), и программируемый делитель частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД) (рис. 2.1).

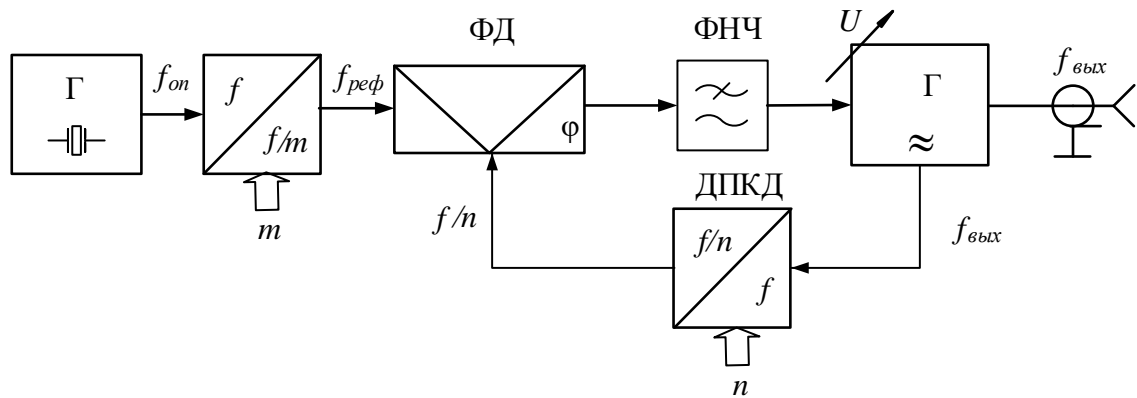


Рис. 2.1. Структурная схема цифрового синтезатора с ФАПЧ

На фазовый детектор подают два колебания: первое – со стабильной частотой ($f_{оп}$), второе – с выходной частотой, уменьшенной в n раз ($f_{вых}/n$). Напряжение с выхода фазового детектора, пропорциональное разности фаз колебаний, воздействует на управляемый генератор и подстраивает его до обеспечения равенства частот $f_{вых}/n = f_{оп}$. Изменяя коэффициент деления n , получают требуемую сетку частот с шагом, равным $f_{оп}$.

Главным преимуществом схем синтезаторов на основе ФАПЧ являются простота конструкции и более чистый спектр выходного сигнала. Основной недостаток – большое время перестройки и значительно более высокий уровень фазового шума, чем у схем с прямым аналоговым синтезом.

Качество выходного сигнала и его параметры (мощность, спектральная «чистота») зависят в основном от генератора, управляемого по частоте напряжением. ГУН представляет собой автогенератор, содержащий параметрическую частотозадающую цепь (контур или резонатор), рабочая частота которого меняется внешним управляющим напряжением (tuning voltage). При относительно небольшой девиации частоты электрическая перестройка резонатора генератора легко осуществляется *варикапом* – полупроводниковым *варакторным диодом*, барьерная емкость которого зависит от запирающего напряжения смещения. При большом диапазоне перестройки по частоте электрическую перестройку ГУН реализуют с помощью ферродиеlectricких резонаторов на железо-иттриевом гранате (ЖИГ-сфера, YIG resonators). Управление частотой генератора осуществляют за счёт изменения собственной частоты резонатора, выполненного в виде шарика (сферы). Сферу помещают в зазор электромагнита. Ее резонансная частота линейно зависит от напряжённости внешнего подмагничивающего поля, создаваемого током в катушках электромагнита. Частота резонанса такого элемента может меняться в широких пределах (до 10 раз). Добротность ЖИГ-резонаторов довольно высока (до нескольких тысяч), что определяет низкий уровень фазовых шумов генератора. ГУН с ЖИГ-резонаторами имеют линейные, хорошо воспроизводимые

перестроечные характеристики, что упрощает предварительную установку частоты в многокольцевых синтезаторах.

Синтезатор SSG-4000LH, используемый в лабораторной работе, представляет собой компактный источник СВЧ-сигнала с малым уровнем побочных составляющих. Синтезатор частоты реализован в виде модуля с внешним блоком питания. На передней панели установлены выходной разъем N-типа и кнопка включения питания. На задней панели размещены разъёмы входа и выхода сигнала опорной частоты, разъёмы входа/выхода импульсной модуляции и USB-разъем.

Управление синтезатором осуществляется по шине USB программой Mini-Circuits Synthesized Signal Generator. Программным способом можно установить частоту и уровень выходного сигнала, включить режимы качания частоты и импульсной модуляции выходного сигнала. Для измерения частотных характеристик с применением датчика мощности используют другую программу (Mini-Circuits Smart RF Power Meter), в которой управление генератором совмещено с измерением мощности.

Основные параметры синтезатора частоты Mini-Circuits SSG-4000LH:

- диапазон частот перестройки 250...4000 МГц, минимальный дискрет перестройки (разрешение по частоте) 5 кГц;
- точность установки частоты не хуже $\pm 10^{-6}$;
- КСВН выхода – от 1,5 до 2,3;
- пределы установки выходного уровня мощности на нагрузке 50 Ом (–60...+10 дБм) с дискретом 0,25 дБм, точность установки $\pm 0,25$ дБм;
- уровень побочных составляющих при $P = 0$ дБм не хуже –74 дБн (в децибелах относительно несущей);
- уровень фазового шума при отстройке 1 кГц в пределах –80...–95 дБн/Гц;
- время перестройки частоты не менее 15 мс;
- параметры импульсной модуляции: форма сигнала – прямоугольная, длительность фронта выходного радиоимпульса не менее 30 нс, минимальная длительность импульса порядка 1 мкс.

2.2. Принципы измерения мощности на СВЧ

Мощность сигнала – это произведение мгновенных значений напряжения и тока (мгновенная мощность). В радиотехнике чаще говорят о мощности как квадрате напряжения сигнала на нагрузке 1 Ом:

$$P(t) = u(t)i(t) = \frac{u^2(t)}{1 \text{ Ом}}.$$

Наряду с абсолютными единицами (ватт, милливатт и др.) широко используются относительные логарифмические единицы мощности [дБ]

$$P = 10 \lg \frac{P}{P_0},$$

где P_0 – мощность, принимаемая за исходный уровень (обычно 1 мВт). Соответственно, логарифмическая единица обозначается дБ мВт или проще - дБм [dBm].

Чаще всего надо знать среднюю мощность сигнала за заранее выбранный интервал времени T , равный или кратный целому числу периодов:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt.$$

Для импульсных сигналов важным параметром является *импульсная (пиковая) мощность* ($P_{и}$). Она равна мгновенной мощности, усреднённой на интервал за длительность импульса. Отношение пиковой и средней мощности называют *пик-фактором* сигнала.

Прибор, измеряющий мощность, называют *ваттметром*. Различают ваттметры *поглощаемой* и *проходящей* мощности. Измерительный тракт *ваттметра поглощаемой мощности* содержит приёмный измерительный преобразователь (*датчик мощности*) с присоединительным разъёмом (фланцем) и измерительную НЧ-схему, которая позволяет оценить результат преобразования СВЧ-энергии.

Рассмотрим основные параметры ваттметров СВЧ:

1. *Рабочий диапазон частот* – это полоса частот, в которой погрешность ваттметра не превышает паспортную.

2. *Пределы измерения мощности*. Современные ваттметры обеспечивают диапазон измерений от долей микроватт до десятков ватт и более. Различают ваттметры малой (до 10 мВт), средней (10 мВт...10 Вт) и большой (более 10 Вт) мощности.

3. *Динамический диапазон ваттметра* – это соотношение мощностей максимального и минимального сигналов, которые могут быть измерены одновременно без искажения. Динамический диапазон определяется нелинейностью измерительного преобразователя и составляет в современных приборах 40...60 дБ.

4. *Основная погрешность и класс точности ваттметра*.

5. *КСВН входа ваттметра* определяет систематическую погрешность рассогласования приёмного преобразователя, которая зависит также от сте-

пени согласования источника сигнала (генератора). В зависимости от класса точности прибора этот параметр находится в пределах 1,1–1,7.

В ваттметрах СВЧ наиболее часто используют терморезисторные, термоэлектрические и диодные датчики поглощаемой мощности.

Терморезисторные преобразователи позволяют определить мощность СВЧ-сигнала по изменению сопротивления термочувствительного элемента. Терморезисторы делят на две группы – болометры и термисторы. *Болометры* представляют собой тонкую проволочку (нить) или плёнку на диэлектрической подложке. Их изготавливают из платины, палладия и других металлов, имеющих сильную зависимость сопротивления R_t от рассеиваемой в них мощности. Болометры имеют положительный температурный коэффициент сопротивления и зависимость сопротивления от рассеиваемой мощности, близкую к линейной. Чувствительность болометра $\frac{dR_t}{dP}$ лежит обычно в пределах 1...12 Ом/мВт. Болометры имеют высокую повторяемость результатов преобразования, незначительную зависимость параметров от температуры окружающей среды и малый разброс от экземпляра к экземпляру. Малая теплоемкость и тепловая инерция позволяют в ряде случаев использовать их для измерения импульсной мощности. Недостатками болометров являются низкая перегрузочная способность и невысокая чувствительность.

Термисторы – нелинейные полупроводниковые резисторы – изготавливают в виде бусинок или цилиндров малого размера. Термисторы имеют экспоненциальную зависимость сопротивления от рассеиваемой мощности:

$$R_t = R_0 \exp\left(-\beta \frac{t - t_0}{t_0 t}\right),$$

где t_0 – температура окружающей среды; t – температура термистора, нагретого измеряемым сигналом; β – постоянный коэффициент. Они имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления и более высокую чувствительность (до 100 Ом/мВт и выше) по сравнению с болометрами.

Термисторы чаще применяются для измерения средней мощности, поскольку более инерционны, чем болометры. Они устойчивы по отношению к перегрузкам, однако им присуща нестабильность параметров во времени и сильная зависимость от температуры окружающей среды. Последнее обстоятельство требует введения в состав ваттметра термокомпенсационных схем.

Термоэлектрические преобразователи используют преобразование СВЧ-энергии в тепло, которое нагревает спай термопары. Получаемая термоЭДС измеряется чувствительным вольтметром. В СВЧ диапазоне используют

плёночные термопары, которые представляют собой две полоски из разных металлов, напильных на диэлектрическую подложку. В месте контакта располагают резистивный элемент, нагрев которого СВЧ-сигналом приводит к появлению термоЭДС на концах термопары. ЭДС пропорциональна рассеянной мощности и обычно мала (доли милливольт). Для ее измерения используют высокочувствительные измерительные микровольтметры постоянного тока (аналоговые и цифровые).

Термоэлектрический метод имеет ряд преимуществ по сравнению с терморезисторным. ТермоЭДС слабо зависит от температуры окружающей среды. Не требуется сложных схем омметров, балансировки моста и пр. Термоэлектрические преобразователи имеют динамический диапазон до 50 дБ, чувствительность порядка 1 мВ/мВт, малое время установления показаний и практически не требуют подготовки к работе. Термопары пригодны для измерения средней и импульсной мощности. К недостаткам термоэлектрического метода относят нелинейность зависимости выходного напряжения от уровня СВЧ-сигнала при больших уровнях мощности, неравномерность частотной характеристики и малую чувствительность термоэлектрических преобразователей.

Диодные преобразователи используют полупроводниковые диоды с квадратичной вольтамперной характеристикой (ВАХ) для трансформации СВЧ-сигнала в постоянное напряжение. В отличие от обычных детекторных головок такие датчики обеспечивают калиброванный коэффициент преобразования. В диодных датчиках используют диоды Шоттки с переходом металл-полупроводник. Они обладают достаточно стабильными характеристиками ВАХ и высокой механической прочностью, хорошей повторяемостью параметров от диода к диоду, пониженным падением напряжения при прямом включении. Типичная характеристика диодного преобразователя представлена на рис. 2.2. Характеристика ограничена снизу уровнем внутренних шумов диода (порядка -70 дБм) и квадратична до уровня $(-20$ дБм), далее начинается переходный участок, а с уровня 0 дБм характеристика приближается к линейной (рис. 2.2, б).

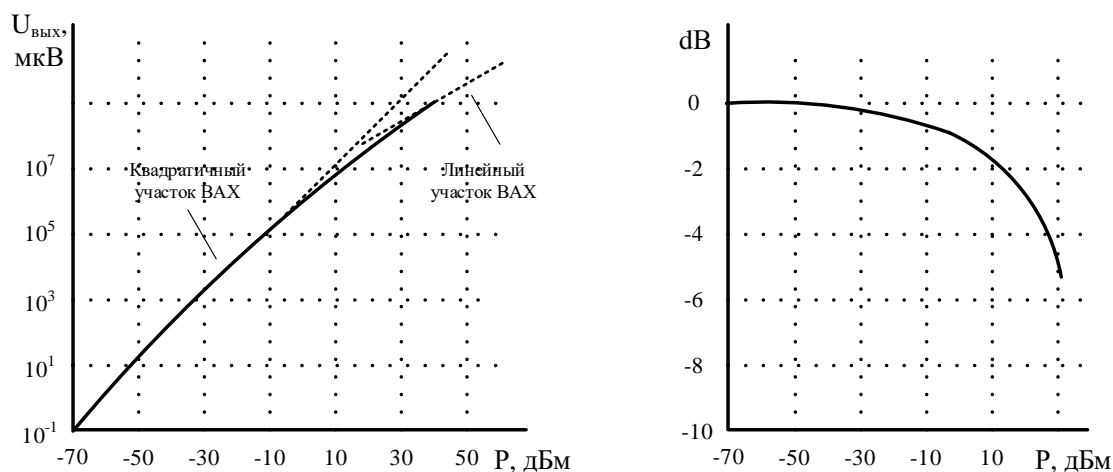


Рис. 2.2. Детекторная характеристика диодного датчика мощности в логарифмической системе координат: *а* – зависимость выходного напряжения от мощности; *б* – отклонение детекторной характеристики от квадратичной

Для расширения динамического диапазона в современных диодных датчиках используют программную корректировку детекторной характеристики. Поправочные коэффициенты, определенные при калибровке преобразователя в переходном участке $-20 \dots 0$ дБм и на линейном участке (более 0 дБм), записываются в память датчика. При измерениях эти данные используются для компенсации неквадратичности характеристики конкретного диода.

Диодные преобразователи обладают высокой чувствительностью и используются в диапазоне мощностей от -70 до $+20$ дБм. Важной особенностью является малая инерционность диода, что даёт возможность применять такие преобразователи для измерения импульсной и пиковой мощности. Импульсные диодные ваттметры позволяют исследовать сигналы со сложными законами широкополосной модуляции (рабочая полоса по видеосигналу модуляции до 5 МГц и более). Такие приборы позволяют вывести на экран измерительного блока форму огибающей мгновенной мощности исследуемого импульса, выделить интересующую часть импульса для измерения пиковой мощности (стробирование сигнала), определить пик-фактор сигнала.

В лабораторной работе используется диодный USB-датчик мощности СВЧ Mini-Circuits PWR-4GHS. Датчик полностью управляется программой Mini-Circuits Smart RF Power Meter. Программа предусматривает автоматическое опознавание датчика и получение результата, выбор единицы измерения, индикацию температуры датчика. Предусмотрены режимы относительных измерений и усреднения результатов (averaging). Программа содержит большое количество приложений (Measurement Applications), которые позволяют одновременно с измерением мощности управлять частотой и выходной мощностью синтезатора.

Основные параметры датчика мощности Mini-Circuits PWR-4GHS:

- динамический диапазон $-30 \dots +20$ дБ, разрешение 0,01 дБ;
- точность измерения не хуже ± 0.05 дБм;
- КСВН входа – от 1,1 до 1,2 в диапазоне рабочих частот;
- время измерения около 30 мс в быстром режиме (Faster) и 100 мс (режим малых шумов Low Noise). Для уменьшения шумов предусмотрен режим усреднения данных (от 2 до 999 раз).

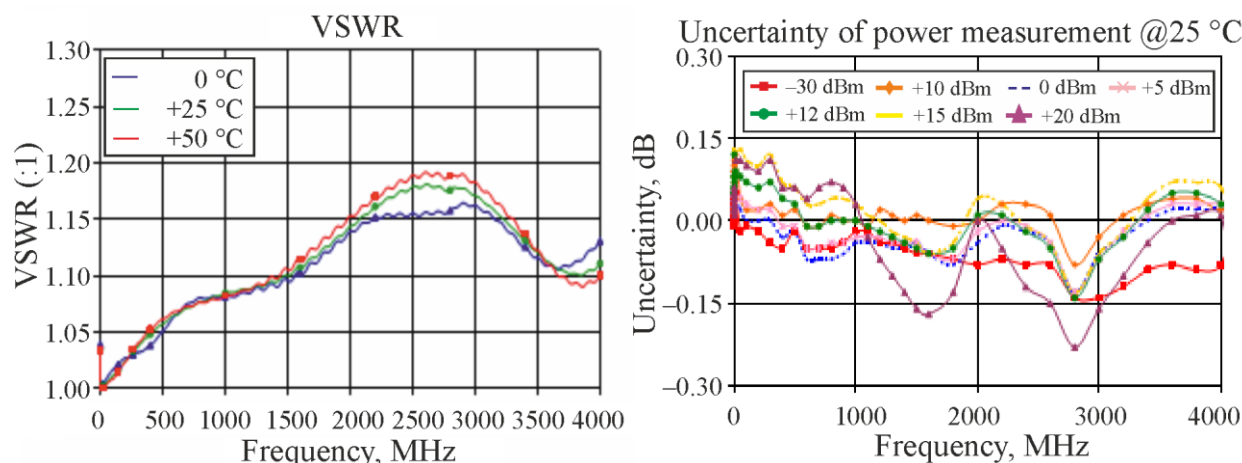


Рис. 2.3. Частотные зависимости параметров датчика: а – входного КСВН; б – результатов измерения (собственная АЧХ)

Программное обеспечение (ПО) датчика работает в среде 32/64-битных операционных систем Windows и Linux. Предусмотрены режимы автокалибровки датчика по частоте и температурной компенсации в диапазоне $0 \dots 50$ °C. Максимальное напряжение на входе 4 В, максимальный уровень мощности 25 дБм. Результаты измерения (информация о частоте, данные о калибровке, некалиброванном измерении исследуемой цепи и о скорректированной измеряемой величине) выводятся на экран в виде таблицы, графика и могут быть скопированы в файл с расширением .csv.

2.3. Описание лабораторной установки

В скалярном измерителе АЧХ применены следующие компоненты и приборы:

- генератор сигналов (синтезатор) Mini-Circuits SSG-4000LH (рабочий диапазон частот 250...4000 МГц, выходная мощность $-60 \dots +10$ дБм);
- измеритель мощности СВЧ-сигнала Mini-Circuits PWR-4GHS в комплекте с ПО для исследования вносимых потерь 2-портовых устройств;
- направленный ответвитель Mini-Circuits ZX30-20-20BD+ (0,5...2 ГГц, переходное ослабление 20 дБ), используемый для измерения обратных потерь. На рисунке 2.4 приведена нумерация портов ответвителя (а) и условное графическое обозначение (в), где верхнее число означает рабочее затухание S_{12} , нижнее – переходное ослабление S_{13} . Направление ответвления допуска-

ется указывать стрелкой. При этом порт 1 – вход, 2 – выход, 3 – дополнительный порт, 4 – развязанный порт. К последнему всегда должна быть подключена согласованная нагрузка;

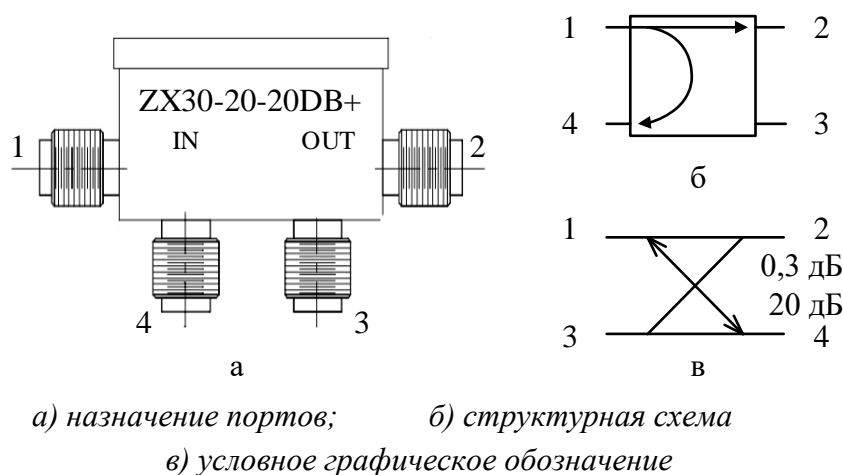


Рис. 2.4. Направленный ответвитель ZX30-20-20BD+.

- согласованные нагрузки Mini-Circuits ANNE-50+ (2 шт);
- полосно-пропускающий фильтр Mini-Circuits VBFZ-1400+ (паспортная полоса пропускания 1350...1450 МГц);
- СВЧ циркулятор из комплекта AT-RF3030-3 (паспортный частотный диапазон 1.8 ...2.2 ГГц, потери в прямом направлении не хуже 1 дБ, ослабление в обратном направлении не хуже 20 дБ);
- программное обеспечение компании Mini-Circuits для управления синтезатором и USB-датчиком мощности.

Для измерения параметров рассеяния с использованием диодного USB-датчика мощности прибегают к методу разделения волн. Реализация метода в полном варианте предполагает использование трех направленных ответвителей с датчиками мощности, позволяющих измерить мощности падающей, отражённой и проходящей волн (рис. 2.5). Далее программным путём рассчитываются отношение амплитуд волн для получения модулей элементов матрицы рассеяния S_{21} и S_{11} . Для получения двух других элементов необходимо перекоммутировать вход и выход исследуемого устройства и повторить измерения.

В лабораторной работе использован упрощённый метод измерения с использованием всего одного датчика мощности. Амплитуду падающей волны измеряют при предварительной калибровке измерителя в отсутствие исследуемого устройства. Амплитуду проходящей волны измеряют при прямом подключении датчика на выход исследуемого устройства. При этом несколько возрастают погрешности за счёт неидеального согласования датчика. Та-

ким образом, направленный ответитель используют только для измерения амплитуды отражённой волны.

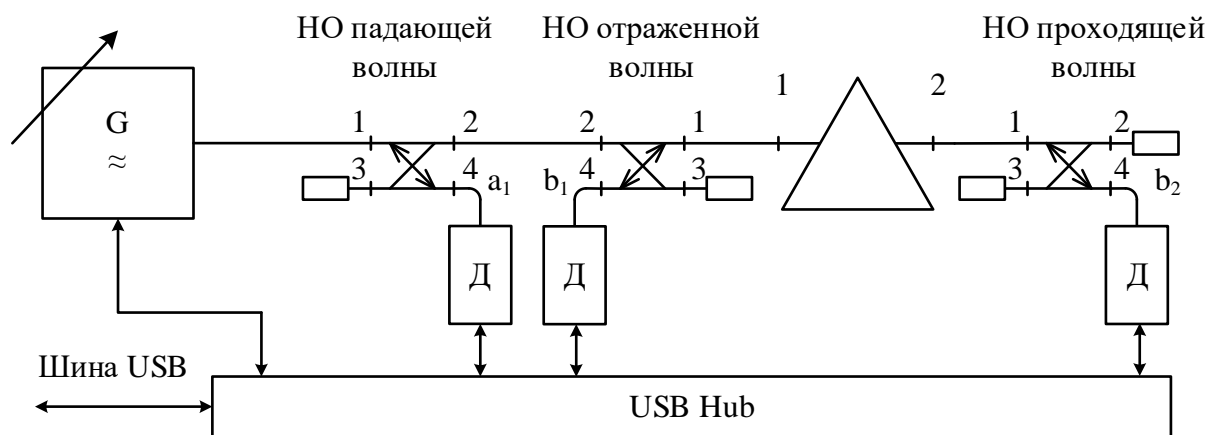


Рис. 2.5. Полная схема скалярного измерителя параметров рассеяния с использованием диодных USB-датчиков мощности.

2.4. Задание и указания к выполнению работы

2.4.1. Измерение модуля коэффициента передачи полосно-пропускающего фильтра

1. Включите питание синтезатора частоты SSG-4000LH. На компьютере запустите программу управления синтезатором и датчиком мощности **PowerMeter**. В открывшемся окне выберите режим работы датчика и генератора **USB**. Отображаемое главное окно содержит информацию об установленном уровне сигнала и частоте, размерности выходной мощности [dBm], выбранном режиме работы генератора (faster или low noise), марку (Sensor Model) и серийный номер датчика мощности PWR-SEN-4GHS.

2. Перейдите в режим выбора программы измерения (**Measurement Applications**). Для измерения АЧХ коэффициента передачи (S_{21}) используйте п. 6 (**Insertion Loss – 2 Port Device**). Далее задайте произвольное имя проекта **Project Name** (например, «S21» и данные об исследуемом устройстве – наименование фильтра – «VBFZ-1400-S+»). Нажмите **Next**.

3. Следующее окно программы позволяет задать частотную сетку измерений. Укажите начальную частоту (**Freq. Start**) 500 МГц, конечную частоту (**Freq. Stop**) 2500 МГц, число частотных точек (**No. Of Points**) в пределах 101–301 точек, уровень сигнала синтезатора (**Source Start** и **Source Stop**), 0 dBm. Постройте таблицу частотных точек (клавиша **BUILD**). Нажмите **Next**. Появится окно измерений.

4. При желании сохраните проект в файл в папку D:\Students или на USB флэш-накопителе. Для этого нажмите кнопку **Save**.

5. Для измерения коэффициента передачи на первом шаге требуется откалибровать источник сигнала, то есть измерить зависимость уровня сигнала генератора от частоты. Выберите этап измерений нажатием кнопки **Step 1: Power Reference In.**

6. Соберите схему калибровки «на проход» согласно рис. 2.6, но без исследуемого фильтра. Измеритель мощности при этом должен быть подключён напрямую к выходу направленного ответвителя, согласованного по дополнительным плечам при помощи двух нагрузок Mini-Circuits ANNE-50+. Для измерения уровня сигнала синтезатора в каждой частотной точке нажмите кнопку **RUN**.

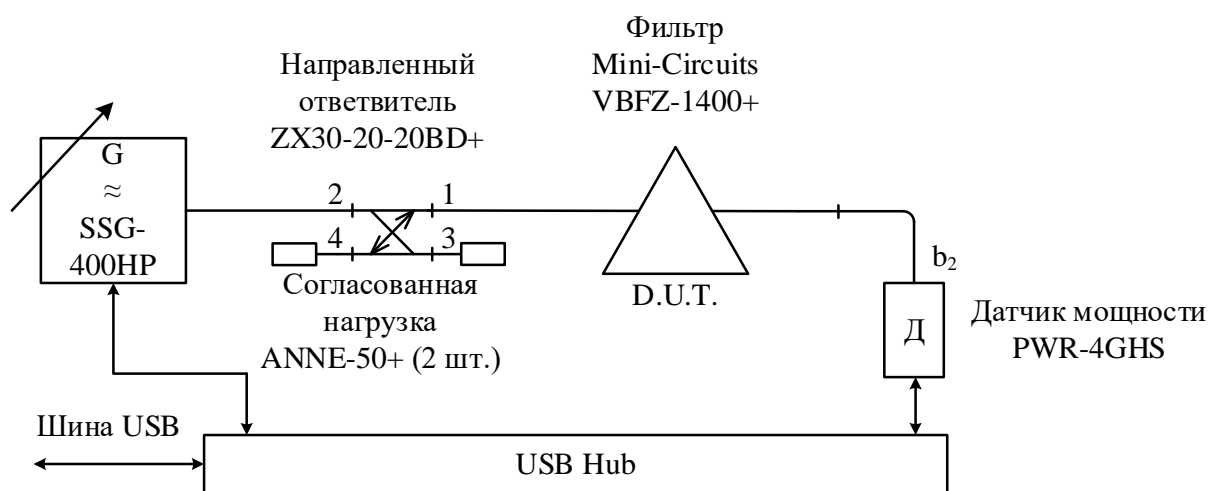


Рис. 2.6. Структурная схема лабораторной установки в режиме измерения коэффициента передачи

7. После калибровки установка готова к измерению АЧХ фильтра (Device Under Test – D.U.T) в выбранной сетке частот. Установите исследуемый фильтр между датчиком и направленным ответвителем (рис. 2.6). Выберите второй этап измерений нажатием кнопки **Step 2. D.U.T. Measurement.** По умолчанию в программе предусмотрен режим непрерывных измерений на установленной сетке частот. Отключите его, сняв флажок **Continious Mode**. Для отображения графика АЧХ на экране установите флажок **Display On-Line Graph**. Запустите измерение АЧХ кнопкой **RUN**. Результаты измерения АЧХ выведутся в таблицу и в окно графика.

8. После завершения измерений включите автоматическое масштабирование графика (**Auto Scale**). На графике с помощью маркера (яркая точка) найдите максимальное значение (режим **Peak Search**) и запишите данные максимума модуля АЧХ (Insertion loss) в протокол. Затем определите полосу пропускания, перемещая маркер в точки (–3 дБ) в обе стороны относительно максимума. Определите также полосу фильтра по уровню (–20 дБ). Рассчитайте коэффициент прямоугольности АЧХ как отношение полос пропускания по уровням –3 и –20 дБ.

9. Полученные результаты измерений в таблице экспортируйте в файл с расширением **.CSV**, в совместимом с Excel формате. Для этого нажмите кнопку **EXCEL** и задайте имя файла в поле **Enter *.CSV File Name**. Папку для сохранения файла можно задать при помощи кнопки **Choose path: Brows**. Сохранение файла ведётся в текстовом формате с разделителями – запятыми (расширение **.CSV**). Сохраните также скриншот построенного на экране графика в файл. Для этого используйте копирование активного окна графика в буфер обмена **Alt - PrntScr** и вывод скриншота в файл графическим редактором Paint.

10. Обработку результатов измерения выполняют в электронной таблице Excel. Если при загрузке файла в формате **.CSV** в таблицу данные отображаются некорректно (все числа в одной ячейке), то необходимо использовать режим загрузки данных из текстового файла, указав разделитель данных – запятую (**comma**). В этом случае данные из таблицы будут корректно распределены по ячейкам.

11. После экспорта данных постройте АЧХ фильтра в формате графиков Excel и выведите его на печать вместе с таблицей результатов измерений и скриншотом графика в интерфейсе программы.

2.4.2. Измерение коэффициентов передачи невзаимного микрополоскового циркулятора

1. Для измерения параметров циркулятора используйте схему рис. 2.6. и методику измерения коэффициента передачи, описанную в п. 2.4.1. Задайте начальную частоту (**Freq. Start**) 1500 МГц, конечную частоту (**Freq. Stop**) 2500 МГц, нечётное число частотных точек (**No. Of Points**) в пределах 101–301 точек, уровень сигнала синтезатора (**Source Start** и **Source Stop**) 0 dBm. Постройте таблицу частотных точек (клавиша **BUILD**). Нажмите **Next**. Появится окно измерений. Повторите калибровку источника сигнала «на проход» в новом частотном диапазоне.

2. Проведите измерение модуля коэффициента передачи S_{12} циркулятора в обратном направлении $P2 \Rightarrow P1$. Для этого подключите циркулятор между направленным ответвителем и датчиком мощности, используя переходник М-М. Третий порт циркулятора $P3$ должен быть подключён на согласованную нагрузку. В этом режиме циркулятор работает как вентиль, ослабляя проходящую волну. Включите второй этап измерений нажатием кнопки **Step 2. D.U.T. Measurement**. Снимите флажок **Continious Mode** и установите флажок **Display On-Line Graph**. Запустите измерение АЧХ кнопкой **RUN**.

3. По окончании измерения включите автоматическое масштабирование графика (**Auto Scale**). На графике найдите два минимальных значения коэффициента передачи (рис. 2.7). Найдите, также, максимум АЧХ в пределах между двумя минимумами. Определите рабочий диапазон циркулятора Δf по этому уровню. Результаты (частоты f и коэффициенты передачи S_{12}) занесите в протокол (таблица 1). Полученные численные данные измерений экспортируйте в файл с расширением .CSV. Для этого нажмите кнопку **EXCEL** и задайте имя файла в поле **Enter *.CSV File Name**. Поместите данные графика АЧХ циркулятора в обратном направлении в память программы (**Data –>Memory**).

Обратите внимание на то, что величина ослабления A (Insertion loss) в дБ является величиной, обратной коэффициенту передачи S_{21} в дБ:

$$A[\text{дБ}] = -S_{21}[\text{дБ}].$$

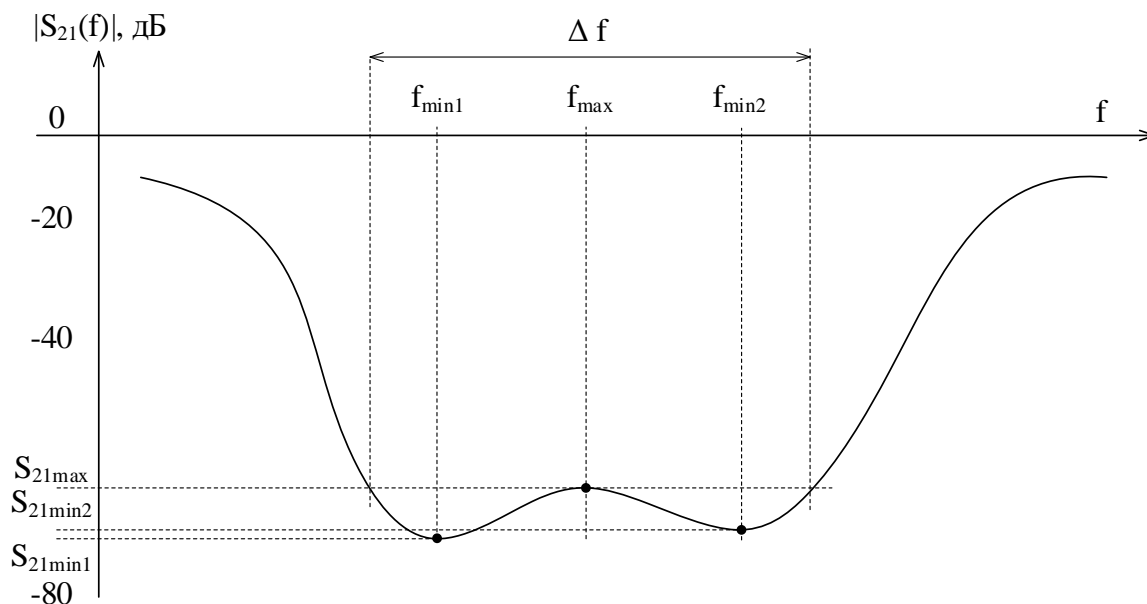


Рис. 2.7. Пример нахождения минимумов АЧХ циркулятора в обратном включении.

Таблица 1. Результаты измерений параметров циркулятора.

Обратное включение P2=>P1		АЧХ	
$f_{\min1}$, МГц		$ S_{12\min1} $, дБ	
$f_{\min2}$, МГц		$ S_{12\min2} $, дБ	
f_{\max} , МГц		$ S_{12\max} $, дБ	
Δf , МГц			
Прямое включение P1=>P2		АЧХ	
f_{\min} , МГц		$ S_{21\min} $, дБ	
f_{\max} , МГц		$ S_{21\max} $, дБ	

4. Перекоммутируйте циркулятор в прямое направление $P1 \Rightarrow P2$ и повторите измерения АЧХ коэффициента передачи (S_{21}). Определите максимальный и минимальный уровни АЧХ в пределах рабочего диапазона циркулятора, найденного ранее. Результаты занесите в протокол. Полученные численные данные измерений экспортируйте в файл с расширением .CSV. Для этого нажмите кнопку **EXCEL** и задайте имя файла в поле **Enter *.CSV File Name**. Постройте совмещенный график в Excel по сохранённым данным S_{21} и S_{12} .

5. Вызовите данные предыдущего измерения из памяти (**Data & Memory**). Включите автоматическое масштабирование графика (**Auto Scale**). На графике будут совмещены модули коэффициентов передачи циркулятора в прямом и в обратном направлении. Сохраните скриншот построенных графиков в файл. Для это используйте копирование активного окна графика в буфер обмена **Alt+PrtScr** и вывод скриншота в файл графическим редактором Paint, либо используйте инструмент «Ножницы».

2.4.3. Измерение модуля коэффициента отражения (обратных потерь) полосно-пропускающего фильтра

Измерение модуля коэффициента отражения с помощью направленного ответвителя осуществляется в п. 9 программы – **Return Loss Measurement Using Coupler**.

1. Создайте проект для измерения коэффициента отражения (можно в качестве шаблона использовать предыдущий проект). Частотные точки и уровни сигнала сохраните такими же, как в п. 2.4.1.

2. Для измерения коэффициента отражения необходимо сначала произвести калибровку «на отражение». Для этого соберите схему согласно схеме рис. 2.8, но без исследуемого фильтра и согласованной нагрузки, подключённой к фильтру. Калибровку уровня сигнала проводят при модуле коэффициента отражения, равном единице. Удобно использовать режим XX, для чего надо просто отключить исследуемое устройство от рабочего плеча направленного ответвителя (НО). Таким образом, в процессе калибровки измеряется и запоминается уровень единичного коэффициента отражения. Выберите 1-й этап измерений в программе, нажав на кнопку **Step 1: Return Loss Reference**. Проведите калибровку, нажав кнопку **RUN**.

3. Следующий этап – измерение модуля коэффициента отражения при подключённом к НО фильтре. Для этого установите исследуемый фильтр на рабочее плечо НО. На выход фильтра необходимо подключить согласован-

ную нагрузку Mini-Circuits ANNE-50 (рис. 2.7). Выберите второй этап измерений в программе нажатием кнопки **Step 2: D.U.T. Measurement**. Запуск измерений осуществляется нажатием кнопки **RUN** при отключённом режиме **Continious Mode**. Проведите измерение и вывод графика коэффициента отражения аналогично методике в 2.4.1. На графике найдите минимум коэффициента отражения и оцените его значение на границах полосы пропускания, определенной ранее при измерении коэффициента передачи по уровню -3 дБ. Результаты запишите в протокол.

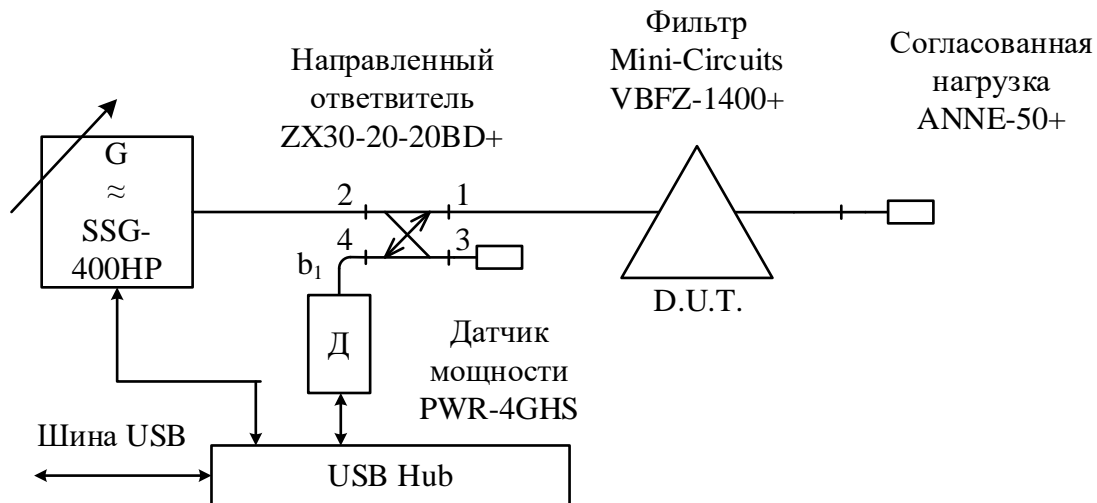


Рис. 2.8. Структурная схема лабораторной установки в режиме измерения коэффициента отражения

4. Экспортируйте полученную таблицу в файл .CSV. Сохраните скриншот графика коэффициента отражения.

2.5. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурные схемы лабораторной установки в режимах измерения коэффициентов передачи и отражения;
- результаты расчётов параметров устройств (полоса фильтра по уровням -3 и -20 дБ, коэффициент прямоугольности, рабочий диапазон циркулятора);
- сокращённые таблицы с результатами измерений, в которых сохранены данные только вблизи рабочей полосы частот исследованных устройств;
- графики измеренных зависимостей, построенные по сохранённым данным в Excel.
- скриншоты соответствующих графиков, скопированные с экрана программы.

2.6. Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия СВЧ синтезаторов частоты. Почему в них не используют прямой синтез частоты?
2. Как реализуют ГУН СВЧ синтезаторов с косвенным принципом синтеза? Как в них управляют частотой генерации?
3. Какие принципы измерения мощности используют в ваттметрах СВЧ?
4. Поясните структурную схему измерителя КСВН и ослабления на основе синтезатора частоты и ваттметра.
5. Для чего в скалярном измерителе используют направленный ответвитель?
6. Почему измеритель с тремя направленными ответвителями (НО) более точен, чем измеритель с одним НО и одним датчиком мощности?
7. В чем состоит калибровка скалярного измерителя коэффициента передачи на СВЧ?
8. В чем состоит калибровка скалярного измерителя коэффициента отражения и КСВН на СВЧ? Почему для калибровки можно использовать открытый выходной разъем ответвителя?
9. Почему точность измерения АЧХ СВЧ устройств скалярным прибором ниже, чем при использовании векторного анализатора цепей СВЧ?
10. Приведите пример измерительного тракта для одновременного измерения модулей коэффициента передачи и отражения с использованием синтезатора частоты, направленных ответвителей и ваттметров.
11. Как измерить мощность, превышающую максимально допустимое паспортное значение мощности ваттметра?

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в радиоэлектронике сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов.- СПб: Лань, 2025.-348с.
2. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: Учеб.пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2008.-184с.
3. Воскресенский Д., М., Данилин А.А., Сосновский В.А. Измерения на СВЧ: лаб. Практикум /Под. ред. А. А. Данилина. - СПб.: Изд.СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021.- 112с.
4. Данилин А. А., Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: Учебное пособие /Под. ред. А.А.Данилина - СПб.: Изд-во «Лань», 2017. -408с
5. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
6. Микроэлектронные устройства СВЧ. Под ред. Г.И. Веселова, 1988-280с.
7. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи.

Оглавление

2. СКАЛЯРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ АЧХ СВЧ УСТРОЙСТВ	2
2.1. Принцип действия синтезаторов СВЧ-диапазона	2
2.2. Принципы измерения мощности на СВЧ	5
2.3. Описание лабораторной установки.....	10
2.4. Задание и указания к выполнению работы.....	12
2.4.1. Измерение модуля коэффициента передачи полосно- пропускающего фильтра	12
2.4.2. Измерение коэффициентов передачи невзаимного микрополоскового циркулятора	14
2.4.3. Измерение модуля коэффициента отражения (обратных потерь) полосно-пропускающего фильтра	16
2.5. Содержание отчета.....	17
2.6. Контрольные вопросы	18
Литература	18