



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)

**Исследование генератора СВЧ,
управляемого напряжением**

Санкт-Петербург
2025 г.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЧ, УПРАВЛЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЕМ

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с генератором СВЧ, управляемым напряжением, методикой измерения его параметров с помощью СВЧ-частотомера и анализатора спектра.

7.1. СВЧ-генераторы, управляемые напряжением

В радиоприёмниках СВЧ, в синтезаторах частоты, в различных измерительных приборах (анализаторах параметров цепей, частотомерах и пр.) широко используют генераторы сигналов, частота которых управляется внешним напряжением. Такие генераторы называют ГУН (генераторы, управляемые напряжением, или VCO – Voltage Controlled Oscillator). Они представляют собой автогенератор, содержащий параметрическую частотодающую цепь (резонатор), рабочая частота которого меняется внешним управляющим напряжением (tuning voltage). Традиционное использование таких приборов – получение сигналов с ЧМ. Другое применение ГУН – построение генераторов со схемой фазовой подстройки частоты (ФАПЧ или PLL – Phase-Locked Loop). В таком генераторе реализовано сравнение фаз сигналов входной, выходной частоты в фазовом детекторе. Напряжение с выхода детектора через петлю отрицательной обратной связи управляет частотой генератора, фиксируя ее на заданном значении. Такие генераторы являются основой синтезаторов СВЧ-диапазона с косвенным принципом синтеза частоты.

При относительно небольшой девиации частоты перестройку резонатора осуществляют *варикапом* – полупроводниковым *варакторным диодом*, барьерная емкость которого зависит от запирающего напряжения смещения. Для ГУН, перестраиваемых в широкой полосе частот, разрабатывают специальные варакторные диоды со сверхрезким *p-n*-переходом, которые позволяют изменять емкость более чем в 4 раза, а частоту, следовательно, – более чем в 2 раза (больше октавы). Применение варикапа в транзисторных генераторах СВЧ позволяет получить достаточно быструю перестройку частоты генератора.

В измерителях АЧХ требуется большой диапазон перестройки по частоте, однако скорость перестройки не так критична. Генераторы с электрическим управлением частотой в измерителях АЧХ принято называть ГКЧ (генераторы качающейся частоты), поскольку закон измерения частоты в таких

приборах обычно периодический. В ГКЧ СВЧ-диапазона нашли широкое применение ферродиелектрические резонаторы на ЖИГ. Перестройка частоты генератора осуществляется за счёт изменения частоты ферромагнитного резонанса ферритовой сферы (ЖИГ-сфера). Сферу помещают в зазор электромагнита. Ее резонансная частота линейно зависит от напряжённости внешнего подмагничивающего поля, а значит, от тока в катушках электромагнита, пропорционального управляющему напряжению. Частота резонатора такого типа может меняться в широких пределах (до 10 раз).

7.2. Основные параметры и характеристики ГУН

Диапазон частот перестройки ГУН (frequency range). Относительную полосу перестройки выражают в процентах [%]:

$$BW = \frac{f_B - f_H}{f_{cp}} 100,$$

где f_{cp} – средняя частота диапазона. Для ГУН с широкой полосой перестройки удобнее использовать коэффициент перекрытия по частоте:

$$k_f = \frac{f_B}{f_H}.$$

Модуляционная характеристика перестройки ГУН по частоте (Frequency Tuning Characteristic) – это зависимость частоты сигнала на выходе ГУН от управляющего напряжения.

Крутизна перестройки ГУН по частоте (Tuning Sensitivity) [МГц/В]:

$$S_f = \frac{\Delta f}{\Delta U_{упр}}.$$

Нелинейность перестройки по частоте (Tuning Non-linearity, Tuning Linearity) – это отклонение от линейного закона изменения частоты ГУН. Ее характеризуют пределами изменения крутизны S_f по диапазону перестройки управляющего напряжения.

Мощность выходного сигнала ГУН (Output Power) количественно определяется мощностью частоты основной гармоники синусоидального сигнала на стандартной нагрузке ГУН (50 Ом) в середине рабочего интервала управляющего напряжения при номинальной температуре окружающей среды (+25 °С). Величина $P_{вых}$ выражается в децибелах относительно мощности 1 мВт: $P_{вых}$ [дБмВт или дБм (dBm)].

Отклонение от номинальной мощности на выходе ГУН (Output Power Variation) в диапазоне управляющих напряжений $P_{\text{вых}}$ ($U_{\text{упр}}$). Часто указывают разность между максимальным и минимальным значениями мощности на выходе ГУН в допустимом интервале изменения управляющего напряжения при номинальной нагрузке [дБ].

Зависимость выходной мощности и частоты от температуры (Output Power/ Frequency Change with Temperature).

Скорость перестройки частоты (время переходного процесса ГУН) (Tuning Speed, Response Time) – это время, которое требуется для установления выходной частоты ГУН на 90 % от ее конечного значения после начала ступенчатой перестройки частоты ГУН. Быстродействие ГУН влияет на полосу пропускания по каналу управления (tuning bandwidth). Она определяется как частота [кГц] гармонического напряжения управления ГУН, при которой девиация частоты выходного сигнала уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Уход частоты ГУН (Post Tuning Drift). При скачкообразном изменении управляющего напряжения ГУН перестроится от начальной частоты f_1 до конечной частоты f_2 . При этом частота f_2 установится до требуемого значения через некоторое время. «Уход» частоты – это отклонение частоты от конечного значения за определенное время после скачкообразного изменения напряжения перестройки (рис. 7.1).

Затягивание частоты ГУН – изменение частоты при вариациях фазы коэффициента отражения от нагрузки (frequency pulling). Определяется как разность между максимальным и минимальным значениями (peak-peak) частоты [МГц p-p] для всех значений фазы коэффициента отражения от 0 до 180° при фиксированном КСВН = 2.

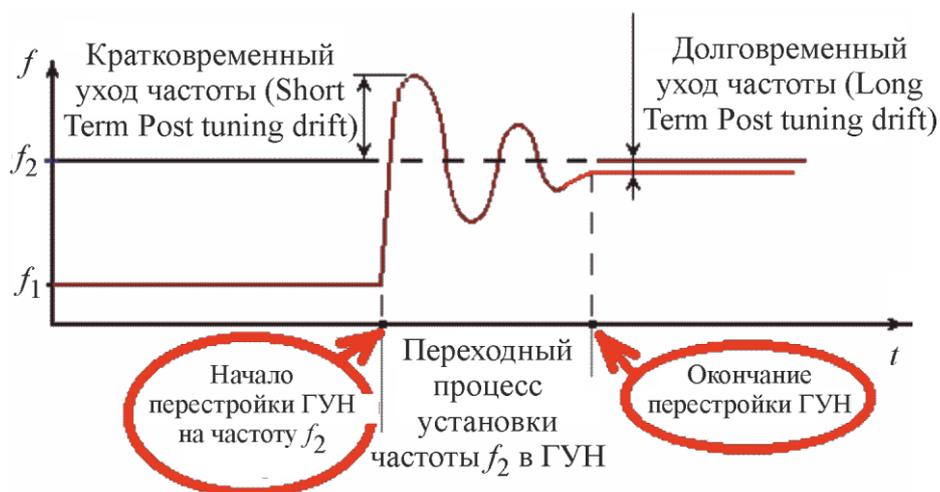


Рис. 7.1. Переходный процесс перестройки ГУН

Коэффициент гармоник выходного напряжения ГУН выражается в децибелах по отношению к несущей [дБн].

Побочные составляющие («спуры» – Spurious Responses, Non-harmonic Spurious Content), присутствующие в спектре выходного сигнала ГУН, выражают относительно первой гармоники в дБн [dBc].

Спектральная плотность мощности (СПМ) фазового шума (phase noise) $S_{\phi}(F)$, где $F = |f - f_{\Gamma}|$ – отстройка от несущей частоты (carrier offset). Фазовый шум оценивают спектральной плотностью одной боковой полосы (Single Side Band Phase Noise) в полосе 1 Гц по отношению к мощности несущей частоты при заданной отстройке от нее (например, 100 кГц). Фазовый шум выражают в дБн/Гц [dBc/Hz] (например, –100 дБн/Гц при отстройке 100 кГц).

7.3. Описание лабораторного макета

В лабораторной работе исследуется СВЧ ГУН, выполненный на гибридной интегральной схеме СВЧ V6009001 2350VCO фирмы Z-Communications (www.zcomm.com). Паспортные параметры генератора сведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

| Параметр | Минимальный | Типовой | Максимальный |
|---|-------------|---------|--------------|
| Диапазон частот, МГц | 1250 | | 2360 |
| Выходная мощность, дБм | +8 | | +13 |
| Уровень гармоник, дБн | | –20 | –12 |
| Уровень фазового шума, дБн/Гц, при отстройке 100 кГц | | –115 | –110 |
| Диапазон управляющего напряжения, В | | 0 | 20 |
| Кругизна перестройки, МГц/В | | 60 | |
| Полоса пропускания по каналу управления, кГц | | 300 | |
| Смещение частоты (Pushing), $S_0 = \Delta f / \Delta U$, МГц/В | | 1 | 1.5 |
| Затягивание частоты (Pulling), МГц | | +20 | +30 |
| Напряжение питания, В | | +12 | |
| Потребляемый ток, мА | | 30 | |

Примерная зависимость генерируемой частоты ГУН от напряжения управления для разных температур представлена на рис. 7.2.

Выходная мощность генератора заметно зависит от управляющего напряжения и, следовательно, от частоты. Примерная частотная зависимость мощности на выходе ГУН приведена на рис. 7.3.

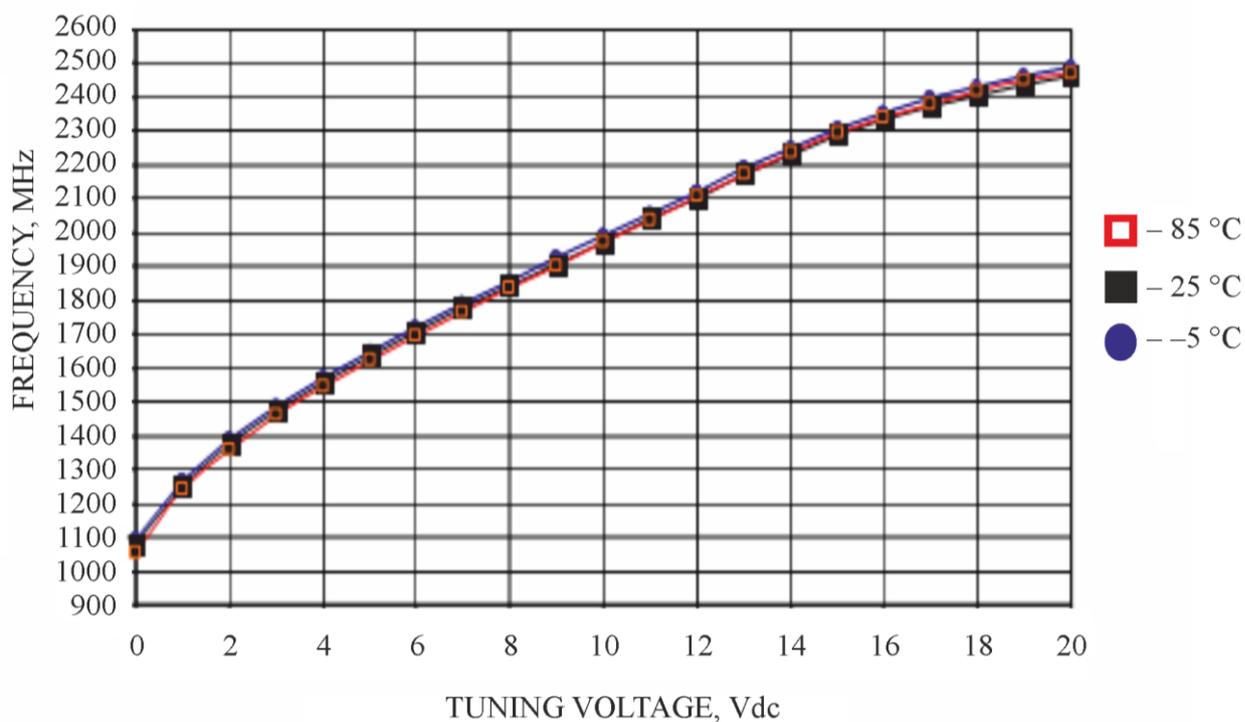


Рис. 7.2. Типовая модуляционная характеристика ГУН V6009001 2350

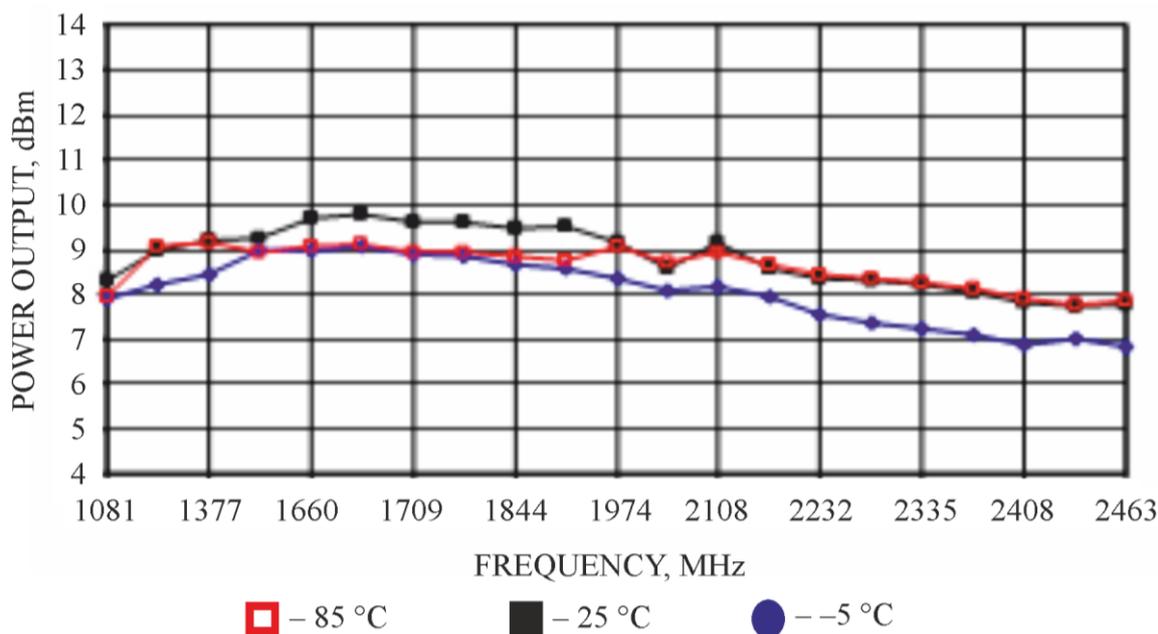


Рис. 7.3. Типовая частотная зависимость выходной мощности в диапазоне перестройки ГУН V6009001 2350

В лабораторной работе для измерения параметров генерируемого сигнала используется СВЧ-анализатор GSP-827, основные параметры которого приведены в табл. 7.2.

Время анализа регулируется в пределах 100 мс...25,6 с. Полоса пропускания УПЧ – от 3 кГц до 4 МГц (меняется дискретно). Полоса видеофильтра регулируется в пределах 10 Гц...1 МГц.

Таблица 7.2

| Параметр | Значение | Погрешность |
|--|-----------------------------------|---|
| Диапазон частот | 9 кГц...2,7 ГГц | Определяется опорным источником частоты |
| Полоса обзора | 0 Гц, 2 кГц...2,5 ГГц | |
| Опорный источник частоты | 10 МГц | 0,001 % |
| Полоса пропускания | 3, 30, 300 кГц, 4 МГц | ±15 % |
| Входное сопротивление | 50 Ом | КСВН не более 1,5 |
| Диапазон входных уровней сигнала | -100...+20 дБм | Неравномерность АЧХ: ±1,5 дБ Линейность шкалы: ±1,5 дБ |
| Спектральная плотность шумов | -130 дБм/Гц | – |
| Интермодуляционные и негармонические искажения | Менее -60 дБ относительно несущей | – |

Для точного измерения частоты генератора используется СВЧ электронно-счётный частотомер (ЭСЧ) Agilent 53181A с пределом измерения частоты 225 МГц в первом канале и 3 ГГц во втором. Он позволяет проводить широкий круг измерений частоты и времени при скорости до 200 измерений в секунду. ЭСЧ обеспечивает разрешение по частоте 10 знаков в секунду. Технические характеристики частотомера представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

| Параметр | Значения |
|---|---|
| Виды измерений | Частота, отношение частот (с доп. каналом 2), период, пиковое напряжение |
| Анализ | Автоматические допусковые испытания, математическая обработка (масштабирование и смещение), статистика (минимум, максимум, среднее значение, среднеквадратическое отклонение) |
| Диапазон частот (варианты комплектации) | От 0 до 225 МГц (1,5; 3; 5 или 12,4 ГГц во втором канале) |
| Время счета | От 1 мс до 1000 с, автоматический выбор |
| Разрешение | 10 знаков в секунду |

Прибор измеряет частоту и период сигналов при уровне входного сигнала от 0,04 до 5 В; период сигнала от 4,44 нс до 10 с. Погрешность внутрен-

него кварцевого генератора прибора $\delta_{\text{кв}} = \pm 3 \cdot 10^{-7}$ за 30 суток. Температурная нестабильность генератора менее $\pm 5 \cdot 10^{-6}$.

Прибор Agilent 53181A обеспечивает автоматический и ручной режимы запуска, автоматическую и ручную установку оптимального времени измерения, установку требуемого количества значащих цифр. Установки режимов работы можно запомнить в 20 регистрах прибора и при необходимости вызвать их из памяти.

Микропроцессор обеспечивает ряд математических операций над результатом измерения и статистическую обработку потока данных:

- масштабирование результата (домножение на константу);
- сдвиг результата (добавление константы);
- проведение многократных измерений (количество опытов от 2 до 106) и обработку данных – расчёт среднего отклонения, среднего значения, максимального и минимального результата;
- фильтрацию потока данных по предварительно введённым пределам – выводятся только те результаты, которые попадают в эти пределы.

Предусмотрена возможность работы прибора в составе измерительных систем с интерфейсом GPIB (КОП – канал общего пользования, IEEE 488).

В приборе реализован *комбинированный режим* работы частотомера.

Входной сигнал с частотой $f_x = 1/T_x$ преобразуется в последовательность импульсов. Эти импульсы поступают на первый временной селектор, на который подаётся также стробимпульс с микропроцессора. Длительность его $T_{\text{изм}}$ задаёт общее время измерения частоты (время усреднения). Прошедшие через селектор M импульсов подсчитываются первым счётчиком. Одновременно формируется другой стробимпульс, начало которого совпадает с первым импульсом, прошедшим через селектор. Конец стробимпульса совпадает с первым импульсом, который *не прошёл* на счётчик. Таким образом, сформированный стробимпульс имеет длительность, точно равную MT_x . Его подают на вход второго временного селектора. На второй вход селектора подают счётные импульсы от образцового кварцевого генератора меток времени с периодом T_m . Прошедшие через селектор N импульсов подсчитываются вторым счётчиком. Результат измерения получается в виде отношения показаний счётчиков M , N и метки времени, которое подсчитывается микропроцессором прибора:

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{M}{NT_M}.$$

Погрешность дискретности в данном методе зависит от минимальной длительности метки времени T_M . При этом относительная погрешность измерения составляет

$$\delta f_x = \frac{T_M}{MT_x} \approx \frac{T_M M}{MT_{\text{ИЗМ}}} = \frac{T_M}{T_{\text{ИЗМ}}}.$$

Здесь учтено, что

$$T_x = \frac{1}{f_x} = \frac{MT_x}{M} = \frac{T_{\text{ИЗМ}}}{M}.$$

Таким образом, погрешность дискретности определяется выбранным временем счета и длительностью метки времени и *не зависит* от измеряемой частоты. Эта погрешность определяет разрешающую способность частотомера. Ее указывают обычно для $T_{\text{ИЗМ}} = 1$ с количеством значащих цифр в результате измерения. При опорной частоте 10 ГГц разрешение частотомера составляет 10 значащих цифр в результате измерения.

7.4. Задание и указания к выполнению лабораторной работы

7.4.1. Подготовка установки к работе

1. Соберите схему измерений согласно рис. 7.4.
2. Включите сетевой тумблер блока питания и установите напряжение питания $E_{\text{пит}} = 12 \text{ В}$, напряжение управления $U_{\text{упр}} = 12 \text{ В}$. Обратите внимание, что выходы блока питания в исходном состоянии отключены (зелёные светодиоды не горят). Кроме того, у двухканального блока питания может быть несколько режимов регулировки напряжения – независимый, последовательный и параллельный. Включите независимый режим (**Indep.**).

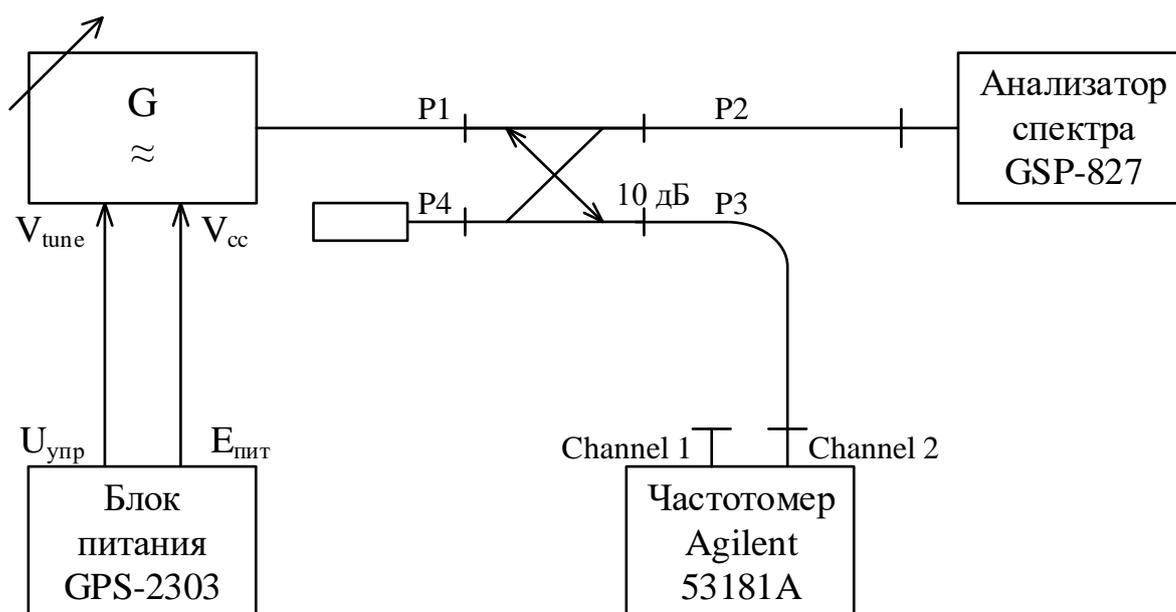


Рис. 7.4. Структурная схема лабораторной установки

3. Проверьте подключение чёрных проводов питания ГУН к выходам «-» блока питания, а красных - к выходам «+». В случае переплюсовки ГУН выйдет из строя. Выходы **GND** остаются неподключенными.
4. Проверьте, чтобы выход канала питания был бы подключён ко входу питания генератора «**Vcc**», а выход канала напряжения управления – ко входу управления «**Vtune**». Включите выходы каналов блока питания кнопками **Output** (зелёные светодиоды светятся).
5. Включите частотомер и переведите его в режим измерения частоты по второму каналу **Freq Ch2**.

6. Включите анализатор спектра и установите диапазон качания частоты в пределах **Частота => Start** = 1,3 ГГц, **Частота => Stop** = 2,5 ГГц. На экране должен появиться отклик сигнала ГУН.

7. Отрегулируйте масштаб спектрограммы по уровню **Уровень => Ref Level** = 20 dBm, **Scale** = 10 dB и сфотографируйте спектрограмму.

7.4.2. Измерение модуляционной характеристики ГУН

На данном этапе работы измеряется зависимость частоты и мощности выходного сигнала генератора от напряжения управления (модуляции).

1. Установите номинальное напряжение питания $E_{nom} = 12$ В.

2. Меняя управляющее напряжение в пределах 0...21 В с шагом 1 В, измерьте в каждой точке выходную мощность и частоту. Для этого установите метку АС на вершину отклика (используйте режим Поиск Пика (**To Peak**)) и *оцените* частоту и мощность сигнала ГУН по метке АС. Точное измерение частоты делайте с помощью частотомера. Занесите полученные данные в табл. 7.4 (1).

Таблица 7.4

| Генератор VCO № _____ | | | |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|
| $U_{упр}$, В (1) | $f_{ген}$, МГц (грубо) | $f_{ген}$, МГц (точно) | $P_{ген}$, дБм |
| E_{nom} , В (2) | | | |
| | | | |

7.4.3. Измерение зависимости частоты и выходной мощности от напряжения питания ГУН

Измерьте зависимость параметров сигнала ГУН от питающего напряжения, которая позволяет оценить стабильность генератора. Для этого:

1. Отрегулировав управляющее напряжение в пределах 0...18 В, установите частоту ГУН порядка 1,6 ГГц при номинальном напряжении питания 12 В.

2. Варьируя напряжение питания в пределах 3...15 В с шагом 1 В, измерьте частоту и мощность выходного сигнала с помощью АС и частотомера. Сведите полученные данные в табл. 7.4 (2).

7.4.4. Исследование процесса затягивания частоты ГУН

На данном этапе работы исследуется влияние несогласованной нагрузки на частоту генерации ГУН.

1. Отрегулировав управляющее напряжение в пределах 0...18 В, установите частоту ГУН порядка 1,6 ГГц при номинальном напряжении питания 12 В.

2. Подключите вместо АС образцовую подвижную нагрузку (слайдер) с $K_{СВН} = 2$.

3. Меняя положение подвижной нагрузки и фиксируя частоту генерации по частотомеру, найдите значения максимальной и минимальной частоты генерации и запишите их.

7.5. Обработка результатов измерений

1. По данным, полученным в п. 7.4.2, постройте модуляционную характеристику (зависимость частоты от управляющего напряжения), зависимость выходной мощности от частоты. Сравните их с паспортными характеристиками, приведёнными ранее.

2. По графику модуляционной характеристики определите среднюю крутизну перестройки генератора.

3. По данным, полученным в п. 7.4.3, постройте полученные зависимости частоты и мощности сигнала ГУН от напряжения питания.

4. Определите максимальное смещение частоты и максимальное изменение выходной мощности генератора при вариации напряжения питания.

5. По данным, полученным в п. 7.4.4, определите разницу максимальной и минимальной частот в мегагерцах и сравните ее с паспортным значением затягивания частоты.

7.6. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- протокол измерений;
- структурную схему лабораторной установки в режиме измерения модуляционной характеристики;
- структурную схему лабораторной установки в режиме измерения затягивания, с использованием условного обозначения слайдера на рис 7.4;

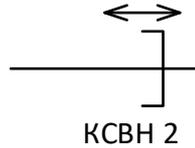


Рис. 7.4. Условное графическое обозначение подвижной нагрузки (слайдера) по ГОСТ 2.734–68.

- таблицы измеренных величин;
- обработку результатов измерений: графики и выводы.

7.6. Контрольные вопросы

1. Что такое ГУН СВЧ? Для каких целей их применяют в измерительной технике?
2. Какими элементами осуществляют электрическое управление частотой ГУН на СВЧ?
3. Какими параметрами и характеристиками описывают свойства ГУН СВЧ?
4. Что такое модуляционная характеристика ГУН?
5. Поясните эффект затягивания частоты в ГУН.
6. Поясните принцип действия частотомера, используемого в лабораторной работе? Что такое «комбинированный метод измерения частоты и периода»?
7. Чем отличаются СВЧ частотомеры от ЭСЧ НЧ и ВЧ диапазона?
8. Почему в частотомере не один, а два входа исследуемого сигнала? Есть ли между ними различия?
9. Что такое чувствительность анализатора спектра, чем она определяется? Равна ли она уровню шума на осциллограмме? Есть ли теоретический предел чувствительности прибора?
10. Как зависит величина уровня шума на экране спектроанализатора от режима его работы? Укажите способы его понижения.
11. Что такое динамический диапазон спектроанализатора?

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. Григорьев А.Д., Иванов В.А., Молоковский С.И. Микроволновая электроника: Учебник/ Под ред. А.Д. Григорьева. - Спб.: Издательство «Лань», 2016. – 496с
6. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981 -295с.
7. Дьяконов В.П. Сверхскоростная твердотельная электроника. Т.1,2 - М.: ДМК Пресс, 2013.

Оглавление

| | |
|---|----|
| 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЧ, УПРАВЛЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЕМ | 2 |
| 7.1. СВЧ-генераторы, управляемые напряжением..... | 2 |
| 7.2. Основные параметры и характеристики ГУН | 3 |
| 7.3. Описание лабораторного макета..... | 5 |
| 7.4. Задание и указания к выполнению лабораторной работы | 10 |
| 7.4.1. Подготовка установки к работе | 10 |
| 7.4.2. Измерение модуляционной характеристики ГУН..... | 11 |
| 7.4.3. Измерение зависимости частоты и выходной мощности от напряжения питания ГУН | 11 |
| 7.4.4. Исследование процесса затягивания частоты ГУН..... | 12 |
| 7.5. Обработка результатов измерений | 12 |
| 7.6. Содержание отчета | 12 |
| 7.6. Контрольные вопросы..... | 13 |
| Литература | 14 |