

Министерство образования и науки Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники (ТУСУР)

А.Н. Сычев

Измерение СВЧ устройств и интегральных схем

Учебно-методическое пособие для студентов магистратуры,
обучающихся по специальности
09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»
с профилем «Автоматизация проектирования микро- и нанoeлектронных
устройств для радиотехнических систем»

Томск – 2018

УДК 658.512.22
ББК 30.2-05
С95

Сычев А.Н.

С95 Измерение СВЧ устройств и интегральных схем: Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ и практических занятий, указания по организации самостоятельной работы студентов / А.Н. Сычев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – 13 с.

Даны методические указания по выполнению лабораторных работ и практических занятий, а также по организации самостоятельной работы студентов, изучающих дисциплину «Измерение СВЧ устройств и интегральных схем».

Может быть полезно аспирантам, преподавателям и инженерно-техническим работникам, занимающимся измерениями СВЧ компонентов и устройств.

УДК 658.512.22
ББК 30.2-05

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	4
2 Указания по выполнению лабораторных работ и практических занятий	4
3 Организация самостоятельной работы студентов	4
4 Темы практических и лабораторных занятий	4
4.1 Исследование перестраиваемого генератора с делителем частоты на интегральных микросхемах.	5
4.2. Исследование транзисторного генератора сверхкоротких импульсов в режиме лавинного пробоя	7
4.3 Исследование временного отклика разомкнутого и короткозамкнутого отрезков линии передачи при импульсном воздействии	10

1 Введение

Данное учебно-методическое пособие направлено на формирование компетенций, заявленных в образовательной программе. Изложены методические указания по выполнению лабораторных работ и практических занятий, а также по организации самостоятельной работы студентов.

Представлен следующий порядок выполнения практических и лабораторных работ:

1. Перестраиваемый генератор с делителем частоты на интегральных микросхемах.
2. Исследование транзисторного генератора сверхкоротких импульсов в режиме лавинного пробоя.
3. Исследование временного отклика разомкнутого и короткозамкнутого отрезков линии передачи при импульсном воздействии.

2 Указания по выполнению лабораторных работ и практических занятий

Практические занятия и лабораторные работы проводятся по одинаковой тематике, сбалансировано по времени в следующей последовательности.

Вначале задаётся единая тема для практического и лабораторного занятий. Потом, проводится практическое занятие, содержащее предварительное аналитическое исследование задачи; а затем проводится лабораторное занятие, ориентированное на измерительный процесс.

По каждому практическому занятию и лабораторной работе готовится единый отчёт в текстовом редакторе Word, содержащий выполненные задания, ответы на контрольные вопросы и итоговые выводы.

Отчет в виде компьютерного файла надо сохранить в формате DOC, дать ему имя, содержащее номер группы, фамилию первого автора (при этом на титульном листе должен полный список всех авторов отчета), номер лабораторной работы. Пример названия: 586-2М_Иванов_лаб2.

Файл выслать по адресу электронной почты sychevan@kcup.tusur.ru.

3 Организация самостоятельной работы студентов

Содержание самостоятельной работы студентов при освоении данной дисциплины заключается в их следующих действиях:

- 1) проработке учебного материала по прочитанным лекциям;
- 2) самостоятельном изучении отдельных разделов дисциплины, предварительно задаваемых преподавателем на лекции;
- 3) подготовке к практическим занятиям и лабораторным работам, результативность которых проверяется преподавателем путём оценивания ответов на контрольные вопросы;
- 4) подготовке и сдаче «электронных» отчётов о выполненных работах.

1 Исследование перестраиваемого генератора с делителем частоты на интегральных микросхемах

Цель работы – изучить особенности работы перестраиваемого генератора с делителем частоты, реализованного на двух интегральных ТТЛ-микросхемах.

Средства для выполнения работы

Печатный узел перестраиваемого генератора с делителем частоты, осциллограф.

1.1 Общие сведения

Для генерации сигналов заданной частоты и/или длительности используется несколько типов интегральных схем (ИС): триггеры Шмитта, мультивибраторы, генераторы с кварцевой стабилизацией (Crystal-Controlled Oscillator) и генераторы управляемые напряжением (ГУН – Voltage-Controlled Oscillator – VCO). Все эти ИС представляют собой устройства, в которых используются внешние времязадающие элементы: RC-цепи и кварцевые резонаторы.

Типовая схема генератора с «ручной» перестройкой на триггере Шмитта, дополненная делителем частоты, приведена на рис. 1 [1].

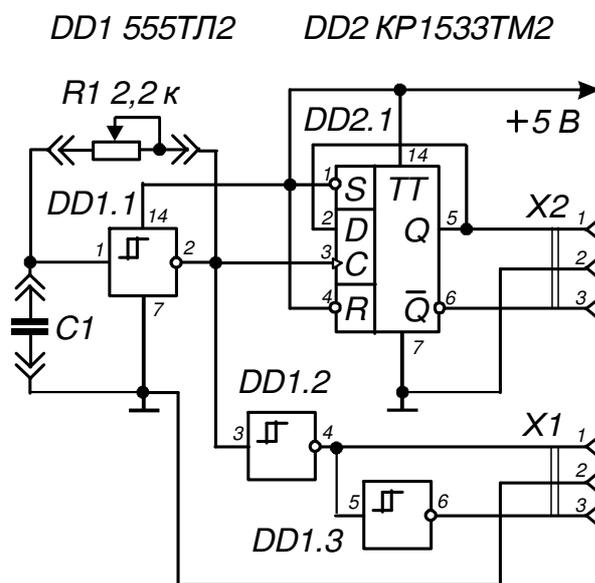


Рис. 1. Схема перестраиваемого генератора на триггере Шмитта с делителем частоты, реализованная на двух интегральных микросхемах

Частота колебаний такого генератора определяется постоянной времени RC-цепи. Конденсатор C1 заряжается и разряжается до напряжения, определяемого уровнями гистерезиса. Максимальное значение R1 зависит от входного тока триггера. Обычно для триггера Шмитта ТТЛ-серий $R1 = 1 \text{ кОм}$ и $f \approx 0,7/(R1C1)$.

Если обратную связь в триггере Шмитта завести без RC-цепи, т.е. $R1=0$, $C1 \rightarrow \infty$, то получаем генератор с максимально возможной частотой колебаний (для схемы 155ТЛ2 ~ 24...36 МГц). Подключение выхода генератора к С-входу D-триггера задержки 1533ТМ2 позволяет получить деление частоты на 2 (импульсы будут иметь скважность, равную 2).

1.2 Контрольные вопросы

1. Что такое триггер Шмитта?
2. Какую необходимую цепь имеет генератор на триггере Шмитта?
3. От чего зависит, и как в триггере Шмитта задается период следования импульсов (частота)?
4. На основе какого типа триггера выполняется деление частоты сигнала?
5. Что такое период и скважность импульсного сигнала?
6. Какое специальное название имеет последовательность импульсов со скважностью, равной 2?

1.3 Задания

Задание 1. Ответить на контрольные вопросы.

Задание 2. Предварительный анализ схемы генератора на триггере Шмитта.

Рассчитать постоянную времени RC-цепи (см. рис. 1), содержащую резистор R1 и конденсатор C1, по формуле $\tau = R1C2$ и сопоставить её с периодом следования импульсов T, измеренным далее экспериментально.

Задание 3. Измерение временных характеристик генератора на триггере Шмита с делителем частоты.

1. Подключить устройство к блоку питания +5В.
2. Измерить амплитуду импульсов, их длительность $t_{и}$ и период следования T, после чего вычислить частоту f при различных положения движка переменного резистора R1.
3. Получить экспериментальное подтверждение или уточнение формулы для частоты генерации $f \approx 0,7/(R1C1)$.
4. Осциллограммы (т.е. временные диаграммы), полученные в ходе измерений зафиксировать и представить в отчет.

Список использованных источников

1. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1988. – 464 с.

2 Исследование транзисторного генератора сверхкоротких импульсов в режиме лавинного пробоя

Цель работы – изучить устройство и принцип работы транзисторного генератора сверхкоротких импульсов (СКИ) и измерить его характеристики во временной области.

Средства для выполнения работы

Генератор СКИ со встроенным блоком питания от сети 220 В, осциллограф.

2.1 Общие сведения. Схема генератора СКИ

Импульсный метод экспериментального исследования СВЧ устройств и линий передачи применяется достаточно широко. Такой метод имеет название «импульсная рефлектометрия», или рефлектометрия во временной области» [1]. При заполнении видеоимпульса гармоническими колебаниями приходят к радиоимпульсному методу, который используется для характеристики мощных интегральных транзисторов СВЧ на высоком уровне мощности.

Генерация и формирование импульсов необходимого напряжения является важным этапом в импульсной рефлектометрии. Наиболее простой и распространённой схемой для генерации СКИ является релаксационная схема на высокочастотном транзисторе (рис. 1), работающем в режиме лавинного пробоя [2].

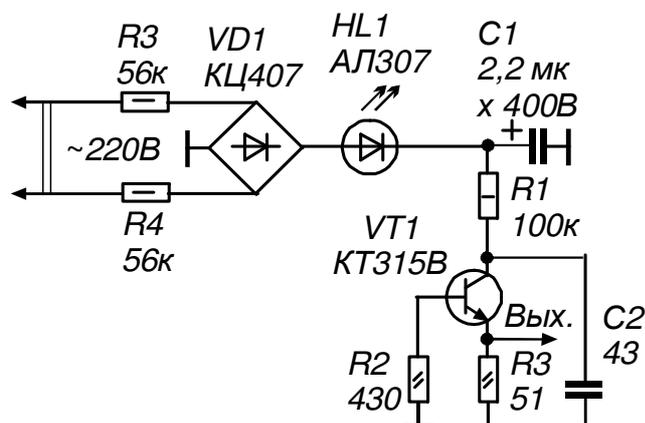


Рис. 1. Схема генератора сверхкоротких импульсов на лавинном транзисторе со встроенным блоком питания от сети 220 В

Принцип работы схемы подробно описан в [2]. При увеличении обратного напряжения, приложенного к коллекторному переходу транзистора VT1, вначале наблюдается рост обратного тока, далее по достижении критического уровня возникает явление электрического лавинного пробоя p-n перехода, накопительный конденсатор C2 разряжается

через открытый транзистор, и на выходном резисторе R3 появляется короткий импульс (~5 нс) положительной полярности высокого напряжения (60–90 В) (см. рис.1). Таким образом, транзистор работает в лавинном режиме, и его полный цикл работы разбивается на следующие характерные этапы различной длительности: 1) исходное состояние; 2) рост зарядного тока; 3) спад разрядного тока; 4) лавинный пробой; 5) восстановление.

Вследствие очень короткой длительности лавинного пробоя и большой скважности следования импульсов структура не успевает перегреться, и поэтому данный процесс не ведёт к необратимому отказу.

2.2 Конструкция генератора СКИ

Конструкция генератора сверхкоротких импульсов на лавинном транзисторе со встроенным блоком питания от сети 220 В показана на рис. 2. Она реализована в виде компактного узла на печатной плате, имеющего входной и выходной соединители. Габаритные размеры генератора – 85 x 20 x 20 мм³.



Рис.2. Конструкция генератора сверхкоротких импульсов на лавинном транзисторе со встроенным блоком питания от сети 220 В

2.3 Контрольные вопросы

1. В каком случае применяется импульсный метод при измерении частотных характеристик СВЧ устройств и почему?
2. Каковы основные параметры импульсного сигнала?
3. Какова форма гауссова импульса?
4. Что такое период следования импульсов?
5. Что такое скважность импульсного сигнала?
6. Что такое видеоимпульс?
7. Что такое радиоимпульс?
8. Почему при лавинном пробое не происходит необратимого теплового пробоя транзистора?

2.4 Задания

Задание 1. Ответить на контрольные вопросы.

Задание 2. Предварительный анализ схемы транзисторного генератора СКИ, работающего в лавинном режиме.

1. Рассчитать постоянную времени RC -цепи (см. рис. 1), содержащую резистор $R1$ и конденсатор $C2$, по формуле $\tau = R1C2$ и сопоставить её с периодом следования импульсов, выявленным из эксперимента по заданию 3.
2. Используя цветовое декодирование, проверить величину сопротивления резистора $R3$, включенного параллельно на выходе (см. рис. 1 и 2).
3. Оценить среднюю величину тока, протекающего через коллектор транзистора $VT1$.
4. Оценить максимальный импульсный ток на выходном резисторе $R3$ по полученному из эксперимента напряжению.

Задание 3. Измерение временных характеристик генератора СКИ.

1. Подключить устройство – генератор СКИ со встроенным блоком питания – к сети 220 В.
2. Измерить постоянное напряжение блока питания, т.е. на конденсаторе $C1$ (см. рис. 1), зафиксировать результат и сопоставить его с амплитудой выходных импульсов.
3. В режиме «грубой» развертки измерить период следования импульсов T , из которого рассчитать их частоту f , а учитывая и длительность импульсов $t_{и}$, рассчитать их скважность Q .
4. В режиме «точной» развертки измерить длительность выходных импульсов $t_{и}$ по уровню 50%.
5. Определить из «точной» осциллограммы длительность фронта (т.е. время установления) $t_{ф}$, уровень максимального обратного выброса и другие интересные и известные Вам параметры импульса.
6. Измерить импульсные напряжения, обратив внимание на форму, во всех узлах схемы (см. рис. 1), т.е. на всех электродах транзистора – коллекторе, базе, эмиттере. Для синхронного измерения используйте два или три канала одновременно. Заметим, что осциллограммы напряжения на эмиттере уже были сняты выше в пп. 3–5.
7. Все осциллограммы (т.е. временные диаграммы) в режимах «точной» и «грубой» разверток зафиксировать и представить в отчет.

Подготовить отчет о работе с выполненными заданиями, включая ответы на контрольные вопросы и итоговые выводы.

Список использованных источников

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др.; Под ред. Г.В. Глебовича. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
2. Дьяконов В.П. Лавинные транзисторы и их применение в импульсных устройствах / Под ред. С.Я. Шаца. – М.: Сов. радио, 1973. – 208 с.

3 Исследование временного отклика разомкнутого и короткозамкнутого отрезков линии передачи при импульсном воздействии

Цель работы – изучить особенности временного отклика разомкнутого и короткозамкнутого отрезков линии передачи при импульсном воздействии генератора и измерить их характеристики во временной области.

Средства для выполнения работы

Генератор импульсов с внутренним сопротивлением R_0 , короткозамкнутый и разомкнутый отрезки линий передачи с волновым сопротивлением 25 Ом, осциллограф.

3.1 Общие сведения

Принципиальная схема импульсного генератора с открытым выходом (т.е. без нагрузки) показана на рис.1, а. Его эквивалентная схема в виде источника тока J_0 с внутренним сопротивлением R_0 , дополненная нагрузочным внешним резистором R_H , показана на рис. 1, б.

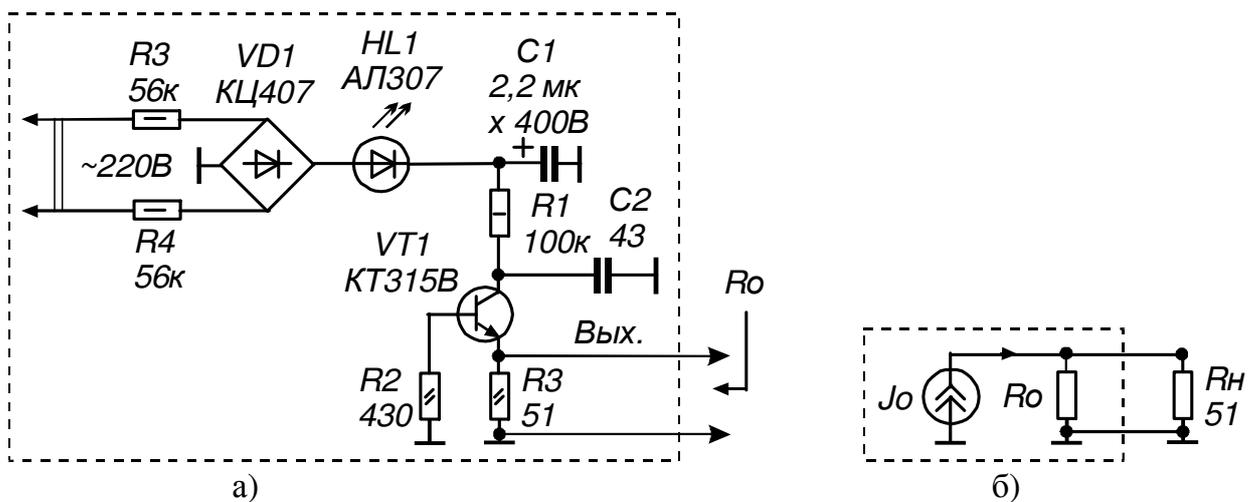


Рис.1 Принципиальная схема импульсного генератора с открытым выходом (а); его эквивалентная схема в виде источника тока с внутренним сопротивлением R_0 (б)

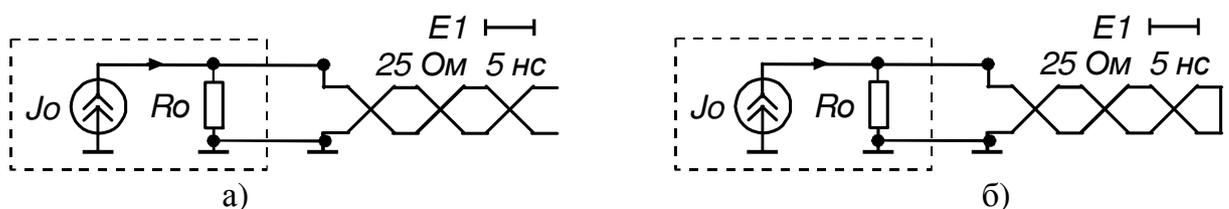


Рис. 2 Схемы подключения к импульсному генератору разомкнутого (а) и короткозамкнутого (б) отрезков линий передачи на 25-омной витой паре

Исследуем схемы со следующими типами нагрузок: 1) без нагрузки (рис.1, а); 2) с резистивной нагрузкой (рис.1, б); 3) в виде разомкнутого отрезка линии передачи (рис.2, а).; 4) в виде короткозамкнутого отрезка линии передачи (рис.2, б).

Экспериментально-расчетное определение внутреннего (выходного) сопротивления генератора. Анализируя конфигурацию схемы генератора (см. рис. 1, а), замечаем, что его эквивалентная схема лучше всего может быть представлена в виде источника тока J_0 с параллельным внутренним сопротивлением R_0 (см. рис. 1, б). Вначале необходимо выполнить два измерения амплитуды выходных импульсов U_0 и U_n : 1) без нагрузки, т.е. $R_n \rightarrow \infty$; 2) с нагрузкой R_n . В обоих режимах полагается, что осциллограф, включённый параллельно, является высокоомным ($\sim 1 \text{ МОм}$) не вносящим погрешности в измерения, а источник тока прокачивает одинаковый ток J_0 . Это позволяет записать два уравнения, соответствующие каждому режиму измерения: 1) $U_0 = R_0 * J_0$; 2) $U_n = [R_0 R_n / (R_0 + R_n)] * J_0$. Данные уравнения, сведённые к одному, дают возможность исключить неизменный ток J_0 и в итоге получить формулу для внутреннего сопротивления генератора $R_0 = R_n / (U_0 / U_n - 1)$.

Волновое сопротивление линий передачи, подключаемых к генератору (рис.2), всегда надо согласовывать с его внутренним сопротивлением R_0 (здесь близким к 25 Ом).

3.2 Конструкция шлейфного отрезка линии передачи

Конструкция отрезка линии передачи с волновым сопротивлением 25 Ом и с режимом холостого хода на дальнем конце показана на рис. 3. Она реализована на UTP-кабеле (UTP – Unshielded Twisted Pair, неэкранированная витая пара) для компьютерных сетей.



Рис.3. Конструкция отрезка линии передачи с волновым сопротивлением 25 Ом и режимом холостого хода на дальнем конце

Стандартный UTP-кабель содержит четыре линии передачи в виде витых пар, имеющих номинальное волновое сопротивление 100 Ом . Это позволяет,

соединив параллельно на входе и на выходе все четыре линии, получить одну линию передачи с необходимым волновым сопротивлением $100/4=25$ Ом. Длина отрезка линии составляет 0,91 м, что обеспечивает необходимое время задержки (~ 5 нс). С ростом длины отрезка его время задержки тоже растёт. Для сокращения габаритных размеров он свернут в спираль с внешним диаметром 7 см.

3.3 Контрольные вопросы

1. Перечислить первичные параметры линии передачи.
2. Перечислить волновые (вторичные) параметры линии передачи.
3. Как называется режим работы линии передачи без активных потерь, имеющей реактивную нагрузку в виде короткого замыкания или холостого хода?
4. Каково соотношение амплитуд и фаз падающей и отражённой волн на конце линии передачи, замкнутой накоротко?
5. Каково соотношение амплитуд и фаз падающей и отражённой волн на конце разомкнутой линии передачи?
6. Каково соотношение амплитуд и фаз падающей и отражённой волн на конце линии передачи, нагруженной на согласованное сопротивление?

3.4 Задания

Задание 1. Ответить на контрольные вопросы.

Задание 2. Предварительный анализ отрезка линии передачи.

Измерив геометрическую длину отрезка линии передачи ℓ и измерив с помощью осциллографа его время задержки t рассчитать диэлектрическую постоянную среды передачи по формуле $\epsilon_{eff} = (c*t/\ell)^2$, где c – скорость света в свободном пространстве.

Задание 3. Измерение временного отклика разомкнутого и короткозамкнутого отрезков линии передачи при импульсном воздействии.

1. Подключить генератор импульсов к сети 220 В (см. рис. 1, а).
2. Экспериментальное определение внутреннего сопротивления генератора. Вначале измерить амплитуду выходных импульсов генератора без нагрузки U_1 (см. рис. 1, а), а затем – с нагрузочным резистором $R_n = 51$ Ом (см. рис. 1, б) – U_2 . Используя измеренные напряжения, по формуле $R_0 = R_n(U_1/U_2 - 1)$, вычислить внутреннее сопротивление генератора R_0 . Зафиксировать результат.

3. Подключить отрезок линии передачи на 25-омной витой паре с режимом XX на дальнем конце (см. рис. 2, а). Снять и зафиксировать осциллограмму (т.е. временную диаграмму), обратив внимание на изменение формы, полярности и амплитуды импульсов. Объяснить результат в отчёте.

4. Подключить отрезок линии передачи на 25-омной витой паре с согласованной нагрузкой ($R_n = 25 \text{ Ом}$) на дальнем конце. Снять и зафиксировать осциллограмму, обратив внимание на форму, полярность и амплитуду импульсов. Объяснить результат в отчёте.

5. Подключить отрезок линии передачи на 25-омной витой паре с режимом КЗ на дальнем конце (см. рис. 2, б). Снять и зафиксировать осциллограмму (т.е. временную диаграмму), обратив внимание на изменение формы, полярности и амплитуды импульсов. Объяснить результат в отчёте.

Подготовить отчет о работе с выполненными заданиями, включая ответы на контрольные вопросы, полученные результаты и итоговые выводы.

Список использованных источников

1. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др.; Под ред. Г.В. Глебовича. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

2. Справочник по теоретическим основам радиотехники / Под ред. Б.Х.Кривицкого. – В 2-х томах.– Т. 2. – М.: Энергия, 1977. – 472 с.