

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ

«Измерение характеристик и параметров
полупроводниковых транзисторов»

«Цепи со сосредоточенными и распределенными параметрами»

по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация
в информатике и радиоэлектронике»

для специальностей:

- 36 04 02 – промышленная электроника,
- 40 02 01 – вычислительные машины, системы и сети,
- 40 03 01 – искусственный интеллект,
- 53 01 02 – автоматизированные системы отображения информации

Брест 2011

УДК 621 317

В методических указаниях приведено описание лабораторной работы по измерению входных-выходных характеристик транзистора и, лабораторной работы, по измерению величин сопротивления, индуктивности и емкости. Структура лабораторных работ включает: теоретические сведения, задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: К.М. Маркевич,
С.С. Дереченик
С.В. Чугунов

Рецензент: Ворсин Н.Н., доцент УО «БГУ имени А.С. Пушкина»

© Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», 2011 г.

Лабораторная работа №6

Измерение характеристик и параметров полупроводниковых транзисторов

Цель работы:

- а) получить практические навыки измерения характеристик и параметров полупроводниковых транзисторов;
- б) получить навыки определения h – параметров транзисторов на основе их входных-выходных характеристик.

Приборы и оборудование: стенд для исследования характеристик транзистора, измерители напряжения и тока, источник напряжения.

I. Краткие теоретические сведения.

Транзистор — один из полупроводниковых приборов, без которого невозможно создавать современную электронную технику и компьютеры в частности. И хотя миниатюризация схем электроники позволяет в одной интегральной микросхеме использовать тысячи транзисторов, он, как полупроводниковый прибор, широко используется самостоятельным элементом. Все многообразие транзисторов, в зависимости от физических принципов работы, разделяется на два типа: биполярные и униполярные (полевые). Несмотря на то, что в основе работы биполярных и униполярных транзисторов используются различные физические явления, для определения их характеристик и параметров применяется единый подход, который рассмотрим на примере биполярного транзистора. Последний, как известно, представляет собой чередующиеся р-п переходы и имеет три электрода: коллектор, базу и эмиттер.

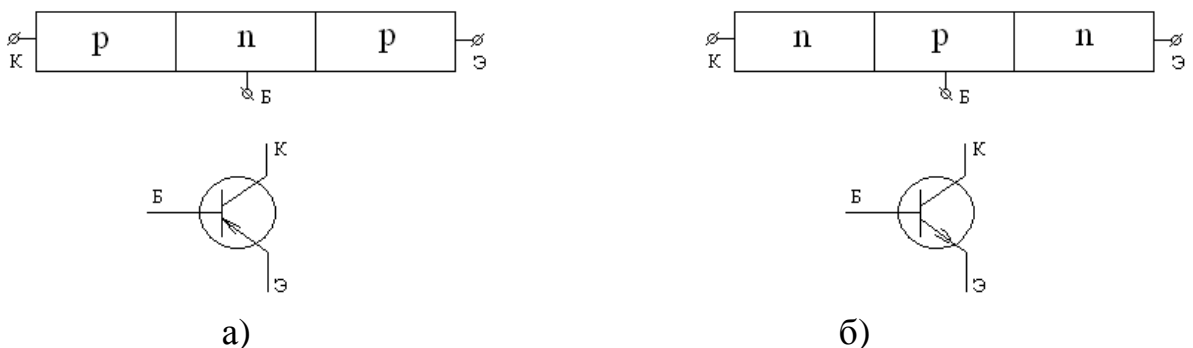


Рисунок 1 - а) структура и схемное обозначение транзистора р-п-р типа; б) структура и схемное обозначение транзистора п-р-п типа.

Если p-n переходы транзистора имеют структуру в соответствии рисунка 1а, то такой транзистор является p-n-p типа. В его схемном изображении стрелка, указывающая направление тока и направлена к базе. В случае, когда структура транзистора имеет вид рисунка 1б, он является n-p-n типа и стрелка направлена от базы.

Укажем основные физические процессы, протекающие в транзисторе, предположив, что они имеют место в бесконечно большом объеме кристалла. С учетом такого предположения физическая картина процессов значительно упрощается, так как можно не учитывать поверхностные явления. Предполагается также, что заряды распределены одномерно. При этом реальный транзистор, в котором процессы распределения зарядов протекают по трем осям X, Y, Z трехмерного пространства, заменяются одномерной моделью с координатой X. Все изменения физических процессов по осям Y, Z, т.е. производные по этим координатам, принимаются равными нулю.

На основе таких условий, энергетическую диаграмму транзистора можно построить на основе энергетической диаграммы p-n структуры (рисунок 2), причем каждый переход имеет свой потенциальный барьер, препятствующий переходу основных носителей в соседнюю область.

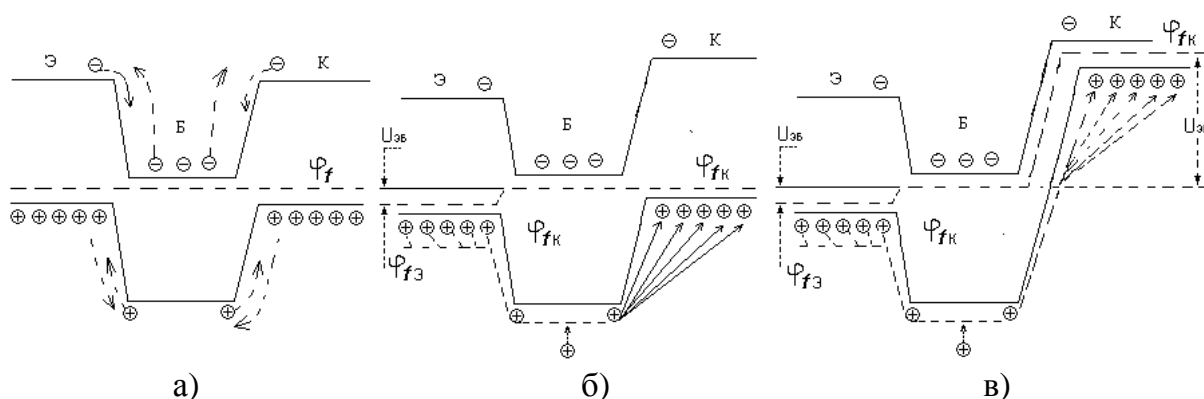


Рисунок 2 - Энергетические диаграммы транзистора при различных режимах работы: а) - равновесное состояние транзистора; б), в) - неравновесные состояния при подаче на эмиттерный переход прямого, а на коллекторный переход обратного напряжения.

При анализе физических процессов в p-n переходе удобно рассматривать уровень Ферми, выраженный в вольтах и связанный с энергией уровня Ферми соотношением $\phi_f = W_f/q$, где q – заряд электрона. Уровень Ферми, выраженный в вольтах, иначе называется потенциалом Ферми. Потенциалы Ферми (ϕ_{f3}) и коллектора (ϕ_{fk}) имеют различные значения.

Состояния транзистора, при котором отсутствуют напряжения на p-n переходе между эмиттером и базой, называется равновесным (рисунок 2 а).

В равновесном состоянии на обоих переходах устанавливается динамическое равновесие между потоками дырок и электронов, протекающих в обе стороны. Эмиттер и коллектор транзистора являются низкоомными слоями, а база — высокоомным слоем. В результате потенциалы Ферми эмиттера $\varphi_{\text{э}}$ и коллектора $\varphi_{\text{к}}$ лежат вблизи уровней акцепторов, а у базы уровень Ферми расположен вблизи запрещенной зоны.

Каждый p-n переход транзистора можно рассматривать в отдельности при условии, что расстояние между переходами значительно больше диффузионной длины неосновных носителей в средней области. Из-за наличия потенциальных барьеров в равновесном состоянии на p-n переходах образуется "потенциальная яма", из которой могут выйти лишь те электроны, которые обладают достаточной потенциальной энергией, и в равновесном состоянии в обоих переходах устанавливается динамическое равновесие между потоками электронов.

Аналогичное равновесие устанавливается также между потоками дырок, которые находятся на "потенциальных гребнях" и свободно перемещаются в соседние слои. В равновесном состоянии результирующие токи через оба перехода равны нулю.

Принцип действия транзистора состоит в управлении током одного из переходов с помощью тока другого перехода. При снижении потенциального барьера $U_{\text{эб}}$ на эмиттерном переходе возрастает поток дырок, уходящих в базу и диффундирующих далее к коллекторному переходу (рисунок 2 в). Попадая в зону действия ускоряющего поля коллекторного перехода, эти дырки переходят в коллектор и создают коллекторный ток $I_{\text{к}}$, протекающий через резистор коллекторной цепи транзистора.

Свойства конкретного транзистора как элемента электротехники определяются его входными и выходными характеристиками. Характеристика, например, на плоскости — это геометрическое место точек. В частном случае может быть и точка. Точки на характеристике транзистора являются его параметрами. В справочной литературе по транзисторам приводятся десятки его параметров. Среди них имеются основные. Это те, на основе которых осуществляется взаимозаменяемость элемента в электрической схеме. К основным параметрам относятся следующие:

- 1) граничная частота усиления f ;
- 2) максимальное напряжение эмиттер-коллектор $U_{\text{макс. эк}}$;
- 3) максимальное напряжение эмиттер-база $U_{\text{макс. эб}}$;
- 4) максимальный ток коллектора $I_{\text{макс к}}$;
- 5) максимальный ток базы $I_{\text{макс б}}$.

Граничная частота усиления f — максимальная частота, на которой способен работать транзистор по схеме с общей базой и, при которой, коэффициент усиления элемента по напряжению — 1.

Максимальное напряжение эмиттер-коллектор $U_{\text{макс. эк}}$ ($U_{\text{макс. эб}}$) — это максимальное напряжение, которое допустимо включать между эмиттером и коллектором (эмиттером и базой) транзистора, при котором гарантируется нормальная работоспособность прибора. Аналогичное толкование имеют и предельные параметры транзистора по току. Ток коллектора $I_{\text{макс к}}$ ($I_{\text{макс б}}$) — это максимально допустимый ток в коллекторной (базовой) цепи транзистора, при котором обеспечивается его нормальная работоспособность.

Эти и другие параметры транзисторов могут быть получены экспериментально, если для его исследования собрать электрическую цепь в соответствии схемы рисунок 3.

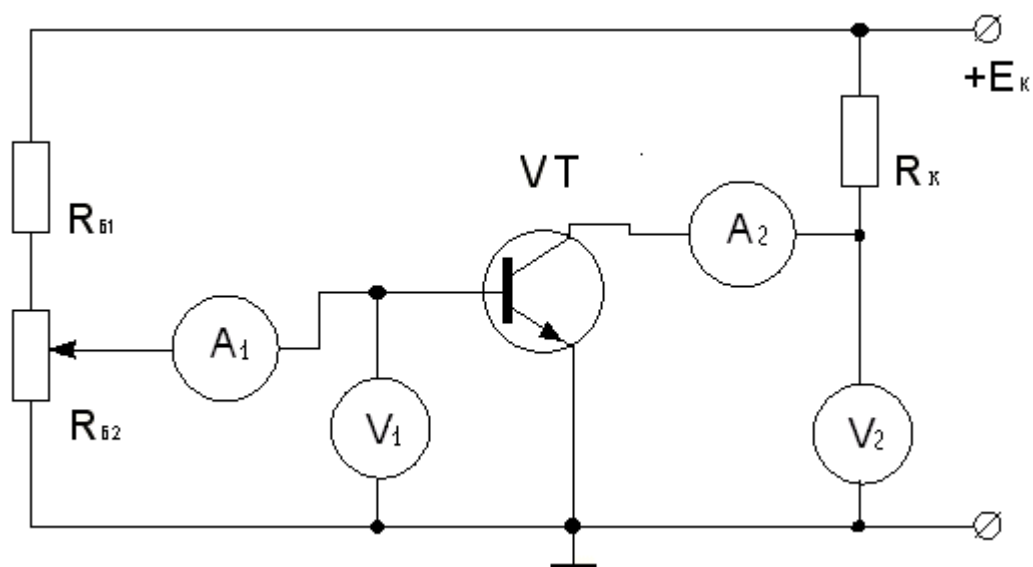


Рисунок 3 - Принципиальная электрическая схема для снятия входных и выходных характеристик биполярного транзистора n-p-n типа.

VT – исследуемый транзистор; $R_к$ – резистор, ограничивающий ток в коллекторной цепи до максимально допустимого, и предохраняющий полупроводниковый прибор от выхода из строя. $R_б$ – резистор, с помощью которого регулируется напряжение на эмиттерно-базовом переходе транзистора. V_1 – вольтметр в базовой цепи транзистора; V_2 - вольтметр в коллекторной цепи транзистора. A_1 и A_2 соответственно амперметры в базовой и коллекторной цепях схемы. На основе этой схемы снимают входные характеристики полупроводникового прибора по постоянному току:

$$I_б = I(U_{эб}) \text{ при } U_к = \text{const.}$$

и выходные:

$$I_к = I(U_{эк}) \text{ при } I_б = \text{const.}$$

Таким образом, для снятия указанных характеристик необходим одновременный контроль трех физических величин: I_B , $U_{эб}$ и U_K – при снятии входных характеристик; I_K , $U_{эк}$ и I_B – для выходных.

Типичные входные характеристики биполярного транзистора приведены на рисунке 4 а. С ростом напряжения на коллекторе элемента ($U_{к1} - U_{к4}$), его входная характеристика сдвигается влево. Выходные характеристики транзистора представлены на рисунке 4 б. Как следует из графиков выходных характеристик транзистора, увеличение тока базы ($i_{б1} - i_{б5}$) ведет к увеличению его тока коллектора (I_K).

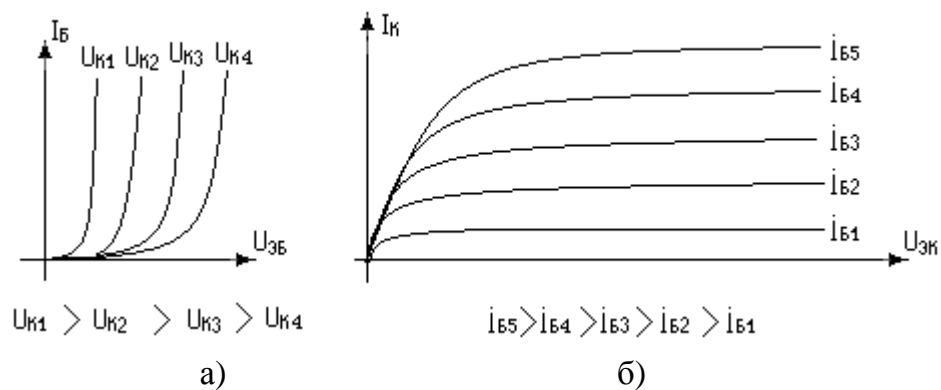


Рисунок 4 - а) входные характеристики транзистора;
б) выходные характеристики транзистора.

В электрических цепях электроники транзистор включают по схеме с общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) и общим эмиттером (ОЭ). Наиболее часто в практике электроники встречаются схемы с ОЭ. Такая схема (рисунок 3) используется и для снятия входных-выходных характеристик транзистора. Схемы включения транзистора с ОБ и ОК приведены соответственно на рисунке 5 и рисунке 6.

Независимо от схемы включения транзистора (ОЭ, ОБ, ОК), он характеризуется входными и выходными напряжениями и токами. Задав, например, напряжения на входе и выходе, получим вполне определенный входной и выходной токи. Следовательно, из названных четырех величин независимыми являются только две. В качестве независимых переменных для транзистора удобно используют входной ток, который обозначим i_1 и выходное напряжение u_2 . Тогда входное напряжение u_1 является некоторой функцией двух независимых переменных i_1 и u_2 : $u_1 = f_1(i_1, u_2)$

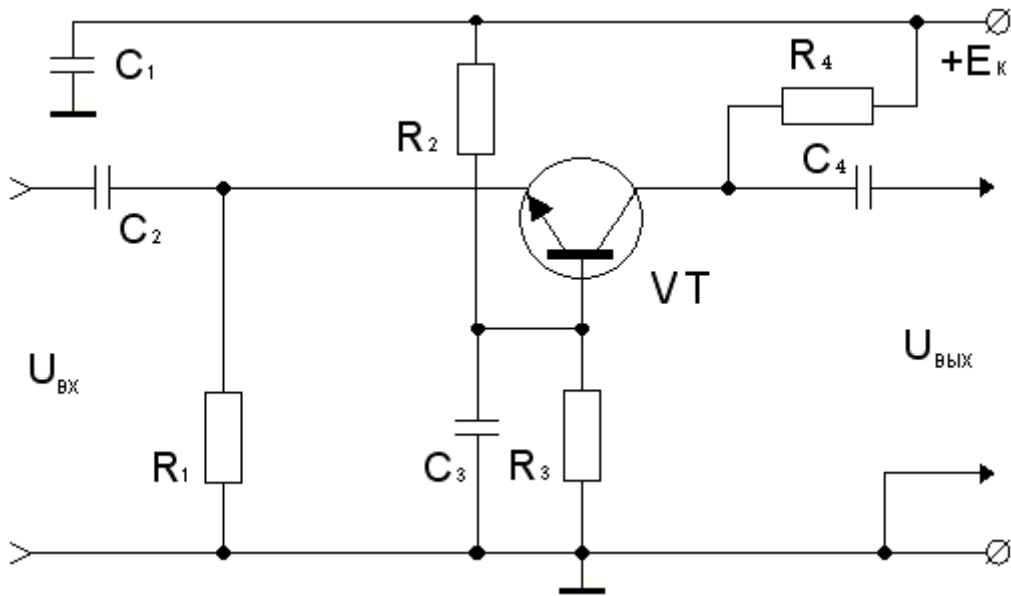


Рисунок 5 - Включение транзистора по схеме ОБ.

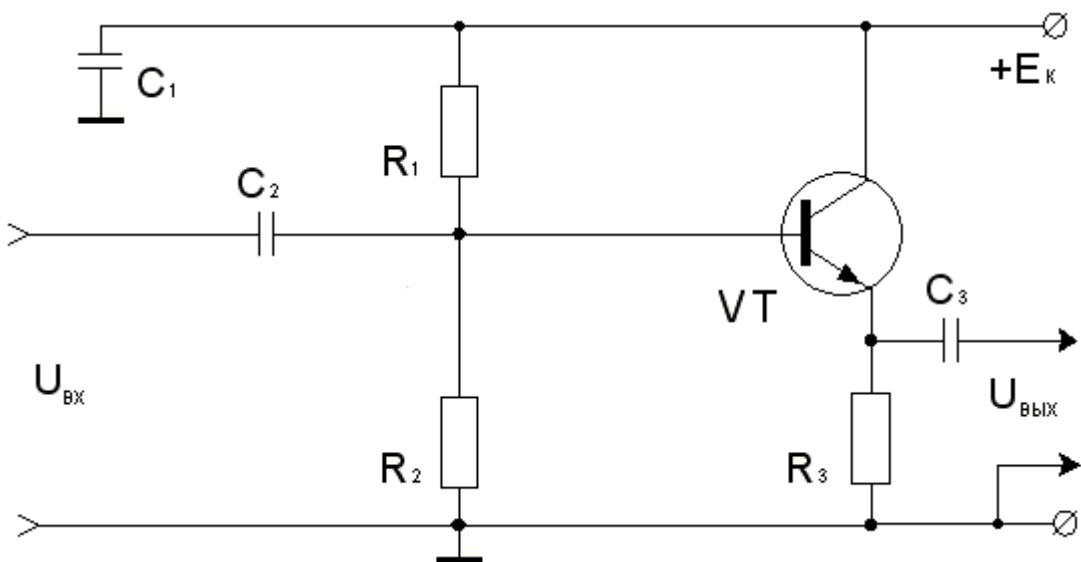


Рисунок 6 - Включение транзистора по схеме ОК.

Для схемы с ОЭ u_1 – напряжение между базой и эмиттером транзистора; i_1 – ток базы; u_2 – напряжение между коллектором и эмиттером. При малых изменениях токов и напряжений приращение входного напряжения:

$$\Delta u_1 \approx (\partial u_1 / \partial i_1) \Delta i_1 + (\partial u_1 / \partial u_2) \Delta u_2$$

Обозначим:

$$h_{11} = \partial u_1 / \partial i_1 \text{ при } u_2 = \text{const}$$

$$h_{12} = \partial u_1 / \partial u_2 \quad \text{при } i_1 = \text{const}$$

Роль малых приращений могут играть переменные токи и напряжения. Таким образом, для малых сигналов:

$$U_1 = h_{11} I_1 + h_{12} U_2$$

где, U_1 – переменное напряжение на входе; I_1 – переменный ток на входе, U_2 – переменное напряжение на выходе.

Аналогично, считая, что выходной ток i_2 является функцией входного тока i_1 и выходного напряжения u_2 , получаем:

$$i_2 = f_2(i_1, u_2)$$

$$\Delta i_2 \approx (\partial i_2 / \partial i_1) \Delta i_1 + (\partial i_2 / \partial u_2) \Delta u_2$$

Для малых сигналов:

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} U_2$$

$$h_{21} = \partial i_2 / \partial i_1 \quad \text{при } u_2 = \text{const}$$

$$h_{22} = (\partial i_2 / \partial u_2) \quad \text{при } i_1 = \text{const}$$

Параметр h_{11} является входным сопротивлением транзистора при его короткозамкнутом выходе для переменного тока. Его можно определять, измерив переменные входные напряжение и ток. При измерении должны поддерживаться постоянные входной ток и входное напряжение. Для переменного напряжения на выходе транзистора нужно осуществить короткое замыкание.

Параметр h_{12} представляет собой коэффициент обратной связи по переменному напряжению. Его можно определить, измерив переменное напряжение на входе при наличии некоторого переменного напряжения на выходе. При этом вход для переменного тока должен быть разомкнут, для чего постоянную составляющую тока на входе пропускают через сопротивление, во много раз большее h_{11} .

Параметр h_{21} является коэффициентом передачи тока при короткозамкнутом выходе для переменного тока.

Параметр h_{22} определяет выходную проводимость транзистора при разомкнутом для переменного тока входе. При измерении h -параметров транзистора следует размыкать его низкоомный вход и замыкать высокоомный выход.

В соответствии уравнений для U_1 и I_2 транзистор можно представить эквивалентной схемой рисунка 7. Однако, это частная эквивалентная схема (модель) транзистора, описывающая его свойства для низких частот на малом входном сигнале. В электронике существует множество эквивалентных схем замещения транзисторов, которые учитывают уровень подаваемых сигналов, их частотный диапазон и другие факторы, влияющие на его работоспособность. Приведенная эквивалентная схема отражает свойства лишь тех транзисторов, которые с достаточной степенью точности могут быть описаны посредством h -параметров в цепях со средоточенными элементами.

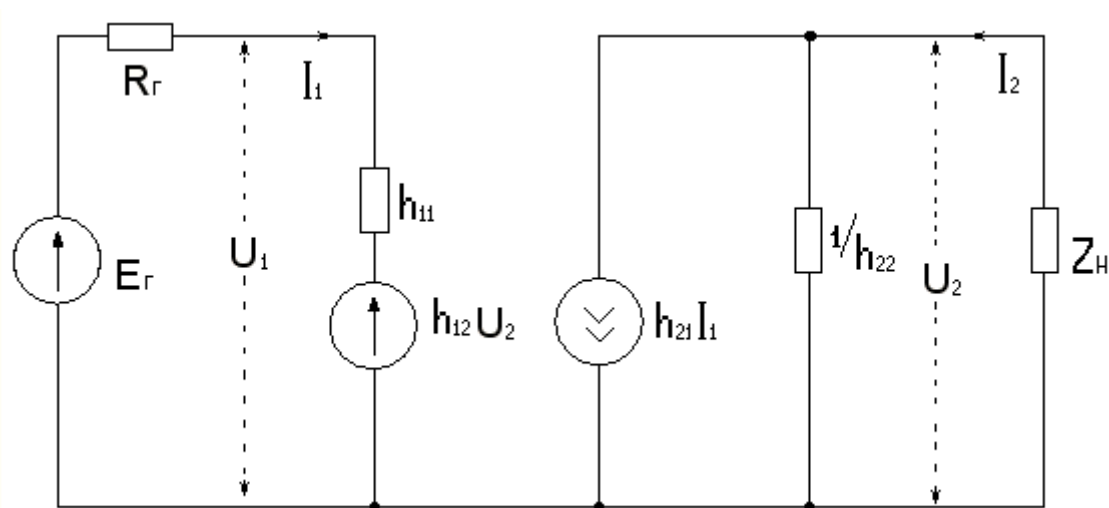


Рисунок 7 - Эквивалентная схема замещения транзистора с h -параметрами.

II. Стенд для исследования транзистора.

Для исследования транзистора используется стенд, электрическая схема которого собрана в соответствии цепи рисунка 3, с той лишь разницей, что в нем совмещенный источник питания E , позволяющий одновременно обеспечить питанием базовую и коллекторную цепи полупроводникового элемента, что позволяет не использовать два источника питания.

При работе со стендом необходимо помнить:

- а) при неправильном обращении с транзистором он перестанет выполнять свои функции – станет неработоспособным;
- б) чтобы этого не случилось, следует строго выполнять предписанную последовательность действий, согласно порядку выполнения работы;
- в) также необходимо учитывать, что постоянное рабочее напряжение $U_{эб}$ для большинства транзисторов не более 0,6 – 0,8 В. Напряжение базовой цепи выше указанной цифры приведет его к неработоспособности.

Функциональное назначение элементов схемы стенда такое же, как и для рисунка 3.

III. Порядок выполнения работы.

Уровень А.

1. Исследование входных характеристик транзистора.

1. Убедитесь, что источник питания E находится в выключенном состоянии. Если это не так, то выключите его и регулятор напряжения, вращением ручки против часовой стрелки, выведите в левое крайнее положение.
2. Выведите в левое крайнее положение резистор R_6 .
3. Включите измерительные приборы в соответствии схемы рис. 8.

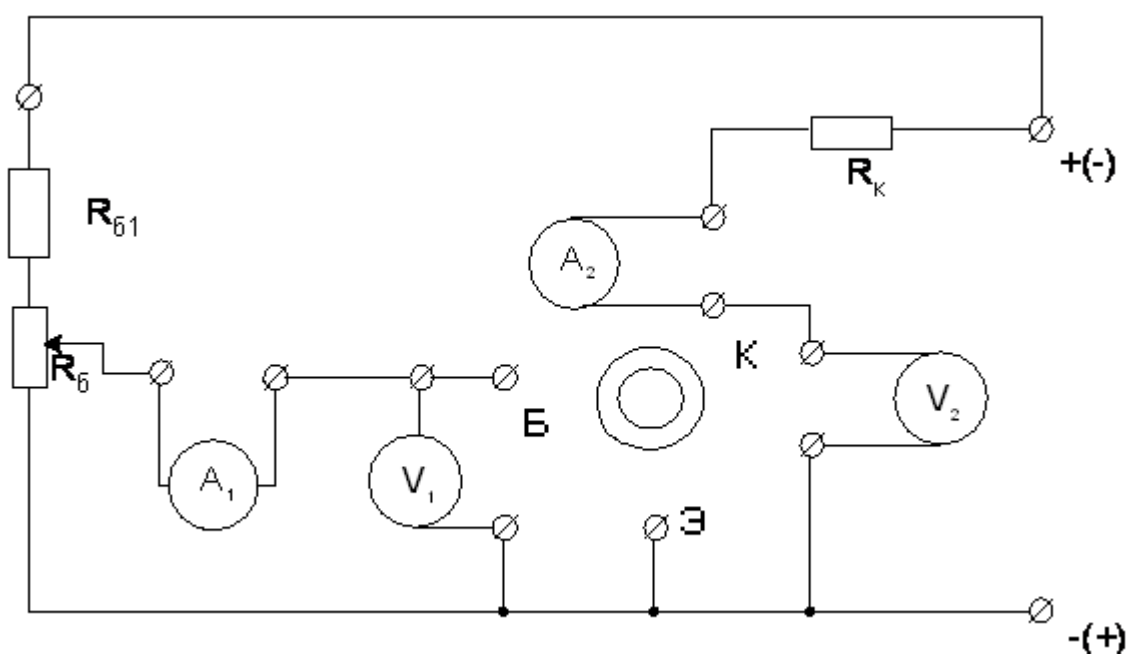


Рисунок 8 - Стенд для снятия входных-выходных характеристик транзистора

4. Подключите к схеме (соблюдая полярность) напряжение питания. Схема собрана и можно начинать исследования. Показания амперметра A_2 в данном исследовании нас не интересуют.

5. Включите источник питания и плавно, вращая регулятор напряжения по часовой стрелке, установите на коллекторе транзистора (вольтметр V_2) напряжение $U_k = 2В$.

6. Далее, плавно вращая резистор R_6 по часовой стрелке, установите напряжение $U_{6э} = 0,2В$ (вольтметр V_1). Зафиксируйте значение тока (амперметр A_1), соответствующее этому напряжению. Полученное значение занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{бэ}, В$		0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$U_k = 2В$	$I_б,$							
$U_k = 3В$								
$U_k = 5В$								

7. Изменяя напряжение $U_{бэ}$ в пределах 0 — 0,8 В, снимите зависимость $I_б = I(U_{бэ})$ при U_k : 2В, 3В и 5В. Коллекторное напряжение U_k выставляется регулятором напряжения источника питания. .

8. После того как сняли входные характеристики транзистора, выключите все напряжения стенда и регуляторы коллекторного и базового напряжений верните в левое крайнее положение, как Вы это делали в п.1 предыдущего задания.

9. На основе полученных результатов постройте семейство входных характеристик транзистора.

10. По полученным характеристикам определите параметр h_{11} .

Уровень В.

2. Исследование выходных характеристик транзистора.

Выполните исследования уровня А и п.11 - п.15.

11. Не включая источник питания, вольтметр V_1 из базовой цепи транзистора переключите в коллекторную цепь вместо прибора V_2 . Включите источник питания и его регулятором, контролируя показания переключенного вольтметра, выставите напряжение на коллекторе транзистора $U_k = 1В$.

12. Резистором $R_б$ плавно установите ток $I_б = 20 \mu A$. После того как в базовой цепи транзистора этот ток установится, зафиксируйте показания амперметра A_2 и занесите его в таблицу 2.

Таблица 2

$U_k, В$		0	1	2	3	4	5
$I_б = 20 \mu A$	$I_k,$ мА						
$I_б = 30 \mu A$							
$I_б = 40 \mu A$							
$I_б = 50 \mu A$							

13. Поддерживая с помощью резистора $R_б$ ток $20 \mu A$, изменяйте напряжение коллектора в пределах от 0 до 5 В в соответствии шага квантования таблицы 2. Возможно, что при повышении коллекторного напряжения транзистор будет открываться, что затрудняет его исследование. Поэтому допустим и другой подход для снятия семейства его выходных характеристик. Поскольку выходные характеристики транзистора имеют квазилиней-

ный вид (рис. 4), то для их снятия достаточно получить две точки прямой и на основе аппроксимации достроить недостающий участок характеристики. Например, для значений коллекторного напряжения U_k : 3 и 4 В. Данные заносите в таблицу.

14. Далее, аналогично как в п.2 этого задания, установите ток, но уже $I_6 = 30 \mu\text{A}$ и снимите зависимость $I_k = I(U_{\text{ЭК}})$. При этом так же допустимо построить эту характеристику семейства на основе ранее описанного метода двух точек прямой. Снимите так же зависимости $I_k = I(U_{\text{ЭК}})$ при I_6 : 40 μA , 50 μA .

15. На основе полученных результатов постройте семейство выходных характеристик транзистора и определите его h_{21} и h_{22} параметры.

Уровень С.

16. Для транзистора, определенного преподавателем, на основе его справочных данных разработать принципиальную электрическую схему для снятия его входных и выходных характеристик и определения h – параметров.

IV. Контрольные вопросы.

1. Методика измерения входных характеристик транзистора.
2. Методика измерения выходных характеристик транзистора.
3. Измерение и определение основных параметров транзистора.
4. Физический смысл и измерение h -параметров транзисторов.
5. Спроектируйте стенд для измерения параметров и характеристик транзистора, например, КТ 635 А или другого, указанного преподавателем.

Лабораторная работа №7

Цепи с сосредоточенными и распределенными R, L, C элементами

Цель работы: получить практические навыки измерений при работе приборами: МО-62 и ВМ 509, при определении величин R, L, C.

Приборы и оборудование: измерительные приборы МО-62 и ВМ 509; магазины сопротивлений P33, индуктивностей и конденсаторов.

I. Краткие теоретические сведения.

Все многообразие электрических цепей условно разделяется на цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. Одна и та же электрическая цепь при одних условиях проявляет себя как система с распределенными параметрами, при других - может являться системой с сосредоточенными параметрами. Доминирующим фактором, по которому определяют характер электрической цепи, является частота ее сигналов. На низких частотах электрические цепи рассматривают как цепи с сосредоточенными параметрами; по мере повышения частоты сигналов в такой цепи начинают более существенно проявляться паразитные емкости и индуктивности, которые могут отрицательно влиять на качество ее работы. Такая цепь становится цепью с распределенными параметрами. В ней, по токопроводящим элементам, происходит распределение емкости, индуктивности и активного сопротивления. Рассмотрим, что представляют собой элементы R, L и C в цепях обоих типов.

Цепи с сосредоточенными параметрами.

Индуктивность в электро-, радио- технике реализуется на основе специально созданных катушек (соленоидов), которые характеризуются собственной индуктивностью L , сопротивлением потерь r_L и собственной емкостью C_L . Индуктивность - физический параметр характеризующий соленоид, но в учебной, научной и технической литературе индуктивностью часто называют параметр L , что не совсем точно. В дальнейшем, говоря об индуктивности, будем иметь ввиду, что это характеристика соленоида. Основное свойство катушки индуктивности, благодаря которому она имеет широкое применение в электро- и радио- технике – это ее способность накапливать энергию магнитного поля.

На величину индуктивности оказывают влияние сердечник соленоида, его экран, число обмоток. Величина r_L катушки обусловлена омическими потерями, потерями магнитного поля в экране и сердечнике. C_L – электриче-

ская емкость между отдельными витками соленоида, емкостями между витками и экраном катушки и др.

Любая катушка индуктивности характеризуется собственной резонансной частотой $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и добротностью $Q_L = \frac{\omega L}{r_L}$. На частотах ω выше резонансной ω_0 , эквивалентная схема замещения индуктивности имеет вид рис.1 а; для частот ω ниже резонансной ω_0 - используют схему рис 1 б).

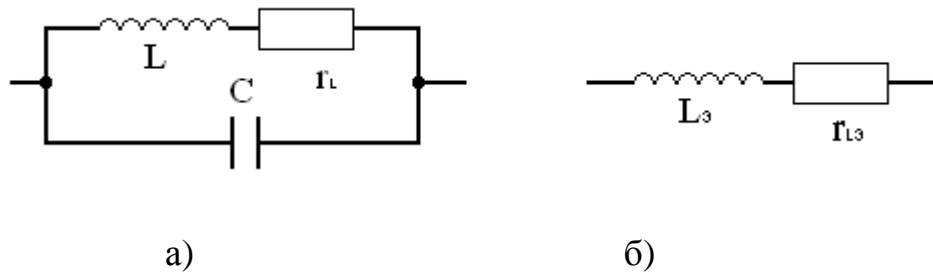


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения катушки с индуктивностью L:

а) для цепей с частотами $\omega > \omega_0$; б) – для частот $\omega < \omega_0$.

При этом эквивалентная индуктивность $L_э$ и эквивалентное сопротивление потерь $r_{Lэ}$ определяются в соответствии выражений:

$$L_э = \frac{L}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad r_{Lэ} = \frac{r_L}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad (1)$$

Емкостный элемент цепи реализуется конденсатором, который характеризуется собственно емкостью C, сопротивлением потерь R_c , и индуктивностью выводов и обкладок конденсатора L_c . Как и индуктивность, он имеет собственную резонансную частоту, которая определяется выражением:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{CL_э} \quad , \text{ а так же характеризуется добротностью } Q_c = r_c \omega C.$$

Последний параметр связан с еще одной характеристикой конденсатора – тангенсом угла потерь: $\text{tg } \delta = 1/Q_c$. На частотах ниже резонансной конденсатор представляют как параллельной, так и последовательной схемами замещения (рис. 2 б); при этом пренебрегают индуктивностью его выводов и обкладок. Для частот, превосходящих резонансную – эквивалентная схема замещения конденсатора учитывает эту индуктивность и изображается электрической цепью рис. 2 а, в виде параллельного включения составных эле-

ментов: C , L_c и R_c . При этом, конденсатор и индуктивность включены последовательно, а резистор с сопротивлением R_c – параллельно им.

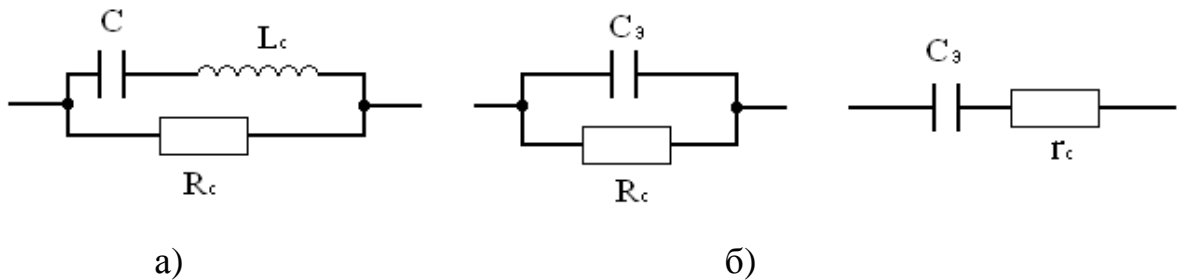


Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения конденсатора:

а) для цепей с частотами $\omega > \omega_0$; б) – для частот $\omega < \omega_0$.

Эквивалентная емкость конденсатора C_3 и эквивалентное сопротивление его потерь r_c для частот ω , ниже резонансной частоты ω_0 определяются выражениями:

$$C_3 = \frac{C}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \qquad r_c = \frac{1}{R_c(\omega C)^2} \qquad (2)$$

Основное свойство конденсатора, благодаря которому он нашел широкое применение в электро- и радио- технике – это его способность накапливать энергию электрического поля.

Резистивный элемент цепи реализуется посредством резисторов, специальных элементов, основной параметр которых сопротивление R . Как и предыдущие элементы, резистор характеризуется индуктивностью выводов L_R и емкостью между выводами C_R . Однако величины L_R и C_R на низких частотах (вплоть до 100 МГц) невелики и поэтому в цепях с сосредоточенными параметрами ими пренебрегают и считают, что резистивный элемент характеризуется лишь активным сопротивлением R . Тем не менее, резистор имеет собственную резонансную частоту, добротность, может иметь, в зависимости от частоты, индуктивно-активный или емкостно-активный импеданс (полное сопротивление), моделироваться посредством схем замещения последовательного и параллельного типа. Однако эти его свойства учитываются в цепях с распределенными параметрами. Основное свойство резистора как базового элемента электро- и радио- техники – это его способность препятствовать прохождению электрического тока. При этом на нем происходит выделение тепла. Он является основным источником диссипативных потерь в электрической цепи, независимо от того является она сосредото-

ченной или распределенной. По точности резисторы (как элементы индуктивности и емкости) разделяются на классы. Их ряд в процентном выражении представлен ниже:

0,1%; 0,2%; 0,4%; 1%; 2%; 4%; 10%; 20%.

Резисторы, точность которых не превышает 2%, называются прецизионными. Они гораздо сложнее в технологическом исполнении и являются более дорогостоящими. Измерение параметров L , R и C в цепях с сосредоточенными элементами осуществляется тремя основными способами, на основе: а) мостового метода; б) – резонансного; в) - преобразованием во временной интервал или напряжение.

При мостовом методе измерения полные сопротивления сравнивают с эталонными, отдельно регулируют действительную и мнимую составляющие последних. Для сравнения используют четырехплечие, шестиплечие или трансформаторные мосты. Область применения мостового метода – диапазон низких частот, поскольку с повышением частоты начинают существенно сказываться паразитные связи между элементами измерительных мостов. Погрешность мостового метода не превышает 0,25%. Наибольшее применение в электро-, радио- технике имеет мостовая измерительная цепь из четырех двухполюсников $Z_1 \dots Z_4$, соединенных по кольцевой схеме (рис. 3).

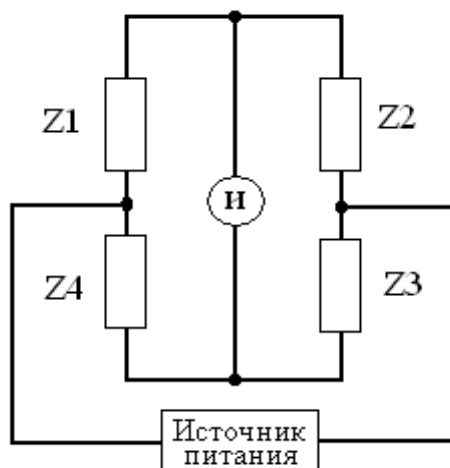


Рис. 3. Мостовая схема, реализованная по принципу четырехплечья.

Каждый из двухполюсников образует плечо моста, причем один из них (обычно Z_1) является объектом измерения, а остальные – мерами. Ветвь, содержащая источник питания, называется генераторной диагональю, а ветвь с измерителем I – индикаторной диагональю. В ходе измерений (если объектом измерения является Z_1) остальными величинами $Z_2 \dots Z_3$ добиваются

баланса моста, т. е. такого его состояния, когда измеритель И зафиксирует отсутствие тока в диагонали ($I=0$). Это возможно, если:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (3)$$

Поскольку в общем случае $Z_1 \dots Z_4$ комплексные величины, то условие равновесия моста предполагает модульное и фазовое равновесия:

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4|; \quad \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \quad (4)$$

При резонансном методе измерения реактивные параметры замещают образцовой емкостью, а потери определяют расчетным путем по изменению добротности измерительного контура. Этот метод был популярен в эпоху освоения радиочастотного диапазона шкалы электромагнитных колебаний.

Метод преобразования измеряемого параметра в напряжение реализуется с помощью цепи, состоящей из измеряемого и эталонного резисторов, которые подключаются в образцовому источнику напряжения. По величине падения напряжения на каждом из резисторов и определяют величины измеряемых параметров. Точность измерения таких систем повышается при использовании обратной связи и если осуществляется раздельное измерение действительной и мнимой части выходного напряжения.

Цепи с распределенными параметрами.

Если в электрической цепи длина распространяющейся в ней волны соизмерима с геометрическими размерами самой цепи, то ее называют электрической цепью с распределенными параметрами. Частоте 300 МГц соответствует длина волны 1 м ($c = \lambda f$). Таким образом, электронные системы, работа которых сопряжена с частотами близкими к 300 МГц и выше являются цепями с распределенными параметрами. Это цепи СВЧ диапазона.

На таких частотах системы электроники за счет значений ω имеют большие величины индуктивного сопротивления $x_L = \omega L$ и бесконечно малые значения для емкостного: $x_C = 1/\omega C$. Если по двум проводам, по которым передаем постоянное напряжение, передавать СВЧ сигнал, то наличие даже малой емкости между проводами приведет к короткому замыканию по переменному току, т. е. окажется невозможным передача сигнала. Задача усложнится и тем, что такая линия будет иметь большое входное сопротивление (за счет ее индуктивной составляющей). Как следствие, передача сигналов даже радио- частотного диапазона (десятки, сотни МГц) осуществляется не обычными проводами, а посредством радиочастотного кабеля, который используется, в том числе и для передачи телевизионных сигналов. Он позволяет уменьшить отрицательное влияние погонной индуктивности и ем-

кости двухпроводной линии. Рассмотрим некоторые особенности электрических цепей, которые используются в СВЧ диапазоне. Заметим, что современные компьютерные системы работают на частотах, составляющих ГГц и потому так же является цепями с распределенными параметрами. На рис. 4 а представлена двухпроводная линия СВЧ диапазона (например, кабель), которая передает сигнал от генератора гармонических колебаний к нагрузке Z_n . Особенность такой цепи (по сравнению с цепью радиочастотного диапазона) в том, что в ней часть сигнала поступает в нагрузку Z_n , а часть отражается, и это отражение будет тем больше, чем больше разница собственного сопротивления линии передачи и сопротивления нагрузки Z_n . Такое явление имеет место и в радиочастотном диапазоне, но там оно не столь велико (организуют специальные меры) и им, в большинстве случаев, пренебрегают. Таким образом, в линии происходит перенос колебания. А это возможно посредством волны. В результате в рассматриваемой линии имеется падающая и отраженная волны, которые в результате сложения (интерференции) создадут становившейся волновой процесс, например, в соответствии рис 4 б.

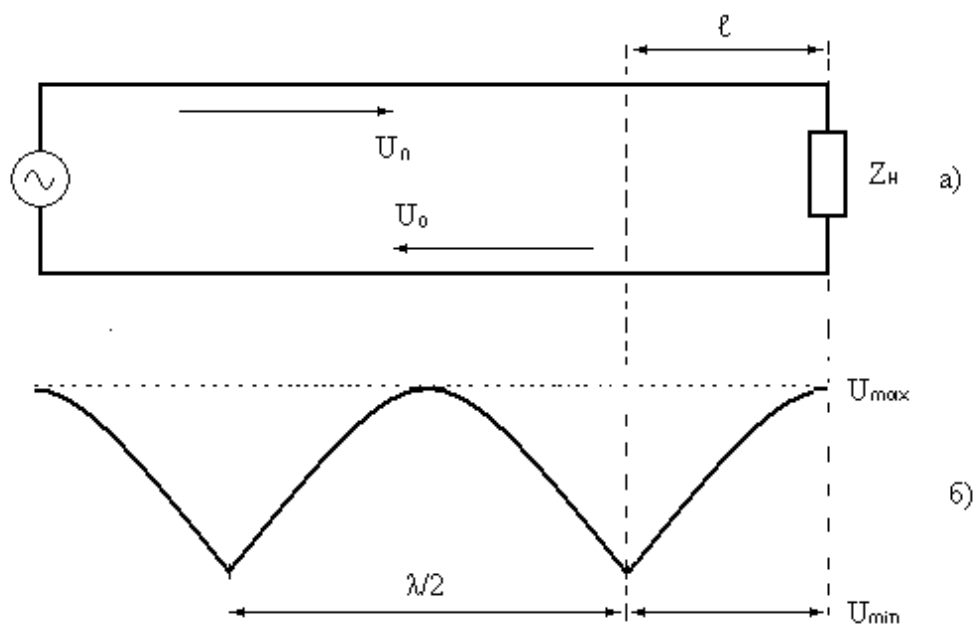


Рис. 4. Линия передачи СВЧ диапазона.

Напомним: уравнение колебания: $y = A \sin(\omega t + \varphi)$, отличается от уравнения волны наличием величины kx в фазе колебаний: $y = A \sin(\omega t - kx + \varphi)$, где k – волновое число, показывающее, какое число длин волн укладывается на отрезке 2π ($k=2\pi/\lambda$); x – расстояние от точки, в которой происходит генерация колебаний, до точки в которой рассматривается волновой процесс. Однако гармонические процессы гораздо проще рассматривать на основе математического аппарата комплексной переменной. Исходя из по-

следнего, амплитуда суммарного напряжения $U(t, \ell)$ на расстоянии ℓ от нагрузки описывается уравнением:

$$\dot{U}(t, \ell) = \dot{U}_n * e^{j\gamma\ell} + \dot{U}_0 * e^{-j\gamma\ell} \quad (5)$$

где: \dot{U}_n и \dot{U}_0 соответственно амплитуды падающей и отраженной волн напряжений; $\gamma = \beta + j\alpha$ - комплексная постоянная распространения волнового процесса; α - постоянная затухания; $\beta = 2\pi/\lambda_n$ фазовая постоянная (волновое число); t - время.

При измерениях в СВЧ диапазоне используют линии, в которых потери практически отсутствуют ($\alpha=0$), тогда уравнение (5) может быть сведено к виду:

$$\dot{U}(t, \ell) = \dot{U}_n * e^{j\gamma\ell} (1 + (\dot{U}_0/\dot{U}_n * e^{-j\gamma\ell}) = \dot{U}_n (1 + \dot{\Gamma} |e^{j(\varphi-2\beta\ell)}|) e^{j\gamma\ell} \quad (6)$$

Поскольку \dot{U}_n и \dot{U}_0 - комплексные числа, то и $\dot{\Gamma}$ - комплексное число, комплексный коэффициент отражения:

$$\dot{\Gamma} = \dot{U}_0/\dot{U}_n = |\Gamma| e^{j\varphi} \quad (7)$$

где: $|\Gamma|$ - модуль, а φ - фазовый угол коэффициента отражения. На рис. 4 б изображено периодическое изменение суммарного напряжения падающей и отраженных волн: картина стоячих волн. Их форма отличается от синусоидальной и зависит от модуля $|\Gamma|$, а фазовый угол - φ коэффициент отражения определяет только их расположение относительно конца линии. В технике СВЧ обычно не занимаются измерением $U(t, \ell)$ или $I(t, \ell)$, а определяют полное комплексное сопротивление \dot{Z} в данном поперечном сечении линии:

$$\dot{Z} = \dot{U}(t, \ell) / \dot{I}(t, \ell) = (\dot{U}_n + \dot{U}_0) / (\dot{I}_n + \dot{I}_0) \quad (8)$$

Отношение напряжения к току падающей волны определяет волновое сопротивление линии \dot{Z}_B . Его можно найти и как отношение напряжения отраженной волны к величине отраженного тока:

$$\dot{Z}_B = \dot{U}_n / \dot{I}_n = \dot{U}_0 / \dot{I}_0 \quad (9)$$

С учетом последнего выражение для комплексного сопротивления линии нетрудно преобразовать к следующему виду:

$$\dot{Z} = \dot{Z}_B * (1 + \Gamma) / (1 - \Gamma) \quad (10)$$

Таким образом, измерения в области цепей с распределенными параметрами (СВЧ диапазоне) не связано с измерением токов и напряжений, как это имеет место для цепей с сосредоточенными параметрами. В этой сфере обычно измеряют величины сопротивлений, причем косвенным методом: измеряют величину Γ , определяют волновое сопротивление линии $Z_{\text{в}}$, которое зависит от геометрических размеров линии и типа волн (9) и далее посредством (10) комплексное сопротивление \dot{Z} . Еще одна электрическая величина, которая зачастую подвергается измерению в области цепей с распределенными параметрами это мощность сигнала. Однако в современной электронике актуальность этого измерения значительно уменьшилась, поскольку в практической электронике освоено генерирование сигналов мощности со значительным запасом. Тем не менее, как величина контроля электрической цепи она свою актуальность не потеряла.

II. Порядок выполнения работы.

Уровень А.

Измерение точного сопротивления резисторов прибором МО-62.

а) Изучите функциональную схему прибора на основе его технического описания;

б) Найдите на передней панели прибора тумблер его включения;

в) сформулируйте назначение переключателей прибора «Множитель»;

г) выясните функции кнопки «Грубо» и переключателя «Точно»;

д) на основе магазина сопротивлений научитесь выставляемую величину измерять прибором МО-62.

1. Осуществите точное измерение сопротивлений резисторов, предложенных преподавателем. Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$R_{\text{зав}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{МО-62}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ВМ509}}, \text{ Ом}$	$\Delta R, \text{ Ом}$	$\frac{\Delta R}{R_{\text{зав}}}, \%$	$R, \text{ Ом}$	Класс точности

Измерение параметров R, L и C прибором VM509.

а) включить прибор VM509 (измеряет сопротивление, индуктивность и емкость на частоте 1кГц);

б) проконтролировать напряжение источника питания (батарею) переключателем рода работ в положении “BAT”. Декадный переключатель в положении “V”;

в) необходимо убедиться в том, что прибор будет производить правильные измерения, т. е. откалиброван. В положении переключателя рода работ “CAL” измерительный прибор должен давать отклонение 10 делений. В случае несоответствия следует произвести коррекцию ручкой “CALIBRATION”. Установление уровня калибровки происходит приблизительно после 10 минут работы прибора;

г) измерение сопротивлений R резисторов.

Для этого переключатель рода работ установить в положение “R”. К зажимам “X” подключается измеряемое сопротивление, и переключателем пределов следует переключать от самых больших значений к низшим (сверху вниз) до тех пор, пока отклонение стрелки прибора не будет находиться в пределах 1-10. Измеренное значение отсчитывается по шкале прибора, цвет которой соответствует таблице выбранного режима работы (черный). Если требуется повысить точность отсчета измеряемого значения до 0,25%, то следует использовать декады. Ближайшее низшее число (0,1,2,3-10), определяемое по прибору, передается на декаду путем установки декадного переключателя. При этом автоматически возрастает чувствительность измерения в 10 раз. На приборе при этом следует отсчитывать значение на втором и третьем местах.

д) измерение емкости конденсаторов C и активной составляющей R.

Для этого переключатель рода работ установить в положение “C”, декада выключена. К зажимам “X” подключается конденсатор, и переключателем пределов следует переключать от наибольших значений к наименьшим (сверху вниз) до тех пор, пока прибор не даст отклонение в пределах 1-10. Если необходимо измерять с повышенной точностью, то можно использовать декаду, как и при измерении R. Для определения активных составляющих конденсаторов нажимается кнопка “X/R” и по обратной шкале (синей) отсчитывается значение. Размерность активной составляющей в таблице переключателя пределов относится к положению

декады 0-10. Если декада выключена (“V”), то необходимо показание измерительного прибора разделить на 10.

е) измерение индуктивности соленоида L и активной составляющей R .

Переключатель рода работ перевести в положение “L”. Декаду нельзя использовать (ее положение является произвольным). К зажимам “X” подключается измеряемая индуктивность. Вращать переключатель пределов от наибольших значений к самым низким (сверху вниз) до тех пор, пока прибор не покажет отклонение в пределах 1-10 по черной шкале прибора. Для измерения вещественных составляющих катушек индуктивностей нажать кнопку “X/R” и произвести отсчет также по черной шкале.

2. Провести измерения сопротивления тех же резисторов, которые Вы измеряли прибором МО-62. Результаты измерений занести в ту же Таблицу 1. На основе проведенных измерений определите:

2.1 - разброс сопротивления каждого из элементов $\Delta R = R_{\text{ВМ509}} - R_{\text{зав}}$, относительно заводского номинала;

2.2 - величину относительного разброса сопротивления $\Delta R/R_{\text{зав}}$ в % каждого из резисторов;

2.3 - фактический номинал $R = R_{\text{изм}} \pm \Delta R$ Ом каждого из измеренных резисторов;

2.4 - по полученным результатам, в соответствии шкалы класса точности резисторов, определить их точность.

3. Для предложенных преподавателем 5 конденсаторов и 5 катушек индуктивности занести их значения емкости и индуктивности в графу «Заводской номинал»: $C_{\text{зав}}$ и $L_{\text{зав}}$.

4. Посредством измерителя ВМ509, на основе описанной методики измерения величин R , L и C провести исследование предложенных элементов, а результаты занести в Таблицу 2. В частности, определить:

Таблица 2

	Параметр элемента	$C_{\text{зав}}$, мкФ $L_{\text{зав}}$, мГн	Измеренный	ΔC , мкФ ΔL , мГн	R_C , Ом R_L , Ом	X_C , Ом X_L , Ом
1	С, мкФ					
2						
3						
4						
5						
1						
2						

3	L, мГн					
4						
5						

- 4.1 – емкости конденсаторов $C_{изм}$, индуктивности катушек $L_{изм}$;
4.2 – разброс емкости ΔC и индуктивности ΔL каждого элемента;
4.3 - потери омического сопротивления R_C в емкости, и R_L - в индуктивности;
4.4 – комплексное сопротивление исследованных реактивных элементов на частоте измерения прибора 1 кГц.

Уровень В.

Выполнить задания уровня А и п.5.

Измерение прибором VM509 на основе сравнения с внешним образцом (измерение допусков).

Для использования такой методики, переключатель рода работ установить в положение “TOL” требуемого предела. Стрелка прибора перемещается в положение нуля по красной шкале. При измерении L или R подключить эталон к зажимам “N”, измеряемый объект к зажимам “X”, и разность отсчитывается по соответствующей шкале. При измерении допусков конденсаторов следует эталон подключить к зажимам “X”, измеряемый конденсатор к зажимам “N” для того, чтобы сохранить полярность отклонения стрелки прибора.

5. Провести измерение R, L и C элементов на основе метода сравнения с внешним образцом. Для этого из числа исследованных элементов выберите по паре однотипных и, используя один как образец, определите величину другого. Данные измерений занесите в Таблицу 3

Таблица 3

R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	C ₁ , мкФ	C ₂ , мкФ	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн С

Уровень С.

Выполнить задания уровня В и п.6 – п.7.

6. Оцените добротность исследованных реактивных элементов на частоте работы прибора MO509 - 1 кГц.

7. По полученным результатам Таблицы 3 оцените точность метода измерений с внешним образцом, сравнительно метода с внутренним эталоном (Таблица 2). Результаты исследования сведите в обобщенную Таблицу 4, которую Вам следует составить самостоятельно на основе плана выполнения лабораторной работы. Сделайте выводы о точности измерений обеими методами. В Таблице 4 предусмотрите отображение обобщенных результатов п.б.

Контрольные вопросы.

1. Что есть цепи с распределенными и сосредоточенными параметрами?

2. Укажите физический смысл величин R , L и C , которые составляют элементную базу электроники и являются основой, на которой строится теория цепей и сигналов.

3. Укажите характеристики резисторов, катушек индуктивностей и конденсаторов.

4. Сущность и область применения мостового метода измерения.

5. Установите переключатель рода работ прибора ВМ509 в положение “R”. Почему при разомкнутых зажимах прибор дает максимальное отклонение направо на всех поддиапазонах?

6. Установить переключатель рода работ того же прибора в положение “C”. Почему при разомкнутых зажимах прибор ни на одном из пределов не дает никакого отклонения (за исключением предела 1пФ)? Что измеряет прибор в данном случае на пределе 1 пФ?

7. По какой шкале необходимо проводить измерения, если переключатель рода работ стоит в положении “20%”?

9. Какова точность измерений прибора, если декадный переключатель стоит в положении “V”? Какова максимальная точность измерений прибора?

10. Подключить магазин сопротивлений. Почему при измерении малых сопротивлений (0-10 Ом) имеется заметное расхождение результатов измерения от задаваемого значения на магазине сопротивлений, а при измерении более больших значений сопротивления эта неточность исчезает? Значит ли это, что прибор имеет разную погрешность измерения на различных пределах?

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители:

Маркевич Константин Михайлович
Дереченик Станислав Станиславович
Чугунов Сергей Владимирович

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ

«Измерение характеристик и параметров
полупроводниковых транзисторов»
«Цепи со средоточенными и распределенными параметрами»
по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация
в информатике и радиоэлектронике»
для специальностей:

36 04 02 – промышленная электроника,
40 02 01 – вычислительные машины, системы и сети,
40 03 01 – искусственный интеллект,
53 01 02 – автоматизированные системы отображения информации

Ответственный за выпуск: Маркевич К.М.
Редактор: Строкач Т.В.
Компьютерная верстка: Кармаш Е.Л.
Корректор: Никитчсик Е.В.

Подписано к печати 31.10.2011. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,25. Заказ №_990. Тираж 50 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет», 224017, г. Брест, ул. Московская, 267